

1. まえがき

1.1 基準制定の経緯

地盤の透水特性を表す透水係数としては、**図-1.1**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-1.1**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（JGS 1314, 1315, 1321, 1322）が定められている（飽和地盤における不飽和透水係数（**図-1.1**中の左下）は、それを求める必要性が少ない）。

一方、地下水面よりも上の地盤の透水係数は、飽和透水係数（**図-1.1**の②）、不飽和透水係数（**図-1.1**の③）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。この具体的な意味は1.2で述べる。

ところで、飽和地盤の透水試験方法には4つの基準が存在したが、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「**締固めた地盤の透水試験方法**」（JGS 1316）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固められた地盤の表層付近のみを対象としている。したがって、より適用範囲の広い、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を開始した。

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、これを先に基準として制定することとした。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**基準制定の目的のひとつとして意図した。さらに、不飽和地盤を対象とした透水試験の国際規格（ISO）である「**ISO・DIS22282-5 Infiltrometer test**」に対応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、「**地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法**」

図-1.1 現場での4つの透水係数

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。このような飽和に近い飽和度の透水係数は、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を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。

1.2 基準の特徴

本基準「地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」の特徴を以下に挙げる。

- (1)地下水面よりも上の地盤では、注水を行っても封入空気を完全に排除することができない場合がある。したがって、地下水面よりも下の地盤や室内試験が対象とする完全な飽和状態と区別するため「現場飽和状態」を定義している。

- (2)「地下水面より上」の高さについては、土質性状によっても異なることから、現在、規定できる段階になく、必ずしも地下水面よりも上の地盤の全てに適用可能とは限らないことを留意する必要がある。
- (3)本基準では、定水位負荷の試験を対象としており、定常状態時における透水係数を測定する。初期の飽和状態によっては、同一地盤であっても定常到達時間などが一律に規定できない特徴もあり、本基準には定常到達時間や試験装置の寸法については規定していない。
- (4)本基準では、「地表面で実施する場合」と「試験孔で実施する場合」の試験に大きく分けられ、対象とする地盤の特性や試験目的などを考慮していずれの場合で実施するか、その適用可否を判断する必要がある。
- (5)「地表面で実施する場合」は、数十cmまでの浅い地盤での透水性を対象としており、地盤の等方性を仮定して現場飽和透水係数を求める透水試験方法を規定している。特に透水性が高い地盤では定圧負荷を維持するために負圧で浸潤させるなど、初期の飽和度によっても変わってくる透水性の大きさをも考慮して負荷する圧力の方法を選択する必要がある。
- (6)「試験孔で実施する場合」は、深さ約 0.3m のオーガー孔、深さ約 1m 以深のオーガー孔またはボーリング孔において、地盤の等方性を仮定して現場飽和透水係数を求める試験方法を規定している。現実の地盤では、水平方向と鉛直方向の透水性が異なることがあるが、このような場合には、主として水平方向の透水性把握に適した方法である。それぞれの現場において試験孔の掘削が可能か否か、またどの深さでの透水性を測るかの目的に応じ、オーガー形式、ボーリング形式が選択される。
- (7)本基準は、現場の初期飽和度による定常到達時間、成層性や植生などによっても浸透水の流れに影響することを理解して適用されなければならない。
- (8)本基準において項目の(7)を含めた比較検証の実施が可能となるように、現場の地盤状況を報告事項に挙げるようにしている。

図-1.2 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法

2. 地盤工学会基準「地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」(JGS*****)

1 適用範囲

この基準は、現場飽和透水係数を求める試験方法について規定する。

この試験方法は、地下水面より上の地盤を対象とする。

2 引用規格・基準

次に掲げる規格・基準は、この基準に引用されることによって、この基準の規定の一部を構成する。これらの引用規格・基準は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS A 5005 コンクリート用碎石及び砕砂

3 用語及び定義

この基準で用いる主な用語及び定義は、次による。

3.1

地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法

地下水面より上の地盤を浸潤により現場飽和状態にして、現場飽和透水係数を求める試験方法。**附属書 B の図 B.1** に示すように、地表面で実施する場合と試験孔で実施する場合があり、前者には負圧で浸潤させる方法、正圧で浸潤させる方法、後者には、試験孔全体を用いる方法、測定用パイプを用いる方法、パッカーを用いる方法の 5 種類がある。主として地表面からの浸潤を対象とする場合には地表面で実施し、主として水平方向の浸潤を対象とする場合には試験孔で実施する。

3.2

現場飽和状態

地下水面より上の地盤における、封入空気を含んだ飽和に近い状態。地下水面より上の地盤においては、封入空気の影響で完全な飽和状態とならない場合があるため、地下水面より下の地盤の飽和状態と区別して定義される。

注記 完全な飽和状態での体積含水率は間隙率と等しいが、現場飽和状態での体積含水率は有効間隙率として表される。

3.3

現場飽和透水係数

地下水面より上の地盤の現場飽和状態における透水係数。

注記 現場飽和状態は試験前の地盤状況及び各試験条件に応じて変化する場合がある。

4 試験用具

試験用具には，以下のものがある。

4.1 掘削用具

試験孔で実施する場合は，試験を実施するために必要な孔径で試験を実施する深さまで試験孔を掘削できる用具を用いる。

注記 オーガー(ハンドオーガー，電動オーガー)，ボーリングマシン，スコップなどである。

4.2 整形用具

試験面の整形用具には，以下のものがある。

注記 1 本基準において，試験面とは，実際に水圧を負荷する地表面であり，試験孔で実施する場合は試験孔の表面を指す。

a) 地表面で実施する場合

試験面を露出・整形し，可能な限り水平にすると共に，平滑にする用具及び材料を用いる。

注記 2 スコップ，移植ゴテ，幅広の金属ヘラ，透明プラスチック板，湿った砂，小型水準器などである。

b) 試験孔で実施する場合

試験面を整形することが可能な場合には，掘削によって生じた試験面の鏡面化や緩みなどを除去できる用具を用いる。

注記 3 鋼製ブラシなどである。

4.3 定水位浸潤装置

試験面に一定の正圧または負圧を負荷できる機能，給水できる機能及び浸潤流量を計測できる機能を有するもの。それぞれの機能を一体化したものや，複数の機器から構成されるものもある。

注記 1 定水位浸潤装置の例を**附属書 B**に示す。

a) 地表面で実施する場合

試験面を構成するための給水ディスク，浸潤用円筒などを用いる。また，試験に用いた水の温度を測定するために温度計を用いる。

注記 2 給水ディスクの例を**附属書 B**の**図 B. 2**に示す。

注記 3 浸潤用円筒の例を**附属書 B**の**図 B. 3**に示す。

b) 試験孔で実施する場合

試験孔のうち試験面を特定するための測定用パイプ，パッカー，注水管及び送水管などを用いる。また，必要に応じて碎石を用いる。

注記 4 測定用パイプの例を**附属書 B**の**図 B. 5**に示す。

注記 5 パッカー，注水管及び送水管の例を**附属書 B**の**図 B. 6**に示す。

4.4 水温計

試験に用いる水の温度が測定できるもの。

5 試験の準備

5.1 地表面で実施する場合

地表面で実施する場合の試験方法には、負圧で浸潤させる方法と正圧で浸潤させる方法がある。それぞれの試験の準備は、次による。

5.1.1 負圧で浸潤させる方法

負圧で浸潤させる方法は、次による。

- a) 試験面を選定する。
- b) 試験面を露出・整形し、可能な限り水平にすると共に、試験面の凹凸を平滑にする。

注記 1 傾斜は 2 度未満が望ましい。

注記 2 表面の凹凸は、透明プラスチック板を試験面に当てて、密着の様子を確認しながら整形する。

- c) 凹部を湿った砂で埋め、給水ディスクを試験面に密着させる。

5.1.2 正圧で浸潤させる方法

正圧で浸潤させる方法は、次による。

- a) 試験面を選定する。
- b) 試験面を露出・整形し、可能な限り水平にすると共に、試験面の凹凸を平滑にする。
- c) 浸潤用円筒を水平に試験面から 3～5 cm 程度、ハンマー等を用いて打設する。

注記 1 浸潤用円筒内に 3～10 cm 程度の一定水位を与えて、浸潤用円筒の側面を伝って、地表面に漏水が生じないことを確認する。漏水が生じた場合は、再度浸潤用円筒の打設を行う。

注記 2 浸潤用円筒を打設することが困難な場合には、**附属書 B** の **図 B.3** に示すように、小口径のオーガー孔を掘削して湛水してもよい。

- d) 打設した浸潤用円筒の深さを測定し、貫入深さ $d(\text{m})$ とする。

注記 3 オーガー孔を掘削した場合、そのオーガー孔の半径 $r_0(\text{m})$ 及び深さを測定する。

5.2 試験孔で実施する場合

試験孔で実施する場合の試験方法には、試験孔全体を用いる方法、測定用パイプを用いる方法及びパッカーを用いる方法がある。それぞれの試験の準備は、次による。

5.2.1 試験孔全体を用いる方法

試験孔全体を用いる方法は、次による。

- a) 試験孔の位置を選定する。
- b) 試験を実施するために必要な孔径で試験を実施する深さま

で試験孔を掘削する。掘削には掘削用具を用いる。

- c) 試験面を整形する。

注記 1 試験面に鏡面化や緩みなどの乱れがないか目視又はカメラで確認することが望ましい。試験面が鏡面化している場合及び緩みなどの乱れが生じている場合には、鋼製ブラシで試験面をかき乱すことが望ましい。

- d) 試験孔の深さと孔径を測定する。
- e) 孔壁が崩れる恐れがある場合には、**附属書 B の図 B.5** のように、碎石を充填する。

注記 2 碎石は **JIS A 5005** に規定される碎石 1505（粒径 5～20 mm）程度のものを用いる。ただし、碎石の間隙が試験孔周辺から流入してくる微粒子によって詰まる恐れがある場合は、 $D_{15}(\text{碎石})/D_{85}(\text{試験孔周辺の土})$ が 5 未満であることを確認することが望ましい。ここに、 D_{15} 、 D_{85} はそれぞれ、粒径加積曲線において通過質量百分率の 15%、85% に相当する粒径である。

5.2.2 測定用パイプを用いる方法

測定用パイプを用いる方法は、次による。

- a) 試験を実施するために必要な孔径で試験を実施する深さまで試験孔を掘削する。掘削には掘削用具を用いる。
- b) 試験孔内に測定用パイプを挿入する。
- c) 試験面を洗浄する。

注記 水で洗浄し、試験面の鏡面化している部分を十分に除去する。

5.2.3 パッカーを用いる方法

パッカーを用いる方法は、次による。

- a) 試験孔の位置を選定する。
- b) 試験を実施するために必要な孔径で試験を実施する深さまで試験孔を掘削する。掘削には掘削用具を用いる。
- c) 試験面を整形する。

注記 試験面に鏡面化や緩みなどの乱れがないか目視又はカメラで確認することが望ましい。試験面が鏡面化している場合及び緩みなどの乱れが生じている場合には、鋼製ブラシで試験面をかき乱すことが望ましい。

- d) 試験孔の深さと孔径を測定する。
- e) 試験を実施する深さの上端に位置するようにパッカーを挿入する。
- f) パッカーを加圧する。

6 試験方法

試験方法は、次による。

- a) 定水位浸潤装置を用いて、試験面に一定の浸潤水頭 h (m)を与えて浸潤を開始する。

注記 1 本基準において、浸潤水頭とは、浸潤のために試験面に負荷する水の圧力を水頭として表したものを指す。

注記 2 測定用パイプを用いる方法では、**附属書 B の図 B.5**に示すように、測定用パイプ内の水位がストレーナー区間内に位置するように浸潤水頭を与える。

- b) 浸潤開始後は、所定の時間間隔毎に浸潤流量を測定し、時間とともに記録する。

注記 3 タンクの水位低下量から浸潤流量を算出できる定水位浸潤装置を用いた場合には、所定の時間間隔の代わりに、所定の水位低下量毎に浸潤流量を測定することができる。また、浸潤流量の代わりに、タンク内の水位もしくは質量を測定し、結果の整理の段階で浸潤流量を算出してもよい。

注記 4 浸潤開始直後は、短い時間間隔で浸潤流量を測定し、徐々に時間間隔を延ばしてもよい。

- c) 浸潤流量が、おおむね一定になったと判断した時点で、定常浸潤流量 Q_s (m³/s)を記録して、浸潤及び測定を終了する。

注記 5 浸潤流量の代わりに、タンク内の水位を測定した場合は、時間間隔における水位低下量、または水位低下に要する時間が概ね一定になった時点で浸潤及び測定を終了してもよい。

- d) 負圧で浸潤させる方法では、一旦給水を停止し、浸潤水頭を変更した後に、a)～c)の作業を繰り返して実施する。与えた浸潤水頭 h_i (m)に対する定常浸潤流量を Q_{si} (m³/s)と表す。ここに、 h_i (m)は i 段階目の浸潤水頭、 Q_{si} (m³/s)は i 段階目の定常浸潤流量を表す。

注記 6 浸潤水頭は、3 段階又はそれ以上が望ましい。

- e) 試験に用いた水の温度を測定する。
f) 試験後は、それぞれ次の方法による。
1) 負圧で浸潤させる方法

給水ディスクを取り除いた後、試験面における浸透が面的に均質であったかどうかを確認するために、写真を撮影する。

注記 7 直径に沿って鉛直の断面を作成し、給水ディスクからの浸潤が想定しているような球根型のものであるかどうかを確認することが望ましい。

注記 8 体積含水率，乾燥密度等物理特性を測定するために乱れの少ない試料を採取することが望ましい。

2) 正圧で浸潤させる方法

注記 9 試験終了後に，浸潤用円筒直下あるいはオーガー孔周縁を掘削し，浸潤に影響を及ぼす水みちや大きな空隙，あるいは大きな礫などの有無を確認することが望ましい。

3) 試験孔全体を用いる方法

碎石を用いた場合には，碎石を完全に取り除く。試験後の試験孔の深さと孔径を測定し，試験前の孔径が保たれていることを確認する。その後，試験孔を適切に閉塞する。

注記 10 再試験を行う場合で，試験面に細粒分が付着している場合には，鋼製ブラシで試験面から細粒分を掻き取る。

4) 測定用パイプを用いる方法

測定用パイプを抜いた後，試験孔を適切に閉塞する。

5) パッカーを用いる方法

引き上げたパッカーの湿り具合から試験区間の長さ l (m)を測定する。その後，試験孔を適切に閉塞する。

注記 11 通常は，**附属書 B** の **図 B. 6** に示すように，パッカー下端から孔底までの長さを測定して，試験区間の長さとする。しかし，引き上げたパッカーの湿り具合から，試験中の水位がパッカーの途中に位置すると判断した場合には，その位置から孔底までの長さを測定して，試験区間の長さ l (m)とする。

7 結果の整理

結果の解析方法を**附属書 A**に示す。

8 報告事項

次の事項を報告する。

a) 位置及び地盤高

注記 1 地盤高として標高を報告することが望ましい。

b) 試験日時及び天候

c) 試験方法

注記 2 用いた試験方法を，負圧で浸潤させる方法，正圧で浸潤させる方法，試験孔全体を用いる方法，測定用パイプを用いる方法，パッカーを用いる方法から選択して報告する。

d) 定水位浸潤装置の構造

e) 浸潤水頭

f) 浸潤流量の測定記録

- g) 定常浸潤流量
 - h) 現場飽和透水係数
 - i) 試験に用いた水の温度
 - j) この基準と部分的に異なる方法を用いた場合には,その内容
 - k) その他特記すべき事項
- 1) 負圧で浸潤させた場合は, a)~k)に加えて以下の内容を報告する.
- l) 給水ディスクの半径
 - m) 試験後に撮影した写真
- 2) 正圧で浸潤させた場合は, a)~k)に加えて以下の内容を報告する。
- o) 浸潤用円筒の半径
注記 3 オーガー孔で実施した場合はオーガー孔の半径を報告する。
 - p) 浸潤用円筒の貫入深さ
注記 4 オーガー孔で実施した場合はオーガー孔の深さを報告する。
 - r) 土の種類に応じて設定される土壌パラメータと浸潤用円筒の半径と貫入深さから算定される形状係数
注記 5 オーガー孔で実施した場合は,土の種類に応じて設定される土壌パラメータと浸潤水頭から算定される形状係数を報告する。
- 3) 試験孔全体を用いる方法で実施した場合には, a)~k)に加えて以下の内容を報告する。
- s) 試験前の試験孔の深さ及び孔径
 - t) 試験後の試験孔の深さ及び孔径
- 4) 測定用パイプを用いる方法で実施した場合には, a)~k)に加えて以下の内容を報告する。
- u) 試験孔の深さ及び孔径
- 5) パッカーを用いる方法で実施した場合には, a)~k)に加えて以下の内容を報告する。
- w) 試験孔の深さ及び孔径
 - x) 試験区間の長さ
注記 6 試験区間の長さのほかに,パッカー区間の深さを報告することが望ましい。

附属書 A (規定) 結果の解析方法

A.1 地表面で実施する場合の負圧で浸潤させる方法による現場飽和透水係数の算定

現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) の算定は、次による。

- a) 片対数グラフの自然対数目盛（縦軸）に各段階の定常浸潤流量 Q_{si} (m³/s) を、算術目盛（横軸）に各段階の浸潤水頭 h_i (m) をとり、**附属書 B** の **図 B. 6** に示すように $h - \log_e(Q_s)$ 図を作成する。
- b) 作成した $h - \log_e(Q_s)$ 図の直線部分の勾配 a (1/m) と縦軸との切片 b (m³/s) を求める。
- c) 現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) を次式で算定する。

$$k_{fs} = \frac{b}{\pi r_0^2 + \frac{4r_0}{a}}$$

ここに、 r_0 : 給水ディスクの半径(m)

注記 $h - \log_e(Q_s)$ 図の縦軸との切片 b (m³/s) は、浸潤水頭がゼロのときの浸潤流量を意味する。

A.2 地表面で実施する場合の正圧で浸潤させる方法による現場飽和透水係数の算定

現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) を次式で算定する。

$$k_{fs} = \frac{\alpha G Q_s}{r_0 \alpha h + r_0 + G \alpha \pi r_0^2}$$

ここに、 Q_s : 定常浸潤流量(m³/s)

h : 浸潤水頭(m)

r_0 : 浸潤用円筒の半径(m)

α : 土の種類に応じて設定される土壌パラメータ (m⁻¹) であり、**附属書 B** の **表 B. 1** に例を示す。

G : 浸潤用円筒の半径 r_0 (m) と貫入深さ d (m) から次式により算定される形状係数

$$G = 0.316 \left(\frac{d}{r_0} \right) + 0.184$$

注記 オーガー孔で実施した場合には、次式を用いる。

$$k_{fs} = \frac{C Q_s}{2\pi h^2 + C \pi r_0^2 + 2\pi h / \alpha}$$

ここに、 Q_s : 定常浸潤流量(m³/s)

h : 浸潤水頭(m)

r_0 : オーガー孔の半径(m)

α : 土の種類に応じて設定される土壌パラメータ (m⁻¹) であり, 附属書 B の表 B. 1 に例を示す。

C : オーガー孔の壁面と底面からの浸潤を考慮するための形状係数

$$C = b_0 + b_1 \cdot \sqrt{h/r_0} + b_2 \cdot \left(\sqrt{h/r_0}\right)^2 + b_3 \cdot \left(\sqrt{h/r_0}\right)^3 + b_4 \cdot \left(\sqrt{h/r_0}\right)^4$$

ここに, $b_0 \sim b_4$: 上式に与える係数であり, 附属書 B の表 B. 2 に例を示す。

A. 3 試験孔で実施する場合の試験孔全体を用いる方法および測定用パイプを用いる方法による現場飽和透水係数の算定

地下水面が試験孔の孔底よりも十分に深い位置にあり, 浸潤流量が地下水面の影響を受けない条件においては, 現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) を次式で算定する。

$$k_{fs} = \frac{Q_s}{2\pi h^2} \left[\log_e \left[\frac{h}{r_0} + \left\{ \left(\frac{h}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} + \left(\frac{r_0}{h} \right) \right]$$

ここに, Q_s : 定常浸潤流量(m³/s)

h : 浸潤水頭 (試験孔内水深) (m)

r_0 : 試験孔の半径(m)

A. 4 試験孔で実施する場合のパッカーを用いる方法による現場飽和透水係数の算定

地下水面が試験孔の孔底よりも十分に深い位置にあり, 浸潤流量が地下水面の影響を受けない条件においては, 現場飽和透水係数 k_{fs} (m/s) を次式で算定する。

$$k_{fs} = \frac{Q_s}{4\pi(hl - l^2/2)} \left[\log_e \left[\frac{l}{r_0} + \left\{ \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right\}^{1/2} + \left(\frac{r_0}{h} \right) \right]$$

ここに, Q_s : 定常浸潤流量(m³/s)

h : 浸潤水頭 (試験孔内水深) (m)

r_0 : 試験孔の半径(m)

l : 試験区間の長さ(m)

附属書 B (参考)

定水位浸潤装置及び試験結果整理の例

B.1 地表面で実施する場合と試験孔で実施する場合の試験方法の例

注記 1 図中の数値は，試験面の直径の例を参考として示している。

B.2 地表面で実施する場合の試験装置の例

図 B.2～図 B.3 に地表面で実施する場合の定水位浸潤装置の例を示す。

注記 1 図中の $z_2 - z_1$ が試験面における浸潤水頭である。

注記 2 給水ディスクとは，下面に沢山の小孔が開いている中空の円盤を浸潤水頭程度の負圧では空気が入らない細かい目開き (5～20 μm 程度) のナイロンメッシュで覆ったものである。

注記 3 浸潤用円筒とは，任意の水位を試験面上に維持して，浸潤させるための円筒である。

注記 4 浸潤用円筒を用いる場合には，マリOTTサイフォン内の空気を浸潤水頭 h (m) に相当する高さに固定して，吐出口から浸潤用円筒内に定水位で給水を行う。

注記 5 オーガー孔を用いる場合には，マリOTTサイフォン内の空気を浸潤水頭 h (m) に相当する高さに固定して，吐出口からオーガー孔内に定水位で給水を行う。

図 B.1 地表面で実施する場合と試験孔で実施する場合の試験方法の例

図 B.2 地表面で実施する場合の定水位浸潤装置の例（負圧で浸潤させる方法）

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

3. 基準の解説

3.1 試験の目的

本基準が規定している試験方法は、地下水面より上の地盤の現場飽和透水係数を求めることを目的としている。同様な基準として、JGS1316「締め固めた地盤の透水試験方法」があるが、JGS1316 は締め固めた地盤を対象としているが、本基準は自然地盤を含む地下水面より上の地盤を対象としている。

3.2 適用範囲

本基準の適用範囲は、通常は「不飽和土」と呼ばれる、地下水面よりも上の地盤全般である。ただし、本基準が規定している試験方法は、必ずしも地下水面より上の地盤のすべてに適用可能とは限らないため、対象とする地盤特性や試験目的などを考慮して、本基準の適用可否を判断する必要がある。

本基準の適用可否を判断するにあたり、対象とする地盤特性について、以下のような点に留意する必要がある。

地盤は一般的に成層構造をしており、水平方向と鉛直方向では透水性も異なるものと考えられる。しかし、本基準における現場飽和透水係数の算出式は、均質等方を仮定して導かれているため、数値解析への入力値として使用する場合や室内試験結果と比較する場合などには、均質等方を仮定していることを留意しなければならない。

封入空気が存在することによって浸潤が定常状態に達するまでの時間が異なるものと考えられるが、定常状態までの時間は対象地盤の性質にも依存するため、現段階では封入空気の影響は本基準に考慮されていない。今後、封入空気の影響を考察するためにも、本基準に基づいて試験を実施した場合には、対象地盤の状態についても可能な限り詳しい報告を期待するものである。

また、本基準の適用可否を判断するにあたっては、対象とする地盤特性に応じた性能が試験用具にも必要となる。試験用具の性能については、その一部が基準に規定されており、基準としては規定することが難しい内容は、解説でも述べられている。ここでは、試験装置の性能として、試験対象となる地盤の透水性に適した注水能力として必要な条件を以下に述べる。

①定水位浸潤装置の大きさ

②負荷できる浸潤水頭の大きさ（負圧から正圧）

③試験面の大きさや深さ

④試験原理からの制約（解析式の適用条件）

条件②の浸潤水頭が大き過ぎる場合には、流速が速くなることでダルシーの法則から逸脱することもあり得る。そのため、地表面で実施する場合においては、マリOTTサイフォンを利用したり、負荷する浸潤水頭を適用地盤に応じて調整したりする必要がある。また、③の試験面の大きさと深さは、掘削用具の能力や対象地盤の自立する深さによっても影響を受ける。さらに、④試験原理の制約（解析式の適用条件）により、浸潤水頭 h と試験孔の半径 r_0 の比で表されるアスペクト比 (h/r_0) の条件を満たす必要があり、このことは①～③にも影響してくる。この他に、対象地盤の透水性が低い場合には、試験が長時間にわたることもあるため、浸潤水の蒸発や凍結によって適用範囲が変わることも現場の特徴である。まえがきにも示したように、試験装置や方法にも依存するが、 $10^{-4}\text{m/s} \sim 10^{-8}\text{m/s}$ の範囲の現場飽和透水係数がこの方法で測定されている^{例えば 1)}。

3.3 用語及び定義

(1) 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法
現場飽和透水係数を求める試験方法として、表-3.1 に示す方法が文献に示されている。同表の単管浸透法は、ISO/DIS 22282-5 「Infiltrometer test」としても基準化されている方法である。本基準は、これらの試験方法のうち、実用性が高いと判断された方法を、地表面で実施する場合と試験孔で実施する場合に分けて規定したものである。本基準が規定する試験方法と既存の試験方法の対応を表-3.2 に示す。地表面で実施する場合の2種類の方法は、地表面からの透水性を把握することを目的として、主に農学系で実施されてきた方法であり、試験孔で実施する場合の3種類の方法は、主として水平方向の透水性を把握することを目的として、主に工学系で実施されてきた方法である。

(2) 現場飽和状態
現場飽和状態は、間隙中に取り込まれた空気である「封入空気 (entrapped air)」の寄与で完全飽和状態よりも低いと考えられる状態である。現場飽和状態を飽和度で定量的に定義することはできないが、本基準では、試験面から地盤への浸潤流量がおおむね一定になったと判断した時点で、試験面周辺の地盤が現場飽和状態であるとみなしている。なお、本基準では、水圧が負荷される地表面を試験面と呼ぶこととし

表-3.1 現場飽和透水係数の計測方法

表-3.2 本試験方法と対応する既存の試験方法

ており，試験孔で実施する場合には試験孔の表面を試験面と呼ぶこととしている。

(3) **現場飽和透水係数** 現場飽和透水係数は，現場飽和状態における浸潤流量，すなわち定常浸潤流量と試験面形状等に応じた定数を，試験方法ごとに異なる式に与えることによって算定される。現場飽和状態は，封入空気の寄与で完全飽和状態よりも飽和度が低いため，現場飽和透水係数は飽和透水係数よりも小さい²⁾。

なお，亀裂や根成孔隙，土壤生物の孔等のマクロポアは，湛水条件（浸潤水頭が正圧の条件）下では現場飽和透水係数に寄与するが，湛水条件にならない限り通水への寄与は無い。したがって，負圧で浸潤させる方法を用いる場合には，これらを考慮した試験ならびに結果の解釈を行う必要がある。

3.4 試験用具

3.4.1 掘削用具

試験孔で実施する場合には，掘削用具が必要である。

試験孔全体を用いる方法では，地盤に直径 0.3m，深さ 0.3m 程度の試験孔を掘削することが一般的である。掘削用具としては，大小のスコップが併用して用いられる。地盤が硬い場合には，「つるはし」が利用されることもある。「つるはし」とは，硬い土を掘り起こすのに用いる道具であり，鉄製で両端または片方だけを鶴の嘴のような形に作り，柄を付けたものである。また，ダブルスコップも有用である。ダブルスコップとは，地質調査などで小口径(0.1～0.2m)の穴を空けるため，あるいは土壌汚染調査に必要な土壌試料を採取するために用いる工具で，一般的なものは，力点となる柄と，柄を連結し開閉の支点を備えた地面を掘削するビットからなる。ビットは一對のスコップ状の構造になっており，連結した 2 本の柄を開く操作で，ビット先端が閉じる動作をすることにより，地面に穴を掘削する。テコバールは，テコの原理を利用する 0.1～2m 程度の金属製の棒であり，長さが 0.1～0.3m 程度までの短いものは釘抜きとして用いられる。建設現場などでは，1～2m 程度の長尺のものが，地盤に穴を空けたり，テコの原理で石等を掘り出したりするのに用いられる。通称しょうせん(棒)とも呼ばれる。

測定用パイプを用いる方法やパッカーを用いる方法では， ϕ 66mm～ ϕ 116mm 程度，深さ 1m 以上の試験孔を掘削することが

一般的である。深さ 1～2m 程度の試験孔であれば、人力掘削が可能であり、ダブルスコップ、テコバール、ハンドオーガー、電動オーガー等が用いられる。実際には、人力掘削にはかなりの労力を要するため、手軽に試験孔が掘削できる機材の開発が待たれている。深さ 2m 以上の試験孔を掘削する場合には、ボーリングマシンやサウンディングマシンが用いられる。

3.4.2 整形用具

地表面で実施する場合の負圧で浸潤する方法では、給水ディスクと地表面が適切に接していることが重要であり、試験面の整形用具が必要である。

地表面で実施する場合の正圧で浸潤する方法でも、試験面を露出し、可能な限り水平にするとともに試験面の凹凸を平滑にするために整形用具が必要である。ただし、正圧で浸潤する方法を用いて、地表面の植生状態を加味した現場飽和透水係数を求める場合には、試験面の整形は不要である。

試験孔で実施する場合にも、試験孔の掘削の影響で鏡面化や緩みが生じることがあるため、これらを取り除き、試験面を整形するために整形用具が必要である。

基準では、整形用具の具体例を挙げているが、試験の準備について述べる 3.4 で整形用具の使い方と合わせて解説する。

3.4.3 定水位浸潤装置

基準では、定水位浸潤装置には以下の 3 つの機能が必要とされている。

- ・試験面に一定の正圧または負圧を負荷できる機能
- ・給水できる機能
- ・浸潤流量を計測できる機能

マリオットサイフオンは、これら 3 機能を満たす定水位浸潤装置であり、**図 B.2**、**図 B.3**、**図 B.4**、**図 B.6**で例示されている。

マリオットサイフオンの直径は、地盤の透水性によって適切な径が異なる。地盤の透水性が低い場合は、浸潤流量が少ないので、測定精度を良くするために、マリオットサイフオンの直径は 2～4cm 程度の小さい方が良い。一方で地盤の透水性が高い場合は、浸潤流量が多くなるので、マリオットサイフオンの直径は 10～20cm 程度の大きい方が良い。この両方に対応できる装置として、**図-3.1**に示すような二重管構造のもの³⁾もある。

図 B.2に示したマリオットサイフオンは、給水ディスクと一

図-3.1 二重管構造のマリオットサイフオン³⁾

体型のものであり、負圧で浸潤させる方法で用いられる。通常のマリオットサイフオンは、タンクの所定の位置で水圧を大気圧と平衡させるバブリングパイプを使用するが、このマリオットサイフオンではバブリングパイプを圧力調整タンクに接続することによって、水面から圧力調整管下端までの深さで決まる空気圧を負圧として与えることができる。現場で測定中に、空気漏れを最少にしながら圧力調整管を上下に動かすには習熟が必要である。**図 B.2**では、圧力調整管が一本だが、**図-3.2**のように複数の圧力調整管を用いれば、事前に圧力調整管下端の位置を調整し、上に位置する管から順次、上端のバルブを開閉していくことで、測定中スムーズに浸潤水頭を変えることができる。開閉の際は、使用中の圧力調整管のバルブを閉じてから、速やかに、より低い浸潤水頭を与える圧力調整管のバルブを開けるようにする。**図 B.2**にはマリオットサイフオン・ディスク一体型のものを示したが、**図-3.3**のように分離した形式のものもある。

図-3.2 複数圧力調整管の例

図-3.3 マリオットサイフオン・ディスク分離型の例

図 B.4及び**図 B.6**に示したマリオットサイフオンは、上下に蓋をした単体の透明な円筒体(気密水槽)に注水口を設けており、ペット用ドリンカーの仕組みの応用で、注水口が定水位保持管と注水管の両機能を果たす。**図 B.4**では、装置は試験孔内へ直接設置し、試験中は注水口の位置で水位が一定に保たれる。比較的透水性が高い地盤に適用する場合は、試験孔に多量の水が注水されるよう装置に複数個の注水口を設ける。また、比較的透水性が低い地盤で測定する場合、時間短縮のため、装置内に径の小さな管を取り付けた二重管構造とすることにより、高～低透水性地盤を対象に1台で効率良く測定ができる。**図 B.6**の定水位タンクの設置は、送水管に直接取り付ける方法とホースで連結する方法とがあるが、注水時において試験孔内に残存するエアーを確実に除去するためには、送水管に直接取り付ける方法が推奨される。

原位置で何かの原因でマリオットサイフオンの圧力調整が効かなくなると測定不能になるので、事前に、マリオットサイフオンや配管の気密性等を確認しておくことが重要である。

定水位浸潤装置としてマリオットサイフオンを使用しないことも可能であり、**図 B.5**はその例である。**図 B.5**では、水位計によって測定される測定用パイプ内の水位を一定に保つように、

測定用パイプに注水する流量をコンピュータ制御で調整するサーボシステムコントロールを用いる方法を例示した。この方法は水位のわずかな変動によって流量が増減するため、制御装置に組み込むプログラムの性能や水圧計、流量計の精度にシステムの制御能力が依存する。

なお、**図-3.4**に測定管内に定水位を保つためのスリット付き内管を設けて、給水流量と排水流量の差から浸潤流量を測定する方法の模式図を示す。この方法では、地上部の定水位給水タンクから測定用パイプ内に試験水を給水し、定水位を保つためのスリット付き内管内のポンプから余剰水を排水する。給水流量と排水量は電子天秤で測定する。注入流量は給水流量と排水流量の差から求める方法である。この方法は、サーボメータを用いる方法より比較的安価に作成できるメリットがある。

正圧で浸潤させる方法では、浸潤用円筒が必要になる。浸潤用円筒の材質はハンマー等を用いての打設に耐え得る強度を有する鋼製が望ましく、その鋼製厚さは、地表面から貫入設置による地盤の攪乱を最小限にするために、2mm 程度が望ましい。また、定常浸潤流量の計測精度、すなわち得られる現場飽和透水係数の精度を確保するためには、透水性の低い地盤では、半径の大きな浸潤用円筒を用いて試験面の面積を大きくして浸潤流量を増加させ、透水性の高い地盤では、半径の小さい浸潤用円筒を用いて試験面の面積を小さくすることが必要である。

測定用パイプを用いる方法では、定水位浸潤装置の一部として、測定用パイプが必要になる。測定用パイプの管径は試験孔の大きさに合わせる必要があり、通常は $\phi 30\text{mm} \sim \phi 100\text{mm}$ 程度となる。測定用パイプの通水区間部は、水の浸潤の妨げない十分な開口率を有する必要がある。ストレーナーの開口率は現場透水試験法を参考とする。

パッカーを用いる方法では、試験区間を確実に設けるために、パッカーが必要になる。パッカーの素材は、一般にはゴム製である。また、送水管は、試験孔孔径に応じた径のものを用いる。送水管の径は浸潤流量以上の水を通水できるサイズとする。注水管(有孔管)の通水区間部は、試験孔から浸潤流量を満足する十分な開口率を有する必要がある。また、送水管・注水管とパッカー、定水位タンク等の接続部は、水漏れが生じないように、止水テープやOリングなどを用いて確実に連結する必要がある。

図-3.4 スリット付き内管を設置して流量を測定する方法

3.5 試験の準備

3.5.1 地表面で実施する場合

(1) 負圧で浸潤させる方法 負圧で浸潤させる方法では、給水ディスクを介して負の水圧で給水することで亀裂やマクロポアの寄与を排除した現場飽和透水係数を得る。このとき、給水ディスクと地表面が適切に接していることが最も重要である。

このために、まず試験面を平滑にする。炒め物に使うような大型の金属ヘラが便利である(写真-3.1)。試験面の平滑化において、試験面を過度に圧縮することを避ける必要がある。得られる現場飽和透水係数は、乾燥密度の変化に敏感であるため⁴⁾、荷重をかけて平滑にするよりも、適切な整形器具を使用して、表面を丁寧に削って平らにすることがよい。また、試験面が傾くと、表-3.3のように給水ディスクの最高部と最低部の差が1cmを超えるため、浸潤水頭が正確に設定できなくなるとともに、給水ディスクの最低部(浸潤水頭最大の位置)付近から選択的に浸潤するリスクが生じる。したがって、整形作業において、水準器等を用いて測定面の傾斜を測定する必要がある。(図-3.5)。これと似ているが、給水ディスクと試験面が密着するように、透明プラスチック板や定規を試験面に当てて凹凸を確認して、試験面をできる限り平面に整形する(図-3.6)。

次に、試験面に給水ディスクを密着させる。給水ディスクと試験面が部分的な接触に留まる場合には現場飽和透水係数を過大評価するので注意が必要である。試験面と給水ディスクが密着しないとき、あるいはレキが多い土壌のような場合には、含水比数%に湿らせた細砂(豊浦砂程度の粒度)を試験面に薄く載せ、これを平滑にすることで給水ディスクとの密着を改善することができる(図-3.7)。砂の水分の目安は、手で握り取った時に、形状を維持できるか否か程度の水分量である。砂を載せた場合には、砂部分を水が横方向に流れて、結果として地盤に(下方向に)十分に浸潤しないことがある。これを防ぐためには、給水ディスクよりも若干大きなリングを数mm程度試験面に打ち込むと良い(図3-6, 図-3.7)。

水田やため池の底部のように湛水下になる土地の透水性を測定する場合には、あえて亀裂などの影響を評価するためにゼロから1cm程度の正值の浸潤水頭で試験を行うことがある。このとき、原位置の土壌構造の状況によっては、下方ではなく横方

写真-3.1 均ペイ・整形の様子、ならびに金属リングの使用例

表-3.3 ディスクの径と許容する試験面の傾斜(高低差は、給水ディスクの最高部と最低部の標高差)

図-3.5 傾斜の確認

図-3.6 均ペイの確認

図-3.7 微小な凹凸への対応例(湿砂の充填)

向に水が浸潤することがある。これを防ぐために、試験面を平滑にした後、給水ディスクの外径よりも 5mm～1cm 程度大きな径の金属リングを 1cm 程度地表面に挿入し、その中で現場試験を行うことがある(写真-3.1(右))。

なお、ナイロンメッシュに皺があると、そこから気泡が侵入して設定した浸潤水頭を維持できなくなるので、ナイロンメッシュの貼り方には細心の注意を払う必要がある。現地に赴く前に、実験室内で気泡の侵入の有無を確認することが望ましい。また、メッシュの網目が乱れるとやはり空気漏れが生じるので、現場で試験をする際には、木板やプラスチック板などメッシュを痛めない平らなものの上にディスクを置く。手際よくメッシュを張ることが難しい場合は、予備のために予めナイロンメッシュを張った予備のディスクを持参するのも良い。

試験開始前に、**図 B.2**に示した圧力調整管から主タンクに繋がるパイプならびに圧力調整管内が空気で満たされていること、逆に主タンクから給水ディスクへのパイプが水で満たされていることを確認する。排水・排気は以下の順で行う。

- ①主タンクから給水ディスクに繋がるパイプ内の気泡を取り除く。
- ②圧力調整管の位置を上げて、給水ディスクから正圧の水を浸出するようにして圧力調整管から主タンクに繋がるパイプの排水を行う。
- ③圧力調整管の位置を所定の位置に戻したのち、管内部の水を圧力調整タンクの排水バルブをわずかに開けることで排水する。

(2) 地表面で実施する場合の正圧で浸潤させる方法 浸潤用円筒を打設する場合には、原試験面を露出・整形し、可能な限り水平にすると共に、試験面の凹凸を平滑にする。ただし、地表面の植生状態を加味した現場飽和透水係数を測定する場合には、試験面の露出・整形は不要である。

正圧で浸潤させる方法では、次の条件を満たすことが必要である。

- ・ 浸潤用円筒の半径 r_0 : $r_0=5\text{cm}\sim 10\text{cm}$
- ・ 浸潤用円筒の貫入深さ d : $d=3\text{cm}\sim 5\text{cm}$
- ・ 半径に対する貫入深さの比 : $0.3\leq d/r_0\leq 1.0$
- ・ 浸潤用円筒内の浸潤水頭 h : $h=5\text{cm}\sim 25\text{cm}$

これらは、現場飽和透水係数を求める式が誘導されたときの試験条件である⁵⁾。

また、透水性の低い地盤では、試験時間を短縮するために、大きな浸潤水頭を与え、透水性の高い地盤では、過大な浸潤流速が発生しないように、小さい浸潤水頭を与えるなど、試験条件の選択に配慮が必要である。そこで、地盤の現場飽和透水係数に応じた (a, H) の設定値として、以下のような組合せ例が提案されている⁶⁾。

$K_{fs}=10^{-2}\text{cm/s}$: $r_0=5\text{cm}$ 程度, $h=5\text{cm}$ 程度

$K_{fs}=10^{-3}\text{cm/s}$: $r_0=5\sim 10\text{cm}$ 程度, $h=5\sim 10\text{cm}$ 程度

$K_{fs}=10^{-4}\text{cm/s}$: $r_0=10\text{cm}$ 程度, $h=10\sim 20\text{cm}$ 程度

地表面に打設した浸潤用円筒内に湛水させて正圧（定水位）で浸潤させる方法が一般的であるが、試験面が固結している場合あるいは浸潤用円筒を打設することが困難な場合には、 **B.3** に示すように、小口径のオーガー孔を掘削して湛水してもよい。掘削したオーガー孔の壁面の乱れや、粘性土地盤では締固めによる鏡面化、あるいは試験中の壁面の目詰まりや崩れが、浸潤挙動に重要な影響を持つことが指摘されており、オーガー孔の掘削およびオーガー孔内への水の供給は慎重に行う必要がある。

3.5.2 試験孔で実施する場合

(1) 試験孔全体を用いる方法 試験孔の大きさは、直径 0.3m, 深さ 0.3m 程度の円筒状が標準であるが、現場飽和透水係数を算出するにあたって、アスペクト比 (h/r_0) に関わる制約条件に留意する必要がある。

試験面の整形は、原則として、自然に近い状態に仕上げるのが望ましい。鏡面化については、その度合いが軽微である場合は、雑巾等で叩くように拭き取るか鋼製ブラシ等で取り除く必要がある。鋼製ブラシで整形することにより、逆に試験面が乱れるような場合は、鏡面化している部分を噴霧器等の水圧で少しずつ剥ぎ取り、雑巾で取り除く方法がある。また、試験面を乾燥させた後に鋼製ブラシ等で取り除く方法もある。

試験面を整形した後に、試験孔の半径 r_0 、地表面からの深さ z を測定する。試験孔には多少の凹凸があるため、これらの値は、位置を変えて複数回測定して平均値を求めることが望ましい。

試験孔への注水によって孔壁が崩れる恐れがある場合には、

試験孔内に碎石を充填する。使用する碎石はあらかじめ水洗いしておき、付着した粘土分によって試験中に目詰まりが発生することを防ぐ必要がある。碎石の代わりに軽石のような多孔質な石を使用すると、試験孔内の水を吸水するため、浸潤流量が小さい場合は、試験結果に影響を及ぼす。したがって、軽石を用いる場合は、試験前に十分に吸水させたものを使用する必要があるが、透水性が低い地盤では、できるだけ使用しないことが望ましい。河川やため池の堤体で試験を実施する場合には、試験後に碎石を一粒残らず回収する必要がある。そのため、碎石を市販の洗濯ネット等に入れて試験孔に充填すれば、原形復旧が容易となる。この時、ネットの網目が小さいと目詰まりの恐れがあるため、網目が大きいものを使用する。

試験孔への予備注水時に、勢い良く試験孔に注水すると地盤中の封入空気が抜け難くなるため、あらかじめじょうろなどを用いて試験面に少しずつ水を散布し、試験面付近を現場飽和状態に近づけておくことが望ましい。この時、試験面の細粒分が流れ落ちた濁水は雑巾などで取り除く必要がある。

(2) 測定用パイプを用いる方法 測定孔の掘削は、ボーリングやサウンディングを用いて実施する。測定用パイプの外径を考慮して、測定用パイプと孔壁が密着する程度の掘削径とする必要がある。

試験孔を掘削すると、孔壁が皮膜によって鏡面化する。この皮膜は、浸潤流量を減少させるため、得られる現場飽和透水係数は実際よりも小さくなる。したがって、皮膜を除去するため、孔壁を整形する必要がある。測定用パイプを用いる方法では、測定管内に高圧水を注入することで、孔壁の皮膜を除去する。除去された皮膜は、通水区間に設けたストレーナーを通して、測定管内に溜まるため、測定管内に溜まった土砂を取り除く。試験孔の洗浄が不十分であると透水係数が過小評価される。測定用パイプ内に水を注水することにより十分に洗浄を行うことが必要である。

測定用パイプを用いる方法の欠点は、この孔壁の皮膜除去にある。測定用パイプを用いる方法では、測定用パイプと孔壁が密着した状態であるため、皮膜を完全に除去することはできない。また、測定用パイプを設置する前に皮膜を除去しても、測定用パイプを挿入することによって再び皮膜が形成される可能

写真-3.2 ワイヤー
ブラシによる試験面
の整形⁷⁾

性がある。高圧水による洗浄も行い過ぎると、試験孔周辺の地盤を大きく乱してしまうことになる。例えば、試験孔周辺の地盤を緩めて、得られる現場飽和透水係数が実際よりも大きくなることが懸念される。

(3) **パッカーを用いる方法** 試験面には、掘削の影響で鏡面化や緩みが生じることがあることから、これらを取り除き、試験面を整形する必要がある。試験面の整形は、原則として、自然に近い状態に仕上げるのが望ましい。鏡面化や緩みが生じている箇所は、ワイヤーブラシ等(写真-3.2)で整形する必要がある。また、掘削や整形で生じた掘り屑や整形土砂は吸引器等(写真-3.3)を用いて除去する必要がある。なお、整形前と整形後の試験面の状況は、市販されている小型カメラなどで確認することが望ましい(写真-3.4～写真-3.6)。

試験面の整形後に、試験孔の半径 r_0 、地表面からの深さ z を測定する。 z の値は、浸潤水頭(試験孔内水深) h を正確に決めるために必要な値であるため、精度良く測定することが重要である。また、パッカーの設置深度を把握するため、注水管、パッカー、送水管、定水位タンクを連結させた時の全長と設置時の残尺を測定しておく。

次に、注水管、パッカー、送水管、定水位タンクを連結させて試験孔内に挿入し、パッカーを空気圧、ガス（一般には窒素ガス）圧等で膨張させる。パッカーの膨張圧力は、試験深度が2～3m程度であれば300kPa程度で良いが、試験深度が深い場合には相当する水压以上が目安となる。パッカーで試験区間が確実に止水できていることを確認するために、パッカー上部の水位変化を水位計等で確認することが望ましい。

パッカー以深の試験区間については、試験区間の長さ L と試験区間の孔径 r_0 の比 L/r_0 を10以上とし、試験終了時まで試験区間の形状が一定に保たれるよう、ストレーナー管等で保護することが望ましい。

試験の準備の最後に、**図 B.6** に示した定水位タンク内に注水する。この時、定水位タンクは、安定した台の上に水平に設置する。定水位タンク内まで水が満たされた場合でも、試験孔内にはエアーが残っている可能性があるため、エアーが取り除かれるまで注水する。エアーは細い管などを挿入することにより抜け易くなる。

写真-3.4 小型カメラによる試験面の状態確認⁷⁾

写真-3.5 試験孔掘削直後の状態⁷⁾ (左：側面，右：孔底面)

写真-3.6 試験孔整形後の状態⁷⁾ (左：側面，右：孔底面)

(4) **その他の注意点** 本基準が対象としている地下水面よりも上の地盤の透水試験では、初期飽和度（浸潤前の飽和度）の違いによって得られる現場飽和透水係数が異なることが報告されている。室内で模擬地盤を用いて、初期飽和度が異なる条件下で定水位透水試験を実施した場合、得られた透水係数は 1 オーダー異なることが計測されている⁸⁾。**図-3.8**はこのときの流入流量の経時変化である。この原因は、地盤内にトラップされて抜け出ない残留空気量が初期飽和度によって異なるためと考えられている。

図-3.8 初期条件が異なる場合の流入量 Q の経時変化
(西垣ら⁸⁾に加筆修正)

「土の三軸試験」では、供試体の飽和度を高める方法として、間隙空気を二酸化炭素に置き換える方法がある⁹⁾。この方法は二酸化炭素が水に溶けやすい性質を活用した方法である。これを応用して、試験孔内に二酸化炭素を注入して、試験対象地盤の間隙空気の二酸化炭素への置換が試みられている。**図-3.9**は、二酸化炭素を注入し、透水試験を実施した一例である¹⁰⁾。この試験結果では、透水試験を実施する前に二酸化炭素を 20 分前後注入すると、同じ場所で何回透水試験を実施しても、ほぼ同じ現場飽和透水係数が得られている。

図-3.9 二酸化炭素を用いたまさ土 ($n=0.38$) での初期飽和度 (S_{r0}) の差による透水係数 (k)、浸潤後飽和度 (S_{rt}) の変動 (西垣ら¹⁰⁾)

現時点では、二酸化炭素の注入圧力、注入時間、対象地盤の透水係数の適切な関係が把握されていないことから、今後の研究課題の 1 つである。

3.5 試験方法

試験は、定水位浸潤装置を用いて、試験面に一定の浸潤水頭 $h(m)$ を与えることによって開始する。このとき、定水位浸潤装置は、水準器を用いて水平に設置することが重要である。また、風によって定水位浸潤装置が倒れることがあるので、ワイヤーなどで固定しておくことが望ましい。

試験孔で実施する場合には、浸潤開始直後は浸潤流量が大きいため、試験を開始する前に、定水位浸潤装置を用いることなくバケツやポリタンクなどを用いて試験孔に注水することがある。これを予備注水と呼ぶ。予備注水は、試験孔内に濁水が発生しないように慎重に行う。濁水中の細粒分が試験面に付着して浸潤を妨げる恐れがあるため、濁水が発生した場合には試験孔からの濁水の汲上げと試験孔への注水を 2～3 回程度繰り返して、濁水のある程度取り除く。

予備注水を行った場合には、浸潤流量が概ね安定したと判断

した段階で、定水位浸潤装置を用いて試験孔内の水位を一定にして試験を開始する。なお、**図 B.4**や**図 B.6**に示した方法では、予備注水で生じた濁水がほぼ取り除かれた後、空気流入口&注水口に栓をした定水位浸潤装置を試験孔に設置した状態で、予備注水を継続する。そのまま試験孔内水位を空気流入口&注水口よりも高い状態に維持して栓を抜き試験を開始する。透水性が高い地盤では、試験孔内水面の低下が速いため、予備注水後に定水位浸潤装置を設置しても、再度予備注水が必要になることがあるための対策である。

正圧で浸潤させる方法と試験孔で実施する場合には、現場飽和透水係数を求めるために必要な浸潤水頭は、試験孔内の水位を一定に保った後に測定する。**図 B.4**では、地表面から孔内水面までの深さ h_1 を測定して、試験孔内の水深 $h(=z-h_1)$ を求め、浸潤水頭とする。また、**図 B.6**では、地表面から定水位タンク内水面までの高さ h_1 を測定して、浸潤水頭 $h(=z+h_1)$ を求める。この値は現場飽和透水係数の値に大きく影響するため、メジャー一等を用いて精度良く測定する。

浸潤流量は、**図 B.5**のように流量計で測定することもあるが、マリオットサイフォンを用いる場合には、水タンクの重量を電子天秤で測定する方法が取られることもあるが、水タンク内の水位を読み取る方法が一般的である。この場合、所定の時間間隔毎に定水位浸潤装置内の水位もしくは質量を測定する。

マリオットサイフォンの原理を**図 B.4**を用いて説明すると以下のようなになる。

- ・地盤への浸潤によって試験孔内水面が低下し、空気流入口&注水口よりも下がると、マリオットサイフォン内の気相は大気圧よりも低いので、マリオットサイフォン内に空気(気泡)が入る。
- ・流入した空気によってマリオットサイフォン内の気相圧力が上昇し、マリオットサイフォン内の水を空気流入口&注水口から押し出すことによって試験孔内水面が上昇する。
- ・試験孔内水面が空気流入口&注水口よりも上がると、マリオットサイフォン内へ空気が供給されなくなるためマリオットサイフォンからの水の流出が停止する。

このため、マリオットサイフォン内の水位は、連続的に低下せず、空気流入口&注水口から空気が流入しているときに、間

図-3.11 マリオットサイフォン内水位低下状況とデータ取得のタイミング

欠的に低下する。**図-3.10** はこれを概念的に描いた図であり、経験的には、表面張力の影響もあり水面が 2mm 程度低下すると注水が停止する。浸潤流量は、**図-3.11** に示すように、マリOTTサイフォンに空気が流入する間隔（図では、空気流入が停止する間隔）とマリOTTサイフォン内の水位低下量を計測すれば算出できる。

しかし、浸潤流量が小さい場合、すなわち空気が流入する間隔が長い場合には、特に、浸潤流量の定常状態の判定に困難が生じる。定常状態を判定するためには、浸潤流量を少なくとも 3 回は測定する必要がある。仮に、現場飽和透水係数が $k=1.0 \times 10^{-8}$ m/s、浸潤水頭 h が 0.25m、試験孔の半径 r_0 が 0.15m ($A=0.071\text{m}^2$) である場合を想定し、試験孔内水面が 2mm 低下する時間を試算すると 430 分(7 時間 10 分)になる。すなわち、浸潤流量を 3 点測定するためには 21 時間以上の試験時間を要することになる。

このような、透水性が低い地盤を対象にマリOTTタンクを適用する場合には、試験孔内水面の面積を減らす対策が有効である。**図 B.4** に示すように、試験孔内にマリOTTサイフォンを設置する方法や試験孔内水面部分に水位低下促進具を設置する方法が提案されている³⁾。水位低下促進具の例を**写真-3.7**と**図-3.12**に例示する。**写真-3.7**では、マリOTTサイフォンの周囲に自転車のゴムチューブを巻いている。このように試験孔内水面の面積を減らすことによって、地盤への浸潤流量が同じであっても、試験孔内水面の低下速度を大きくすることができるため、マリOTTタンクへの空気の流入間隔を短くするとともに、浸潤流量の計測間隔も短くすることができる。

図 B.4を用いて、水位低下促進具の効果確認を行った室内実験結果³⁾を**図-3.13**に示す。現場飽和透水係数が $k=1.0 \times 10^{-7}$ m/s 程度の条件では、水位低下促進具が無い場合に 15 分で 3 個のデータ、水位低下促進具有りの場合に 15 分で 29 個のデータが取得されている。水位低下促進具を設置することで、同じ時間でより多くのデータが取得できることが理解できるため、浸潤流量が小さい場合の定常浸潤流量の判断には威力を発揮する。

試験は、浸潤流量が定常状態になるまで実施することが必要である。一般には、浸潤流量の経時的な変化を**図-3.14**のようにプロットし、浸潤流量がほぼ一定になったと判断できる時点

写真-3.7 水位低下促進具設置例

図-3.12 計測時間短縮のための方法

図-3.13 水位低下促進具効果確認のための室内実験結果²⁾

図-3.14 注水流量の経時変化¹⁾

を定常状態とみなして、そのときの浸潤流量を定常浸潤流量 Q_s とする¹¹⁾。

マリOTTサイフォンのように、浸潤流量をタンクの水位から算出する場合には、実際に現場で確認できるのは、経過時間 (t) -マリOTTサイフォン目盛 (s) の関係である。ただし、浸潤流量が小さい場合、この図によって浸潤流量が概ね一定になっていることを見極めることは難しい。

試験時間の影響を確認するために行った試験結果を図-3.15 (試験①)と図-3.16 (試験②)に示す。試験②は、試験①の終了後に、同じ試験孔を水で満たした状態で40時間維持した後にを行った試験である。図-3.15と図-3.16は、それぞれの試験時に浸潤流量が概ね定常状態に達したと判断された時の結果である。両試験とも経過時間 (t) -マリOTTサイフォン目盛 (s) の推移は一定であるように見えるが、経過時間 (t) -浸潤流量 (Q) の推移は、試験①の方が僅かながら減少傾向にあるように見て取れる。この例で場合、浸潤流量より求めた透水係数は、試験①が $k=3.5 \times 10^{-7}$ m/s、試験②が $k=3.0 \times 10^{-7}$ m/s であった。経過時間 (t) -浸潤流量 (Q) の推移を確認し、明らかに一定傾向が認められなければ再試験を実施するなどの対応が望まれる。なお、再試験をする時、試験面に細粒分が付着している場合は、それを取り除いた後に試験を行う必要がある。

試験を開始した後、定常浸潤流量 Q_s に達する時間は、透水性が高い地盤の場合は比較的早く、透水性が低い地盤の場合は遅くなる。

例えば、表-3.4と図-3.17のFEM解析の例では、豊浦砂のように現場飽和透水係数 (2.1×10^{-4} m/s) が大きい場合には、約1時間で浸潤流量がほぼ一定値に達する(図-3.18)。一方、シラスのように現場飽和透水係数 (2.3×10^{-6} m/s) が小さい場合には、72時間注水を継続しても浸潤流量は低下し続ける。シラスの場合、試験開始から24時間時点の浸潤流量と72時間時点での浸潤流量から算定した現場飽和透水係数は、それぞれ設定値の1.46倍と1.39倍であった。同様の考察は、同じ原理の試験法であるJGS1316に詳しく述べられている¹¹⁾。

透水性の低い地盤を対象に長時間(数日から数週間程度)の試験を行う場合には、給水タンク内の水位が気温や日射、蒸発などによって変動し、正確な浸潤流量の測定が困難になる可能

図-3.15 試験時間の影響確認試験①結果
(試験②と比較)

図-3.16 試験時間の影響確認試験②結果
(試験①と比較)
※試験②は試験①の
40時間後に実施

表-3.4 解析に用いた
土試料の透水定数

図-3.17 解析モデルの
概要

図-3.18 各土質の経過
時間と流入流量の関
係

性があるため、これらの防止策が必要である。

負圧で浸潤させる方法では、湛水を想定しないような地点の場合、負圧で 3 段階または、それ以上が望ましい。湛水を考慮する場合は、正圧（1～2cm 程度の水頭）と 2 段階またはそれ以上の負圧で測定を行う。各段階で定常浸潤流量が求められれば、次の浸潤水頭に切り替える。

試験後には、試験孔全体を用いる方法では、試験後の試験孔形状についても確認を行い、試験区間の状態が試験前と試験後で大きく変化していないことを確かめる。パッカーを用いる方法では、試験終了後に送水管とパッカーを回収し、パッカーが湿っている位置を把握し、詳細な試験区間を特定する。また、試験後の試験孔形状を確認し、試験区間の状態が試験前と試験後で大きく変化していないことを確かめる。

3.6 結果の整理

3.6.1 地表面で実施する場合

(1) 負圧で浸潤させる方法 試験で得られた給水時間ー積算浸潤流量図に基づいて、各浸潤水頭に対応する定常浸潤流量を求める。もしくは、各浸潤水頭に対応する最後の 3 データを直線回帰した傾きを浸潤水頭(h_i)に対応した定常浸潤流量(Q_i)とする(図-3.19)。このデータを使って図 B.7 のような $h\text{-}\log_e(Q)$ 図を描いて、現場飽和透水係数 (k_{fs}) を求める。図 B.7 の切片は、浸潤水頭=0 cm のときの測定値または、正と負の二つの浸潤水頭による測定結果の内挿によって求めれば良いように思われるかもしれない。しかし、この場合、粗大孔隙やき裂の影響をうける可能性がある。これを除外するため、複数の負値の浸潤水頭で測定した結果を外挿した切片を用いて現場飽和透水係数を求める(図-3.20)。

測定した 3 点もしくはそれ以上を片対数グラフ上で直線回帰することとしているが、地盤によっては、浸潤水頭の高い方 2 点の傾きと、それ以外の測定点を対象とした回帰直線の傾きが大きく異なることがある。この場合は、現場飽和透水係数を求めるのは、浸潤水頭の高い方から 2 もしくは 3 点を用いる。

現場飽和透水係数の算定式は、Wooding¹²⁾を元になっている。この方法は、単一の測定装置で測定が可能であるとともに、関数電卓もしくは表計算ソフトがあれば現場飽和透水係数の算定が可能な方法であるが、同じデータを用いて、代数的に透水係数

図-3.20 $h\text{-}\log Q$ の
例

を得るもの¹³⁾や、複数の給水ディスクを用いた測定手法^{14),15)}、リチャーズ式を用いた逆解析を適用する者¹⁶⁾等もある。これらについては、不飽和地盤の挙動と評価¹⁷⁾に紹介されている。

(2) 正圧で浸潤させる方法 Reynolds and Elrick⁵⁾は、試験面からの浸透流は、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次元の（球根状）に広がっていくことを考慮し、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次元の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} を算定する式を次のように誘導している。

$$K_{fs} = \frac{\alpha G Q_s}{a \alpha H + a + G \alpha \pi^2} \quad (3.6.1)$$

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad (3.6.2)$$

ここに、 a は浸潤用円筒の半径、 H は浸潤水頭、 d は浸潤用円筒の貫入深さ、 Q_s は定常浸透流量、 α は土の種類に応じて設定される土壌パラメータ、 G は浸潤用円筒の半径と貫入深さから算定される形状係数であり、 $K_{fs}=10^{-2}\text{cm/s} \sim 10^{-7}\text{cm/s}$ 、 $H=5\text{cm} \sim 25\text{cm}$ 、 $a=5\text{cm} \sim 10\text{cm}$ 、 $d=3\text{cm} \sim 5\text{cm}$ 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⁵⁾。

図-3.21 に示すように、浸潤用円筒から地盤への浸潤流量の経時変化を計測して定常浸透流量 Q_s を求め、上述の式を用いて現場飽和透水係数を算出する。

森井らは、上式によって現場飽和透水係数を算出する原位置透水試験方法であるプレッシャーインフィルトロメータ法について、その測定理論に関する実験および数値計算による検討を行い¹⁸⁾、原位置透水試験の測定精度についても検討を行っている¹⁹⁾。その結果、細粒分をあまり含まない砂（砂丘砂）の α は 0.06cm^{-1} 程度であること、現場飽和透水係数が 10^{-2}cm/s から 10^{-3}cm/s 程度の砂地盤においては、地表面から $15\text{cm} \sim 25\text{cm}$ 程度の領域の現場飽和透水係数を短時間で精度良く測定できることを示している。

本基準では、正圧で浸潤させる方法として、オーガー孔での実施も含めている。この場合、半径 a のオーガー孔内に一定の水頭 H を与え、孔内の側壁と孔底からの浸潤流量を測定する。時間とともに浸潤流量が一定になれば、これを定常浸潤流量 Q_s 、

図-3.21 浸潤用円筒から地盤内への浸透流量の経時変化例

とみなし、次式により K_{fs} を算出する^{5), 20)}こととしている。

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q_s}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + (2\pi H/\alpha^*)} \quad (3.6.3)$$

ここで、 C はオーガー孔の壁面と底面からの浸潤を考慮するための形状係数である。この関数の形状を特定する理論的な背景はないが、たとえば、次の 4 次式を用いれば、適合度の高い回帰式を得ることが示されている²¹⁾。

$$C = b_0 + b_1 \cdot \sqrt{H/a} + b_2 \cdot (\sqrt{H/a})^2 + b_3 \cdot (\sqrt{H/a})^3 + b_4 \cdot (\sqrt{H/a})^4 \quad (3.6.4)$$

ここで、パラメータ $b_0 \sim b_4$ は、土の種類に応じて表 B. 2 の値が提案されている。また、 α は式(3.6.1)と同様に、土の種類に応じて設定される土壌パラメータである。これは、土の不飽和透水係数 $K(h)$ を Gardner²²⁾ が経験的に提案した指数関数で表せると仮定することにより誘導されたパラメータであり、試験者が土の組織や構造にもとづいて決定する必要がある。その選択肢としては、表 B. 1 に示した値が推奨されている⁵⁾。表 B. 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。

土の不飽和透水係数が指数関数で表せない場合の α の決定方法について、森井ら²³⁾ は次式(3.6.5)を用いて $K(h)$ を直接積分することにより、積分的に等価な α を算定する方法を提案している。そして、公表されている土の不飽和浸透特性値の分析結果より、 α は表 B. 1 に示す推奨値よりもやや小さい値になることを示し、粘土やロームでは $0.02 \sim 0.05 \text{ cm}^{-1}$ 程度、砂では $0.06 \sim 0.08 \text{ cm}^{-1}$ 程度であることを示している。

$$\alpha^* = \frac{1}{\int_{h_0}^0 (K(h)/K_{fs}) dh} \quad (3.6.5)$$

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。

3.6.2 試験孔で実施する場合

(1) 試験孔全体を用いる場合および測定用パイプを用いる方法
試験孔全体を用いる方法および測定用パイプを用いる方法による現場飽和透水係数の算定式(附属書 A の A.3)は図-3.22

図-3.22 点源注水試験¹¹⁾

に示す境界条件の浸潤に対して，誘導されている。すなわち，試験孔からの浸潤が，中心軸上の点源から放射状であり，かつ，点源の強さが水深に比例すると仮定する。**図-3.22** の $z = \zeta$ ， $x = 0$ に点源 Δq を考える。ここで， Δq は，孔内の水深に比例するものと考えると，次のように表せる。

$$\frac{\Delta q}{Q} = \frac{(h - \zeta) \Delta \zeta}{h^2 / 2} \quad (3.6.6)$$

ここに，

Q :全注水流量(m^3/s)

h :孔内の水深(m)

ζ ， $\Delta \zeta$:浸潤域の高さ(m)，浸潤域の増加高さ(m)

この点源 Δq によって点(x, z)に生じる水頭増加 ΔH は，Darcy(ダルシー)の法則に従うと次式になる。

$$\Delta q = k(\Delta H/L) \cdot 4\pi L^2 \quad (3.6.7)$$

ここで， L は点源から点(x, z)までの距離であり，

$$L = \{x^2 + (z - \zeta)^2\}^{1/2} \quad (3.6.8)$$

したがって，式(3.6.6)，(3.6.7)，(3.6.8)より， ΔH について整理すると，

$$\Delta H = \frac{Q(h - \zeta) \Delta \zeta}{2\pi k h^2 \{x^2 + (z - \zeta)^2\}^{1/2}} \quad (3.6.9)$$

この式(3.6.9)を試験孔内の水深で積分($\zeta = 0 \sim h$)すると

$$\Delta H = \frac{Q}{2\pi k h^2} \left[(h - z) \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{h - z}{x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{-z}{x} \right) \right\} - \{x^2 + (h - z)^2\}^{1/2} + \{x^2 + z^2\}^{1/2} \right] \quad (3.6.10)$$

ここで， $z = 0$ ， $x = r_0$ で $\Delta H = h$ であるため，式(3.6.10)は以下のようになる。

$$h = \frac{Q}{2\pi k h^2} \left\{ h \sinh^{-1} \left(\frac{h}{r_0} \right) - (r_0^2 + h^2)^{1/2} + r_0 \right\} \quad (3.6.11)$$

これより，透水係数は次式により求められる。

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{h}{r_0} \right) - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} + \frac{r_0}{h} \right] \quad (3.6.12)$$

$\sinh^{-1}$ は逆双曲線で，次式で表せる。

$$\sinh^{-1} x = \log_e \{x + (x^2 + 1)^{1/2}\} \quad (3.6.13)$$

したがって、式(3.6.12)は以下のように附属書 A の A.3 と同じ式で表すことができる。

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\log_e \left[\frac{h}{r_0} + \left\{ \left(\frac{h}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{r_0}{h} \right] \quad (3.6.14)$$

この式は、地下水面が孔底よりも十分に深い条件 (図-3.23 の (a)を参照) に基づいて導かれている。米国内務省開拓局アースマニュアル²⁴⁾の E-19 法(ピット法)は、地下水面が孔底に近い場合と地下水面を孔底より高い場合の現場飽和透水係数の算定式として、次のような経験式を示している (図-3.23 参照)。

地下水面が孔底に近い場合 ($3h \geq T_u \geq h$)

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\log_e(h/r_0)}{\{1/6 + 1/3(h/T_u)^{-1}\}} \quad (3.6.15)$$

地下水面が孔底より高い場合 ($h > T_u$)

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\log_e(h/r_0)}{\{(h/T_u)^{-1} - 1/2(h/T_u)^{-2}\}} \quad (3.6.16)$$

ここに、 T_u は図-3.23 に示されているように、試験中の試験孔内水面から地下水面までの深さである。試験孔周辺の地盤で、地下水面の深さを把握することは現実には簡単ではないため、基準では「地下水面が孔底よりも十分に深い場合」の現場飽和透水係数の算定式のみを記載したが、地下水面の深さが把握されている場合には、式(3.6.15)と式(3.6.16)を含めて最も適切な式を用いることが望ましい。

測定用パイプを用いる方法の場合も、現場飽和透水係数の算定式は、試験孔全体を用いる方法と同じである。しかし、測定用パイプの底面は閉塞されていることが一般的であり、この場合には、底面からの浸透がないこととなるため現場飽和透水係数算定式とは条件が異なる。それでも、浸潤水頭 h と測定用パイプの半径 r_0 のアスペクト比 (h/r_0) が十分に大きい場合には、試験孔底面からの浸潤の影響は小さい。一例として、アスペクト比を $h/r_0=20$ ($r_0=2.5\text{cm}$, $h=50\text{cm}$) とした有限要素法による解析結果を図-3.24 に示す。底面が透水条件の定常浸潤流量と底面が不透水条件の定常浸潤流量の相違はわずかであることが分かる。

(2)パッカーを用いる方法

パッカーを用いる方法による現場飽和透水係数の算定式 (附

図-3.23 試験孔と地下水位の関係(種々の境界条件)¹¹⁾

図-3.24 FEM 解析による底面の透水条件の違いによる流量の経時変化

図-3.25 点源注水試験(パッカーを用いる試験)

属書 A の A.3) は、**図-3.25** に示す境界条件(孔内水深 h ，試験区間 l)に対して，以下の要領で誘導することができ，既に文献²⁵⁾などで定式化されている。

まず，試験孔からの浸透が，中心軸上の点源から放射状であり，かつ，点源の強さが水深に比例すると仮定する。**図-3.25** の $z = \zeta$ ， $x = 0$ に点源 Δq を考えると， Δq は，孔内の水深($h - \zeta$)に比例することから，試験区間 l からの全注水量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ は，次のように表される。

$$Q = \int_0^l \Delta q d\zeta \quad (3.6.17)$$

ここに，**図-3.25** $\Delta q = a(h - \zeta) \Delta \zeta$ (a : 比例定数)であるから，

$$Q = \int_0^l a(h - \zeta) d\zeta = a \left(hl - \frac{1}{2} l^2 \right) \quad (3.6.18)$$

したがって，

$$\frac{\Delta q}{Q} = \frac{(h - \zeta) \Delta \zeta}{hl - \frac{1}{2} l^2} \quad (3.6.19)$$

次に，この点源 Δq によって点(x, z)に生じる水頭増加 ΔH は，Darcy(ダルシー)の法則に従うと次式になる。

$$\Delta q = k \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot 4\pi L^2 = 4\pi k L \Delta H \quad (3.6.20)$$

ここで， L は点源から点(x, z)までの距離であり，

$$L = \{x^2 + (z - \zeta)^2\}^{1/2} \quad (3.6.21)$$

したがって，式(3.6.19)，式(3.6.20)，式(3.6.21)より， ΔH について整理すると，

$$\Delta H = \frac{1}{4\pi k L} \cdot \frac{Q(h - \zeta) \Delta \zeta}{hl - \frac{1}{2} l^2} = \frac{Q}{4\pi k \left(hl - \frac{1}{2} l^2 \right)} \cdot \frac{(h - \zeta) \Delta \zeta}{\{x^2 + (z - \zeta)^2\}^{1/2}} \quad (3.6.22)$$

この式(3.6.22)を試験区間で積分($\zeta = 0 \sim l$)すると，

$$\Delta H = \frac{Q}{4\pi k \left(hl - \frac{1}{2} l^2 \right)} \left[(h - z) \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{l - z}{x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{-z}{x} \right) \right\} - \{x^2 + (z - l)^2\}^{1/2} + \{x^2 + z^2\}^{1/2} \right] \quad (3.6.23)$$

ここで， $z = 0$ ， $x = r_0$ で $\Delta H = h$ であるため，式(3.6.23)は以下のようになる。

$$h = \frac{Q}{4\pi k \left(hl - \frac{1}{2} l^2 \right)} \left\{ h \sinh^{-1} \left(\frac{l}{r_0} \right) - (r_0^2 + l^2)^{1/2} + r_0 \right\} \quad (3.6.24)$$

これより、透水係数は次式により求められる。

$$k = \frac{Q}{4\pi h \left(hl - \frac{1}{2} l^2 \right)} \left\{ h \sinh^{-1} \left(\frac{l}{r_0} \right) - (r_0^2 + l^2)^{1/2} + r_0 \right\} \quad (3.6.25)$$

$\sinh^{-1}$ は逆双曲線で、次式で表せる。

$$\sinh^{-1} x = \log_e \{x + (x^2 + 1)^{1/2}\} \quad (3.6.26)$$

したがって、式(3.6.22)は、

$$k = \frac{Q}{4\pi (hl - l^2/2)} \left[\log_e \left[\frac{l}{r_0} + \left\{ \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right\}^{1/2} + \left(\frac{r_0}{h} \right) \right] \quad (3.6.27)$$

この式も、式(3.6.14)と同様に地下水面が孔底よりも十分に深い条件（**図-3.26**の(a)を参照）に基づいて導かれている。パッカーを用いる方法においても、地下水面が孔底に近い場合と地下水面を孔底より高い場合の現場飽和透水係数の算定式も、式(3.6.28)と式(3.6.29)に示すように提案されている²⁶⁾。

$$k = Q \frac{C_{w2}}{C_{w1}} C_{p1} \quad (3.6.28)$$

$$k = Q \frac{C_{w3}}{C_{w1}} C_{p1} \quad (3.6.29)$$

これらは、式(3.6.14)、式(3.6.15)、式(3.6.16)、式(3.6.27)のいずれも、現場飽和透水係数は、定常浸潤流量と形状関数の積で表現されていることに着目した式である。試験孔周辺の地盤で、地下水面の深さを把握することは現実には簡単ではないため、基準では式(3.6.27)で示される「地下水面が孔底よりも十分に深い場合」の現場飽和透水係数の算定式のみを記載したが、地下水面の深さが把握されている場合には、式(3.6.28)と式(3.6.29)を含めて最も適切な式を用いることが望ましい。

(3) 現場飽和透水係数を算定する式の妥当性検討 試験孔で実施する場合の現場飽和透水係数の算定式を整理すると**表-3.5**のようになる。これらの式の妥当性を検証するために、ま

図-3.26 パッカーを用いる試験における試験孔と地下水位の関係（種々の境界条件）

表-3.5 地下水面深さに応じた現場飽和透水係数の使い分け

さ土の不飽和浸透特性（ $\theta - kr$, $\theta - \phi$ ）の関係を用いて、UNSAF-2D による軸対称モデルの不飽和浸透流解析を実施した結果を示す。

数値解析では、パッカーを用いる試験と試験孔全体を用いる試験をモデル化して、任意の現場飽和透水係数(k_{in} ; 入力値)を与えて長時間の透水試験をシミュレーションし、浸潤流量 Q の経時変化と浸潤流量が概ね一定となった 24 時間経過時点の浸潤流量として定常浸潤流量 Q_0 を計算した。

提案式の検証方法は、長時間透水試験解析結果である Q_0 とモデル化した透水試験の諸条件、すなわち、試験孔内水深(h)、試験孔の半径(r_0)、試験区間の長さ(l)、試験孔内水面から地下水面までの深さ(Tu)を提案式に代入することで透水係数を算出し(k_{out} ; 透水係数算定式による計算値)、入力値 k_{in} と計算値 k_{out} を比較するという方法を採用した。

数値解析は、水平 1000cm×鉛直 1500cm の軸対称モデルを用いた。パッカーを用いる試験と試験孔全体を用いる試験の概要図を図-3.27 に示し、要素分割図と要素分割拡大図を図-3.28 と図-3.29 に示す。

また、表-3.6 と表-3.7 に、試験孔の条件と設定した現場飽和透水係数等を示す。試験孔内の水深を $h=200\text{cm}$ 、試験孔の半径を $r_0=6\text{cm}$ とした。パッカーを用いる試験における試験区間の長さは、 $l=65\text{cm}$ とした。現場飽和透水係数は、 $k_{in}=3.10 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ とした。

長時間透水試験解析は、試験孔内水面から地下水面までの深さ(Tu)と試験孔内水深(h)の比が、 $Tu > 3h$, $Tu=2h$, $Tu < h$ となるように、3通りの異なる地下水位を与えて実施した。表-3.8 に解析ケースを示す。

パッカーを用いる試験のシミュレーション結果を表-3.9 に示し、試験孔全体を用いる試験のシミュレーション結果を表-3.10 に示す。各ケースに対応する算定式にシミュレーション結果として得られた Q_0 を与えて算定した現場飽和透水係数 k_{out} は、両試験方法、3 ケースともに入力値 k_{in} ($3.10 \times 10^{-3}\text{cm/s}$) と大きな差異が無いことが確認できた。このことから、能野ら²⁶⁾が提案している式(3.6.28)と式(3.6.29)の妥当性が明らかにされた。

(4)結果の整理において留意すべき事項

図-3.27 モデル化と試験区間

図-3.28 要素分割図(全体)

図-3.29 要素分割拡大図

表-3.6 長時間透水試験解析時の試験孔条件

表-3.7 土質定数

表-3.8 解析ケース

表-3.9 パッカーを用いる試験の数値解析結果(Q_0 : 定常浸潤流量)・・・

表-3.10 試験孔全体を用いる試験の数値解析結果(Q_0 : 定常浸潤流量)と・・・

本基準では、試験孔で実施する場合、試験孔の掘削に伴って生じる試験面の緩みや鏡面化を整形によって取り除くことを基本としている。しかし、整形で完全に取り除くことができない場合に、結果の整理の段階でこれらの影響を考慮する方法も考えられる。

対象は飽和地盤ではあるものの、一定流量での注水あるいは揚水後の回復過程において、水位の時間変化から透水係数を求める過程で試験孔周辺の皮膜を考慮する方法が示されている²⁷⁾、²⁸⁾。透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の対象地盤において、試験孔の周辺に厚さ 10cm 程度の $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の皮膜が形成された場合、皮膜を考慮しなければ、対象地盤の透水係数は $5.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ と評価されるが、皮膜を考慮すれば $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度の透水係数が得られている。

参考文献

- 1) 能野一美・露口耕治・古川修三・久保慶徳・向谷光彦：利便性に優れた現場透水試験装置“水華”の開発，地盤と環境に関するシンポジウム(徳島大学)，pp.57~68，2012.
- 2) Sakaguchi, A., T. Nishimura, and M. Kato The effect of Entrapped Air on the Quasi-Saturated Soil Hydraulic Conductivity and Comparison to the Unsaturated Hydraulic Conductivity. *Vadose Zone Journal*, 4(1) 139-144, 2005.
- 3) 能野一美・久保慶徳・尾崎祥太郎・向谷光彦：原位置透水試験の測定時間短縮化方法について，地盤工学会四国支部平成27年度技術研究発表会，pp.11~12，2015.
- 4) 宮崎 毅，西村 拓 非相似多孔質体モデルを用いた土壌のスケーリング手法，農業土木学会論文集, 174 , 41-48, 1994.
- 5) 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.
- 6) 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ー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集地盤と建設，第33巻，pp.181-186, 2015.
- 7) 真木直也：原位置での不飽和土の透水係数の計測に関する研

- 究, 岡山大学環境理工学部卒業論文, 2014.
- 8) 西垣誠・春名充明・濱本隆太: 原位置でボーリング孔を用いた不飽和浸透特性の計測法に関する研究, 日本地下水学会, 2010 年秋季講演会講演要旨, pp.218-219, 2010.
 - 9) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の 2-, p.568, 2009.
 - 10) 西垣誠・藤田貴文・南部卓也: ボーリング孔を用いた原位置での擬似飽和透水係数の計測法に関する研究, 日本地下水学会, 2011 年秋季講演会講演要旨, pp130-133, 2011.
 - 11) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説-二分冊の 1-, pp.555~557, 2013.
 - 12) Wooding: Steady I filtration from a shallow circular pond, *Water Resour. Res.*, 4:1259-1273, 1968.
 - 13) Ankeny M.D., M. Ahmed, T.C.Kaspar, and R. Horton: Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity, *Soil Soil Sci. Soc. Am.* J55:467-470, 1991.
 - 14) Smettem, K. R. J., B. E. Clothier, measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disk permeameters, *J. Soil Science*, 40, 563-568, 1989.
 - 15) 酒寄貴範, 長谷川周一, 中野明正, 加藤英孝, 河野英一, 負圧浸入計を用いた畑土壌の不飽和透水係数の測定, *日本土壌肥料学雑誌*, 69(4), pp.386-394, 1998.
 - 16) Simunek, J. and van Genuchten M.Th: Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension infiltrometer data, *Soil Science*. 162(6), 1997.
 - 17) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会: 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善, 2005.
 - 18) 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, 2000a.
 - 19) 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, 2000b.
 - 20) Elrick, D. E. and Reynolds, W. D.: Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers, *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into*

- Practice* edited by G. C. Topp, W. D. Reynolds and R. E. Green, SSSA Special Publication, No. 30, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 1~24, 1992.
- 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 森井俊広・井上光弘・竹下祐二：プレッシャーインフィルトリ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.
 - 24) 日本大ダム会議：アースマニユアル，pp.472-485，1977.
 - 25) Daniel Bruce Stephens : Analysis Of Constant Head Borehole Infiltration Tests In The Vadose Zone , In the Graduate College , The University Arizona, 1979
 - 26) 能野一美・古川修三・久保慶徳・向谷光彦・乃村智子：締め固めた地盤の透水係数算定式に関する一考察，第 57 回地盤工学シンポジウム平成 24 年論文集，pp.175~180，2012
 - 27) Karasaki,K., J.C.S.Long and P.A.Witherspoon : Analytical Models of Slug Tests, *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 1, pp.115-126, 1988.
 - 28) Karasaki, K. : A Systematized Drillstem Test, *Water Resources Research*, Vol.28, No.12, pp.2913-2919,1990.

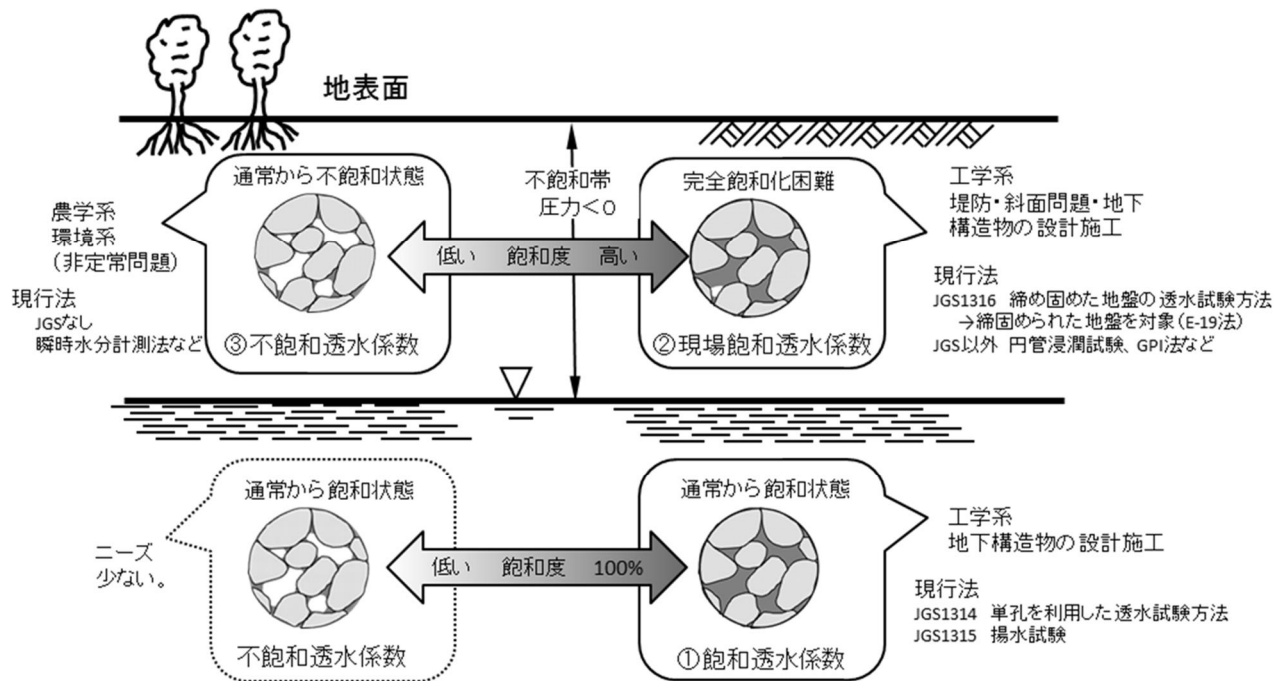


図-1.1 現場での4つの透水係数

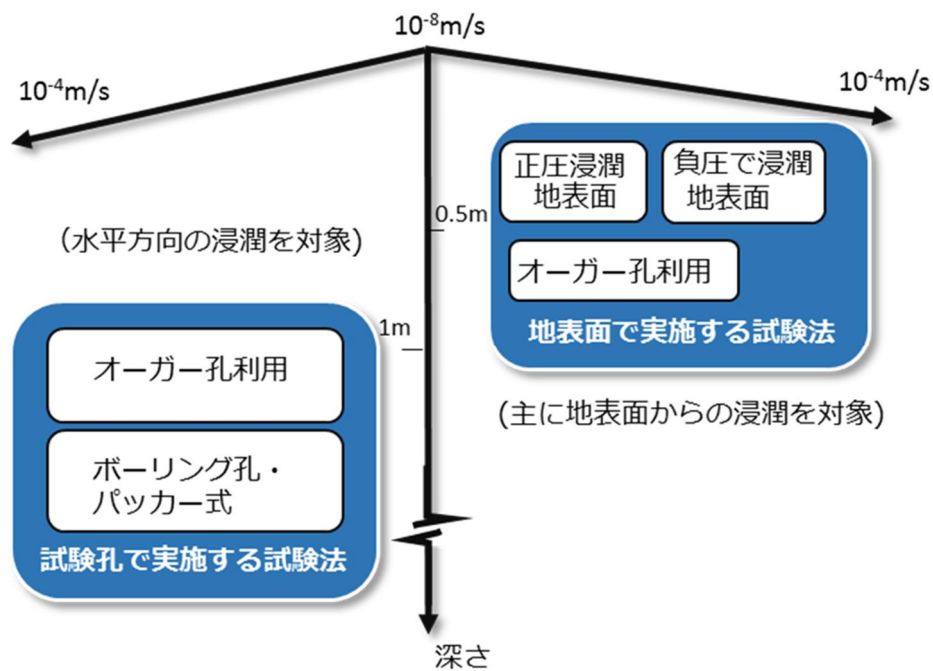


図-1.2 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法

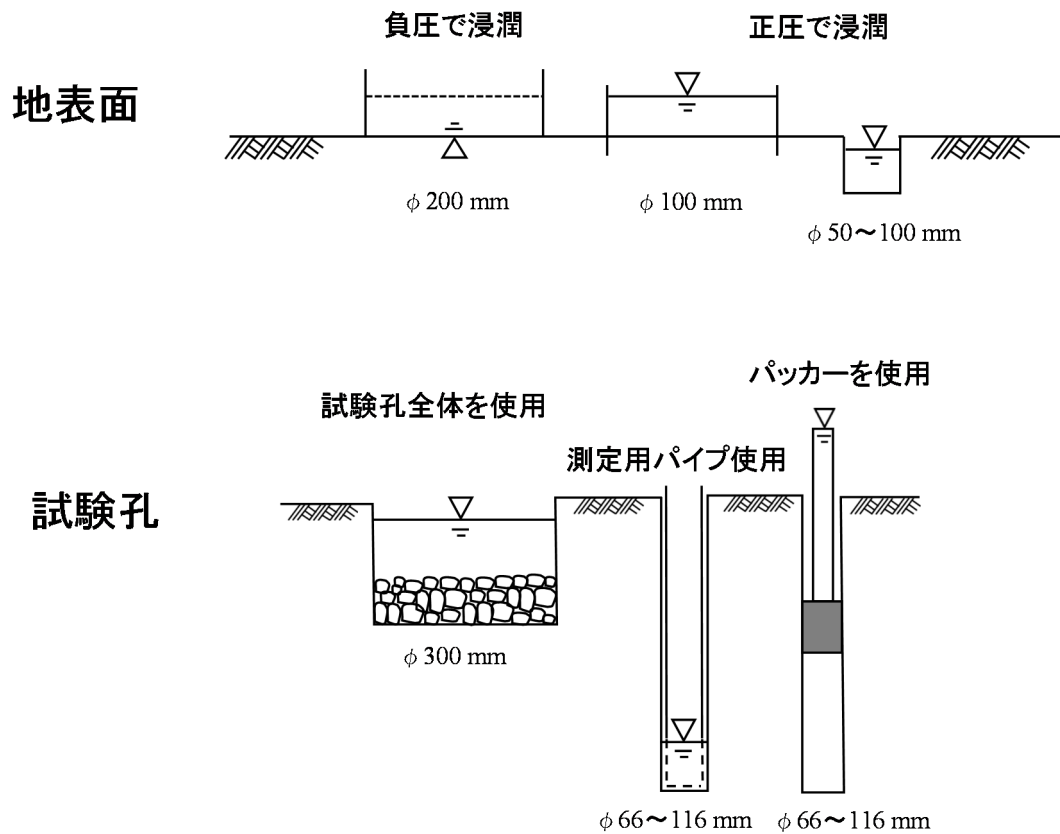


図 B. 1 地表面で実施する場合と試験孔で実施する場合の試験方法の例

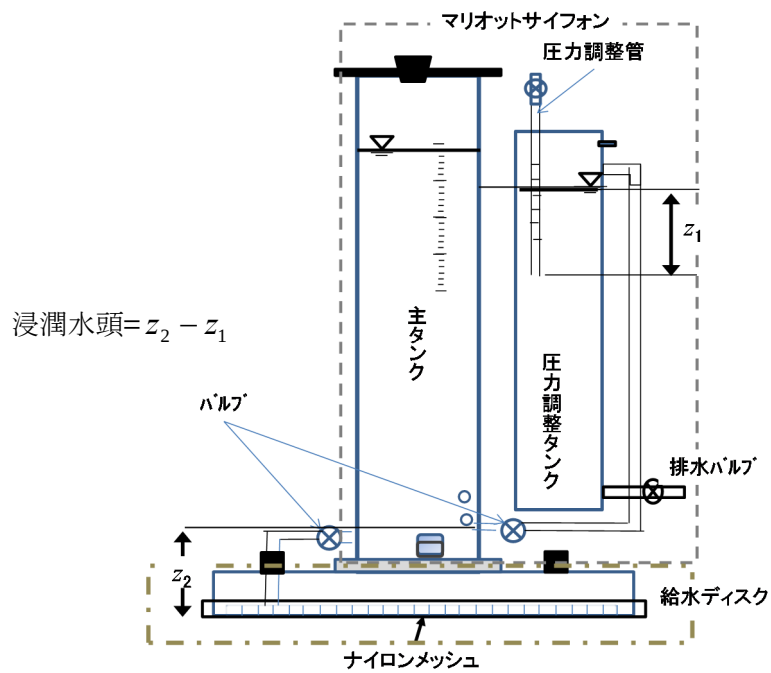


図 B. 2 地表面で実施する場合の定水位浸潤装置の例（負圧で浸潤させる方法）

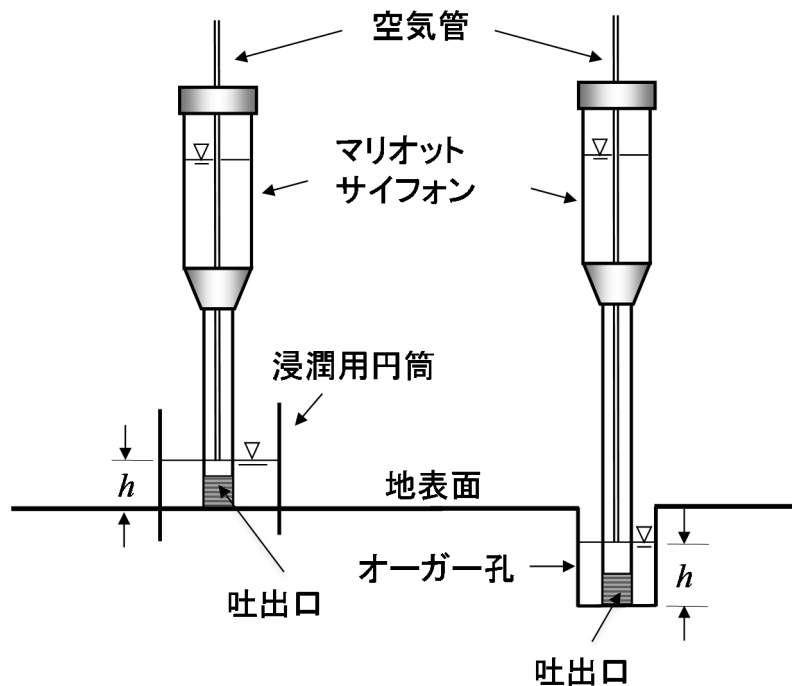


図 B.3 地表面で実施する場合の定水位浸潤装置の例（正圧で浸潤させる方法）

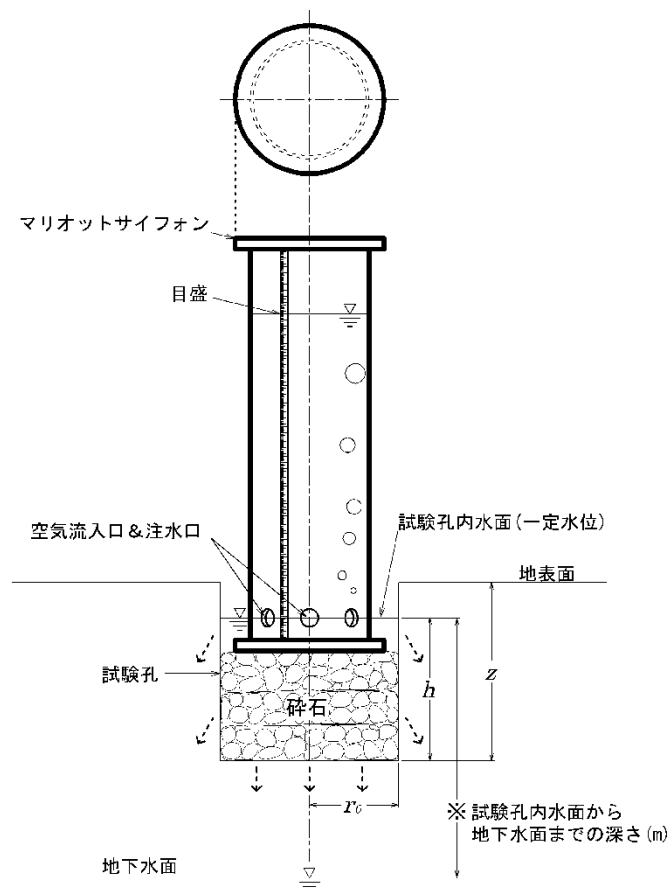


図 B.4 試験孔で実施する場合の定水位浸潤装置の例（試験孔全体を用いる方法）

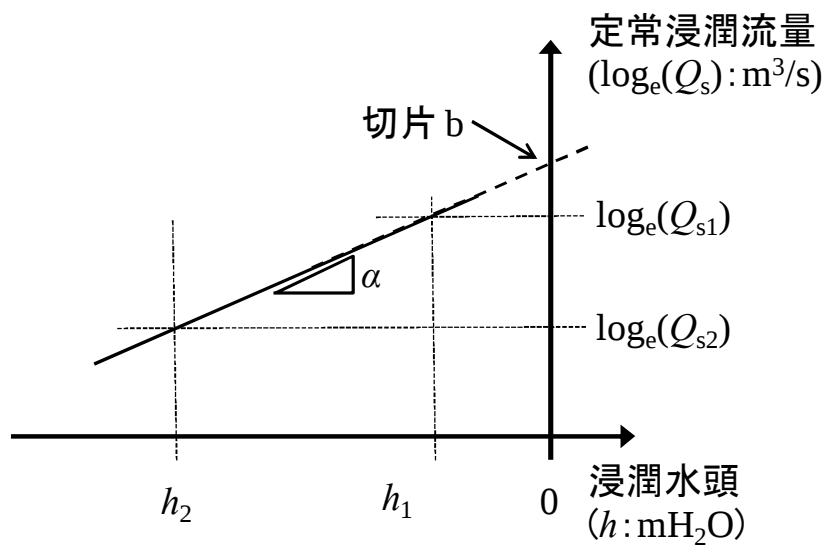


図 B.7 $h - \log_e(Q_s)$ 図の例（負圧で浸潤させる方法）

表 B.1 土の種類に応じて設定される土壌パラメータ α (m^{-1}) の推奨値の例

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	1
細粒組織（粘性）で非構造的の土	4
非構造的な材料と細砂を含む，粘土からロームまでの幅広い土，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

表 B.2 オーガー孔の壁面と底面からの浸潤を考慮するための形状係数 C を与える式の係数の例

土	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
粘性土	-0.0069	0.2124	0.5542	-0.2137	0.0260
ローム	-0.0039	0.1989	0.5760	-0.2100	0.0259
砂	-0.0055	0.2550	0.4735	-0.1447	0.0150

表-3.1 現場飽和透水係数の計測方法

計測方法		測定原理	特徴と問題点
単管浸透法 (Single ring infiltrometer)	プレッシャー インフィルトロメーター	地盤表面から定水頭で土中に浸潤させ、その浸潤量を測定することにより、現場飽和透水係数を測定する。	試験装置がシンプルで、測定も簡単、迅速に行うことができる。 粘性土地盤のように透水性が低くなると、正確な浸潤量が測定できなくなる。
	シリンダー インタークレート法	内径30cm前後の金属製シリンダーを深さ10～20cm地盤に打ち込み、シリンダー内に湛水して浸入速度の測定を行う。	最終浸入速度は、飽和透水係数の代用として用いられることがある。 最終浸入能から推定した透水係数は、 鉛直方向の透水係数 を過大評価する可能性が高い。
ボアホール パーミアメーター	E-19法	直径30cm、深さ30cm程度の円筒状の試験孔を削孔する。試験孔を碎石で充填した後、一定水位で試験孔の底面と側面から浸潤させ、概ね一定になった時点で浸潤量を測定する。	不透水性の盛り土締固め地盤では、約1日で定常とみなして試験を進めることが多い。このような場合、実際の透水係数よりも大きめの値を算出することになる。 水平方向の透水係数 に近い値が算出されることが確認されている。
	ゲルフ式 ウェルパーミアメーター	オーガーでウェルを掘削したのち、ウェル内に所定の定水位を与え、ウェルの側壁と孔底から土中へ入る浸潤量を測定する。浸潤量が一定になれば、これを定常浸潤量とみなし試験を終了する。	地盤の深さ方向の透水係数の分布を効率的に測定できる 原位置透水試験法として位置づけられる。
エアントリーパーミアメーター (air-entry permeameter)		直径30cm程度の透水円筒管を不飽和地盤に15～25cm程度鉛直に打ち込み、注水を行い、給水タンク内の水位の低下速度を計測する。給水を停止し、透水円筒管上部の圧力計によって空気侵入圧力水頭値を計測する。	透水性の低い均質な砂質土、およびシルト質砂、さらには粘性土地盤における 鉛直方向の現場飽和透水係数 を測定する方法である。 浸潤前線までの深さは、試験終了後、実際に掘削する等の方法によって実測する必要がある。
負圧浸入計 (disk permeameter/tension infiltrometer)		多孔体またはフィルターを介して負圧で地盤へ給水を行いながら透水性を測定する。 現場において装置を「置く」だけで現場を攪乱せずに現場飽和透水係数が測定できるという利点がある。	降雨、涵養などによる給水強度が飽和透水係数を下回るような場合など、給水面における水圧が正圧に至らない場合に適用される。

表-3.2 本試験方法と対応する既存の試験方法

実施対象の試験面	試験方法	対応する既存の試験方法
地表面で実施する場合	負圧で浸潤させる方法	負圧浸入計
	正圧で浸潤させる方法	単管浸透法 ウェルパーミアメーター法
試験孔で実施する場合	試験孔全体を用いる方法	E-19法
	測定用パイプを用いる方法	
	パッカーを用いる方法	

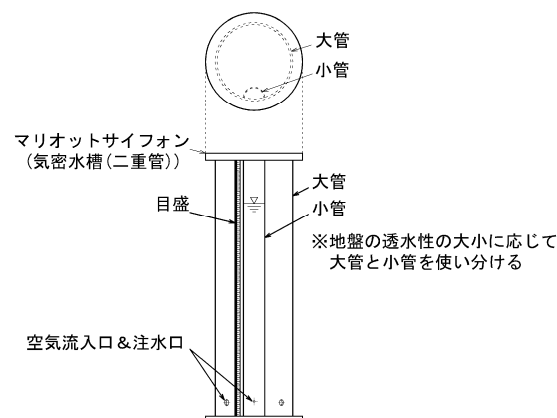


図-3.1 二重管構造のマリオットサイフォン 3)

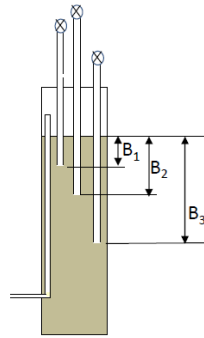


図-3.2 複数圧力調整管の例

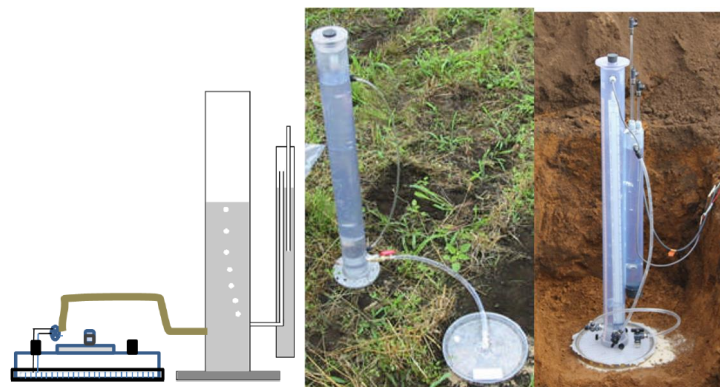


図-3.3 マリOTTサイフォン・ディスク分離型の例

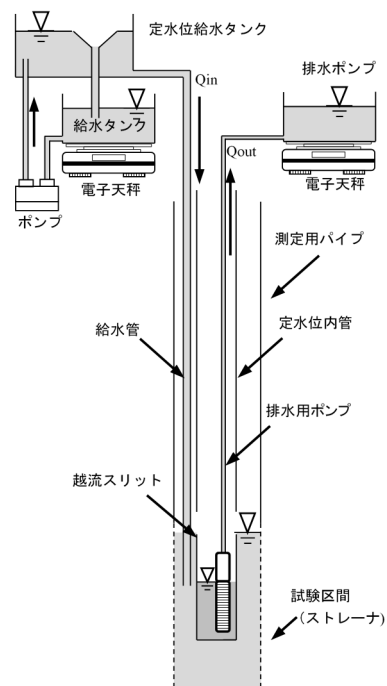


図-3.4 スリット付き内管を設置して流量を測定する方法



写真-3.1 均ぺい・整形の様子、ならびに金属リングの使用例

表-3.3 ディスクの径と許容する試験面の傾斜
(高低差は、給水ディスクの最高部と最低部の標高差)

傾斜 (°)	高低差 D=20cm	高低差 D=30cm
1	0.3	0.5
1.5	0.5	0.8
2	0.7	1.0
2.5	0.9	1.3
3	1.0	1.6

試験面に水平にスケールをあてると隙間有

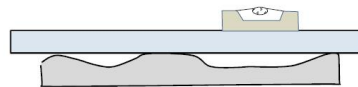
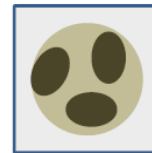
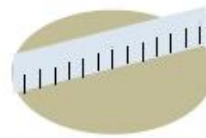


図-3.5 傾斜の確認



①均ペイが適切な状態.

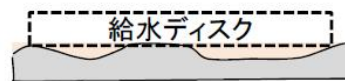
(左) 透明プラスチック板をあてると均等に試験面と接する. (右) スケールで軽く押すとスケールで付けた筋が綺麗に浮き出る.

②均ペイが不適切な状態.

(左) 透明プラスチック板をあてると部分的に試験面と接し浮いた部分が生じる. (右) スケールで付けた筋が断続的となる.

図-3.6 均ペイの確認

凹部に湿った細砂を緩く充填



試験面全体を砂で覆う場合は、ディスク周囲を囲むリングを打ち込む方が望ましい



図-3.7 微小な凹凸への対応例(湿砂の充填)



写真-3.2 ワイヤブラシによる試験面の整形⁷⁾



写真-3.3 掘り屑および整形土砂の吸引除去⁷⁾



写真-3.4 小型カメラによる試験面の状態確認⁷⁾

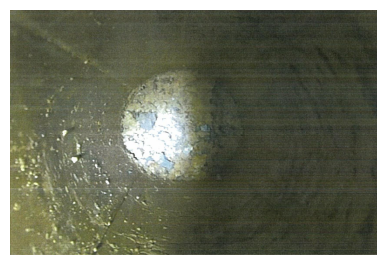
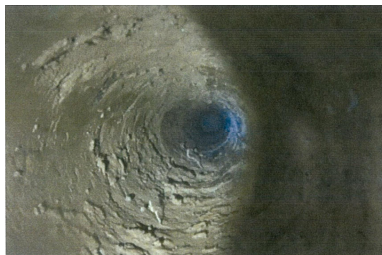


写真-3.5 試験孔掘削直後の状態⁷⁾ (左:側面, 右:孔底面)

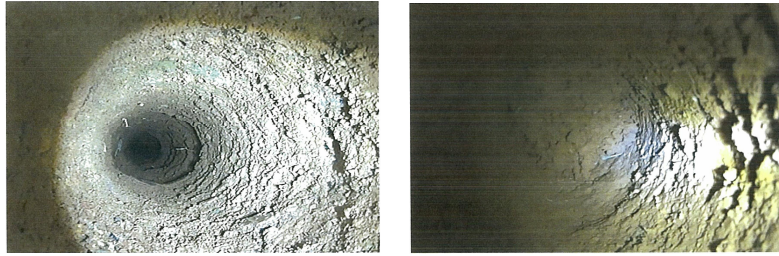


写真-3.6 試験孔整形後の状態⁷⁾ (左:側面, 右:孔底面)

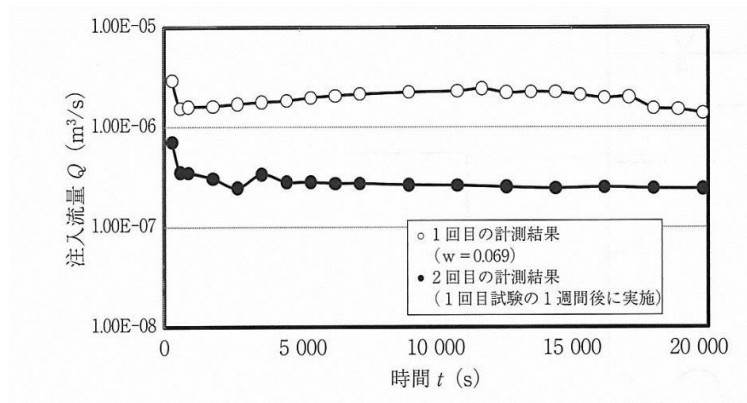


図-3.8 初期条件が異なる場合の流入量 Q の経時変化
(西垣ら⁸⁾ に加筆修正)

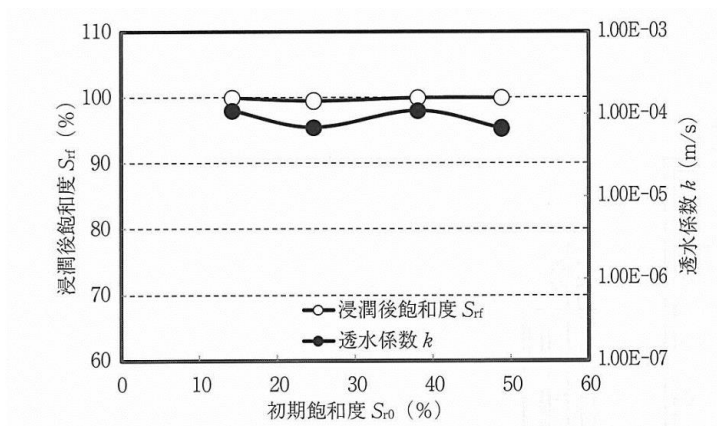


図-3.9 二酸化炭素を用いたまさ土($n=0.38$)での初期飽和度 (S_{r0}) の差による透水係数(k), 浸潤後飽和度(S_{rf})の変動 (西垣ら¹⁰⁾)

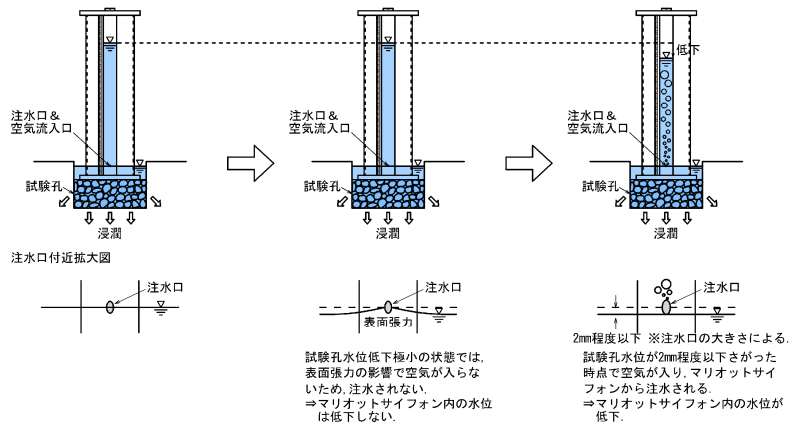


図-3.10 間欠的な注水のイメージ図(表面張力の影響)

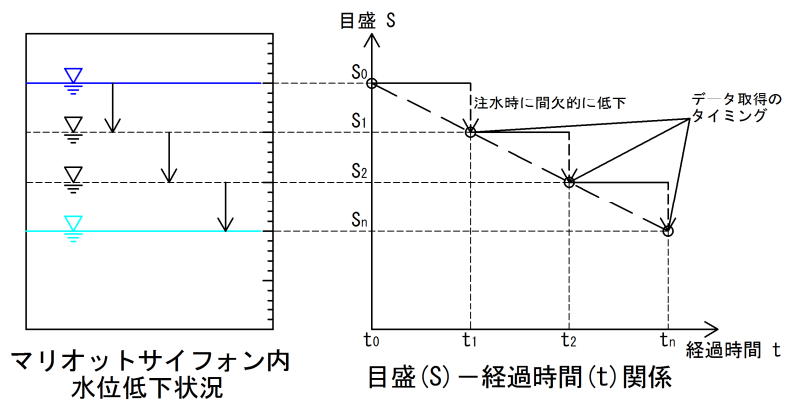


図-3.11 マリオットサイフォン内水位低下状況とデータ取得のタイミング



写真-3.7 水位低下促進具設置例

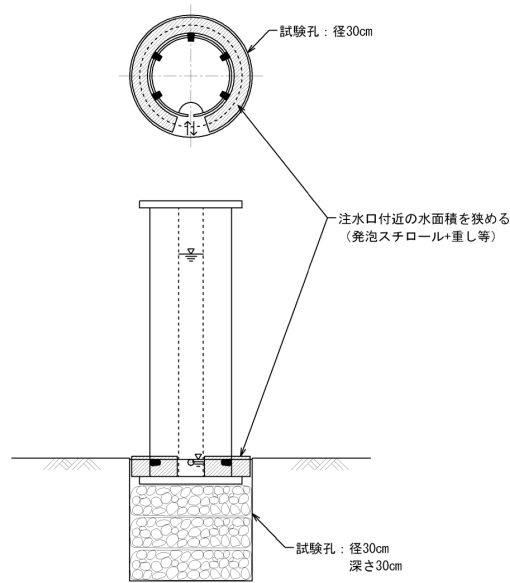
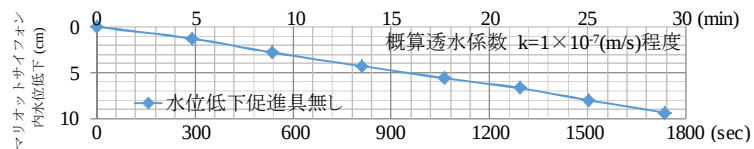
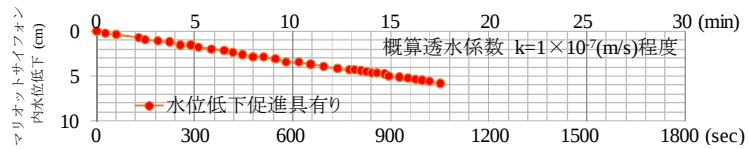


図-3.12 計測時間短縮のための方法



(a) 水位低下促進具無し



(b) 水位低下促進具有り

図-3.13 水位低下促進具効果確認のための室内実験結果³⁾

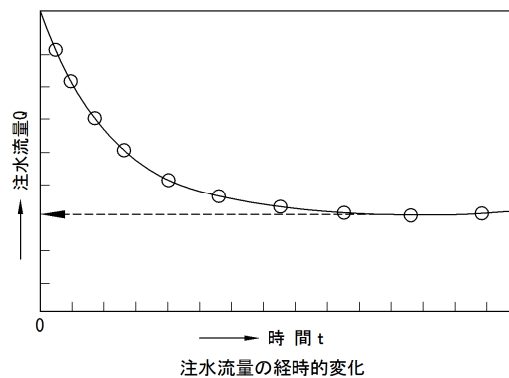
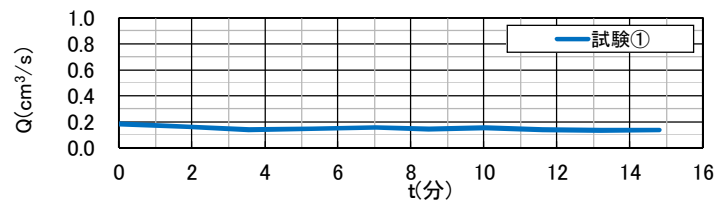
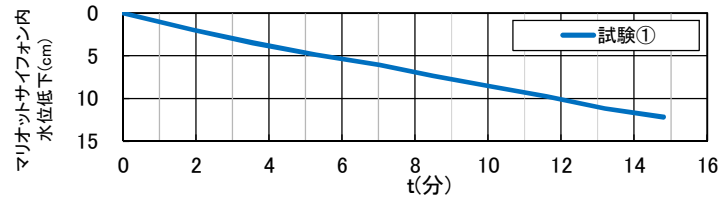


図-3.14 注水流量の経時的変化¹¹⁾

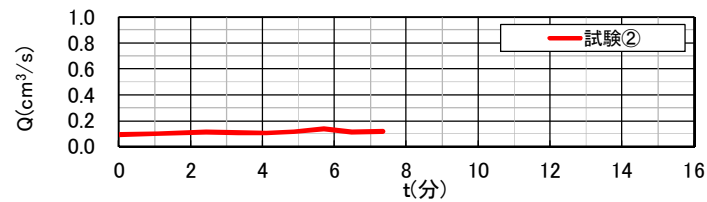


(a) 経過時間(t)－浸潤流量(Q)推移図

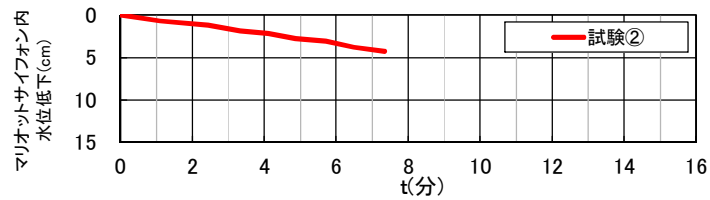


(b) 経過時間(t)－マリOTTサイフォン内水位低下推移図

図-3.15 試験時間の影響確認試験①結果(試験②と比較)



(a) 経過時間(t)－浸潤流量(Q)推移図



(b) 経過時間(t)－マリOTTサイフォン内水位低下推移図

図-3.16 試験時間の影響確認試験②結果(試験①と比較)

※試験②は試験①の40時間後に実施

表-3.4 解析に用いた土試料の透水定数

土 質	飽和体積含水率 θ_s	残留体積含水率 θ_r	飽和透水係数 $k_s(\text{m/s})$
標準砂	0.300	0.000	2.1×10^{-4}
砂質土	0.365	0.000	1.2×10^{-5}
ローム質土	0.760	0.000	4.5×10^{-5}
シラス	0.520	0.295	2.3×10^{-6}
マサ土	0.555	0.270	6.2×10^{-5}

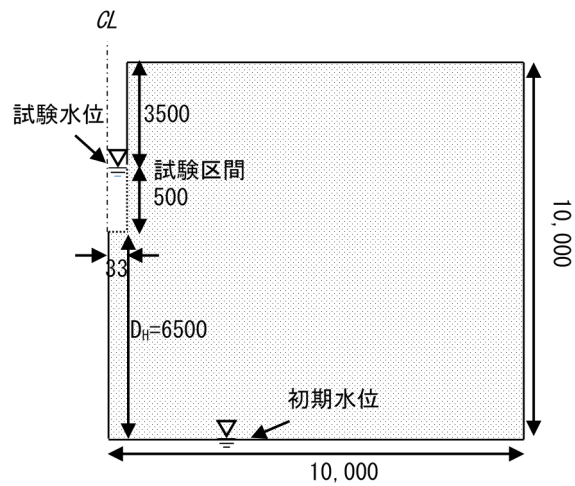


図-3.17 解析モデルの概要

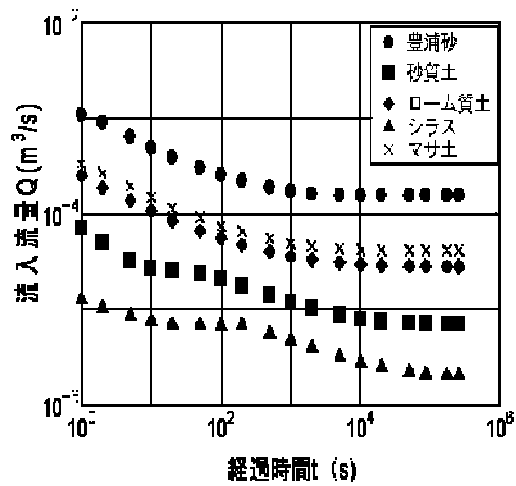


図-3.18 各土質の経過時間と流入流量の関係

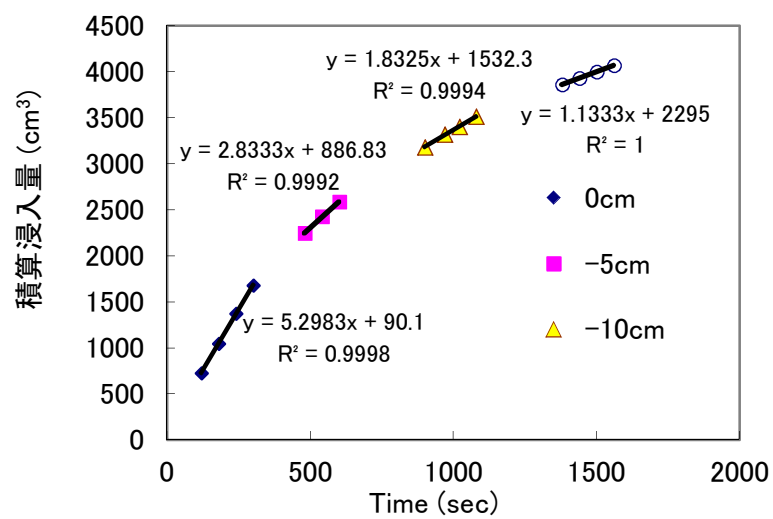


図-3.19 積算浸入量から定常浸入速度(Q)算出の例

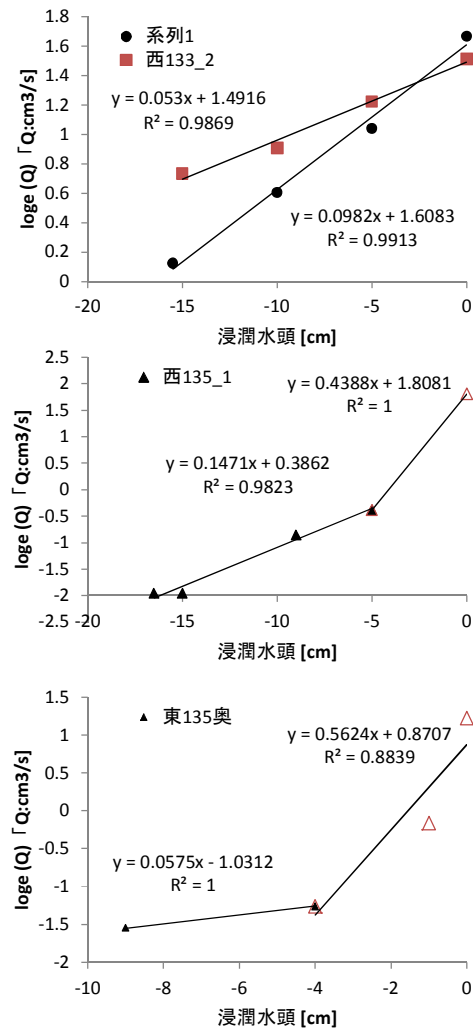


図-3.20 h - $\log Q$ の例

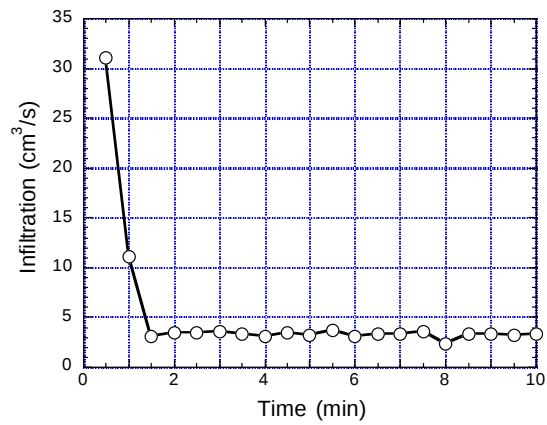


図-3.21 浸潤用円筒から地盤内への浸透流量の経時変化例

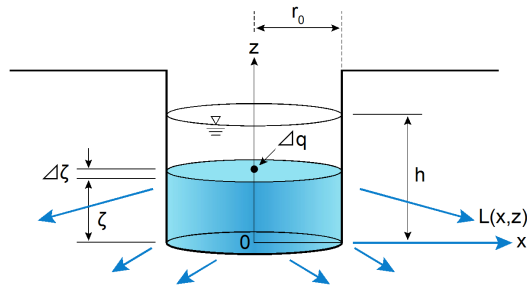
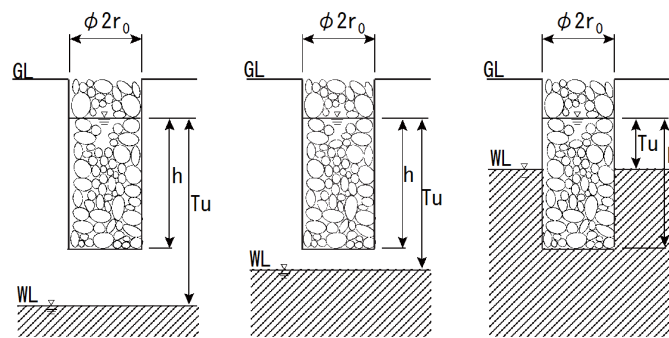


図-3.22 点源注水試験¹¹⁾



(a) $Tu > 3h$ (b) $3h \geq Tu \geq h$ (c) $h > Tu$

図-3.23 試験孔と地下水位の関係(種々の境界条件)¹¹⁾

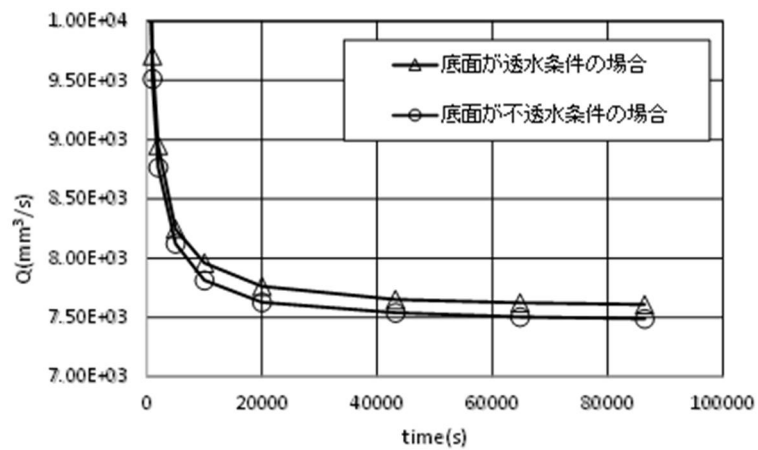


図-3.24 FEM 解析による底面の透水条件の違いによる流量の経時変化

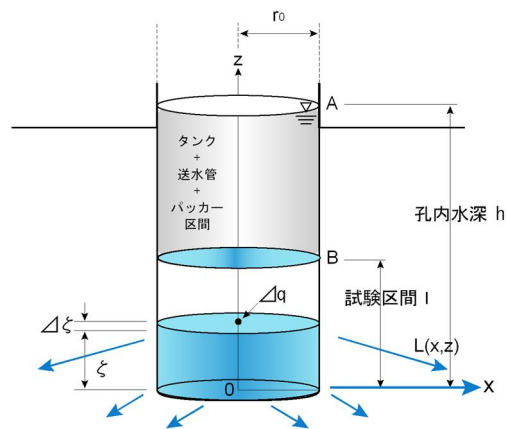
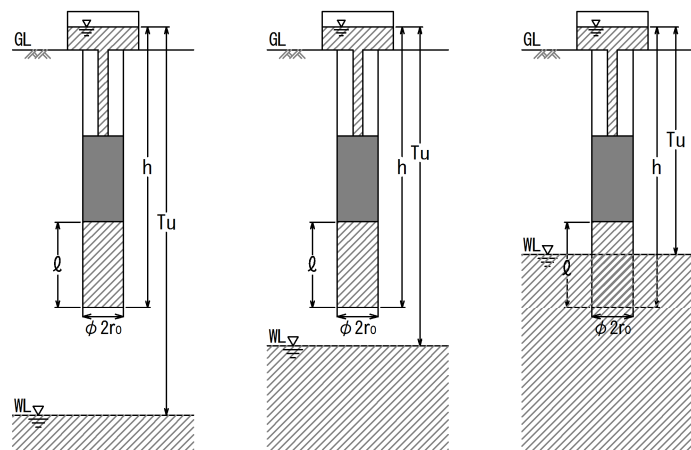


図-3.25 点源注水試験（パッカーを用いる試験）

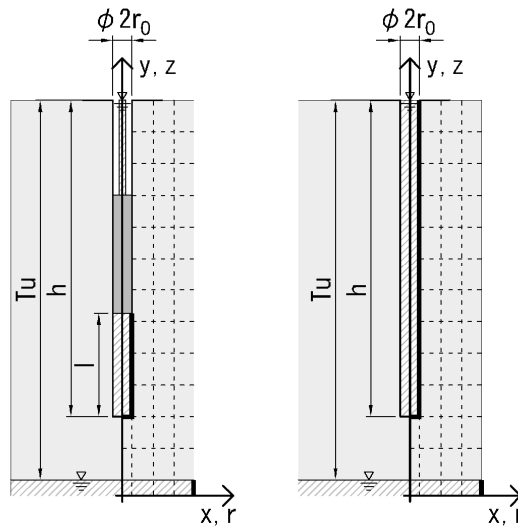


(a) $Tu > 3h$ (b) $3h \geq Tu \geq h$ (c) $h > Tu$

図-3.26 パッカーを用いる試験における試験孔と地下水位の関係
(種々の境界条件)

表-3.5 地下水面深さに応じた現場飽和透水係数の使い分け

現場飽和透水係数の算定式	試験孔全体を用いる方法	バッカーを用いる方法
地下水面が孔底より 十分に深い場合 $T_u > 3h$	$k = QC_{W1}$	$k = QC_{P1}$
地下水面が孔底に近い場合 $3h \geq T_u \geq h$	$k = QC_{W2}$	$k = Q \frac{C_{W2}}{C_{W1}} C_{P1}$
地下水面が孔底より 高い場合 $h > T_u$	$k = QC_{W3}$	$k = Q \frac{C_{W3}}{C_{W1}} C_{P1}$
記号	$C_{W1}, C_{W2}, C_{W3}, C_{P1}$ は形状関数で以下の通り	
h : 浸潤水頭 T_u : 試験孔内水面から地下 水面までの深さ k : 現場飽和透水係数 Q : 定常浸潤流量	$C_{W1} = \frac{1}{2\pi h^2} \left[\log_e \left[\frac{h}{r_0} + \left\{ \left(\frac{h}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{r_0}{h} \right]$ $C_{W2} = \frac{1}{2\pi h^2} \frac{\log_e \left(\frac{h}{r_0} \right)}{\left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_u}{h} \right) \right]}$ $C_{W3} = \frac{1}{2\pi h^2} \frac{\log_e \left(\frac{h}{r_0} \right)}{\left[\frac{T_u}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{T_u}{h} \right)^2 \right]}$ $C_{P1} = \frac{1}{4\pi \left(hl - \frac{l^2}{2} \right)} \left[\log_e \left[\frac{l}{r_0} + \left\{ \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{r_0}{h} \right]$	



(a) パッカーを用いる試験 (b) 試験孔全体を用いる試験

図-3.27 モデル化と試験区間

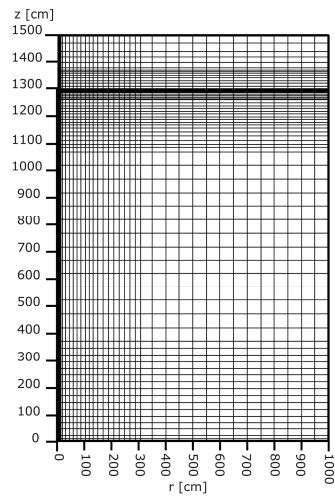


图-3.28 要素分割図(全体)

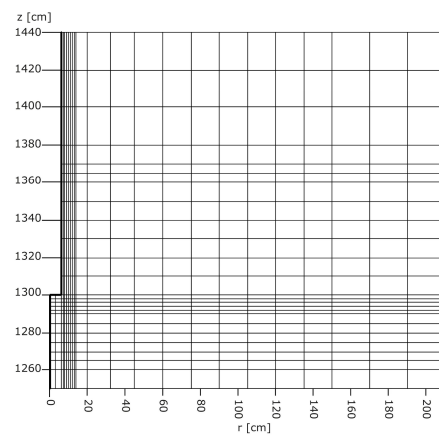


图-3.29 要素分割拡大図

表-3.6 長時間透水試験解析時の試験孔条件

試験孔内水深(h)	200.0 (cm)
試験区間の長さ(l) [※]	65.0 (cm)
試験孔の半径(r_0)	6.0 (cm)
要素メッシュ(r, z)	1000×1500 (cm)

※パッカーを用いる試験をモデル化した場合の試験区間

表-3.7 土質定数

入力透水係数： k_{in}	3.10E-03 (cm/s)
比貯留係数： S_s	1.00E-07 (cm ⁻¹)
空隙率： n	0.517

表-3.8 解析ケース

ケース	試験孔内水面から地下 水面までの深さ：Tu
Case1：Tu>3h	800.0 (cm)
Case2：Tu=2h	400.0 (cm)
Case3：Tu<h	170.0 (cm)

表-3.9 パッカーを用いる試験の数値解析結果 (Q_0 ：定常浸潤流量)と透水係数算定式に Q_0 を代入して算出した透水係数 (k_{out})

	Case1	Case2	Case3
k_{in} (cm/s)	3.10E-03		
Tu(cm)	800.0	400.0	170.0
$Q_0(t=24h)$ (cm ³ /s)	129.5	103.9	93.0
k_{out} (cm/s)	2.63E-03	4.59E-03	4.20E-03
透水係数算定式	式(21)	式(22)	式(23)

表-3.10 試験孔全体を用いる試験の数値解析結果 (Q_0 ：定常浸潤流量)と透水係数算定式に Q_0 を代入して算出した透水係数 (k_{out})

	Case1	Case2	Case3
k_{in} (cm/s)	3.10E-03		
Tu(cm)	800.0	400.0	170.0
$Q_0(t=24h)$ (cm ³ /s)	188.3	151.2	137.9
k_{out} (cm/s)	2.42E-03	4.22E-03	3.94E-03
透水係数算定式	式(9)	式(11)	式(12)