

# スラグ透水試験の適用性と結果の解釈

村田 芳信

## Slug Tests for Evaluation of in situ Permeability of Soil Layer — Performance and Interpretation —

Yoshinobu Murata

### Abstract

A slug test consists of either adding or extracting quickly an insoluble bar within a borehole to make change of water levels in the borehole, and then recording it. Since the magnitude of the change is so small that a pressure transducer with high sensitivity and digital data logger may be required to obtain enough data for analytical procedure. According to the study by Chapuis (1981), a velocity-graph ( $\Delta H/\Delta t \sim H$ ) should show a straight line passing through the origin ( $H_0 = 0$ ) if a monitoring well is installed successfully. And also, if the line does not pass through the origin, it means that there is a difference between the estimated water levels as static and actual local piezometric level. Shifting the estimated static water level by its difference, the analysed permeability of objected in situ soil layer based on the general Hvorslev solution (1951) and the Bouwer and Rice method (1976) can be considered as the exact solution.

This paper describes an outline of several interpreting methods for results of the slug test, and presents how to perform data processing in actual test.

### (要 旨)

スラグ試験はケーシング孔や観測孔内の水位を瞬時に変化させて、その後の水位の変化を測定する変水頭試験である。わずかな水位変動を精度よく測定することが可能な水位計やデータロガーの開発とともに、スラグ試験は急速に普及してきた。最近のスラグ試験の解釈法 (Chapuis, 1998) によると、速度曲線 (Chapuis et al., 1981) を用いて試験時の静的な地下水位を正しく評価することにより、Hvorslev法 (1951) や Bouwer and Rice (1976) 法による土の透水係数評価への適用性が高いとされている。

本報文では、変水頭試験による透水係数評価の理論ならびに解釈法を概説し、これらに基づいてスラグ試験による原位置透水試験データを解析した。その結果、スラグ試験では試験が短時間に終了し地下水位の変動の影響が少ない結果が得られること、さらに速度曲線による地下水位の補正によりHvorslev法の理論に適合した透水係数評価が可能であることが判った。このようにして求めた透水係数は、水位降下法と水位上昇法の値に大差が無く、正しい土の透水係数を表すことが確認できた。

キーワード：原位置試験、透水係数、地下水位、井戸

### 1. まえがき

砂質地盤の透水係数を求めるための現場透水試験では、Hvorslev (1951)<sup>1)</sup>の式を用いて透水係数を算出している。この場合、以下の条件が仮定される。

- ① 試験中の地盤の自然水位は一定である。
- ② 試験孔との水位差はグルシー則の成り立つ範囲とする。
- ③ 試験中は試験区間 (取水口の形状) が変形 (崩壊や圧縮) しない。

加えて、試験区間の孔壁の乱れやスタンドパイプに沿っ

た浸透水の漏れ、さらには間隙水中の溶存ガスの存在などが透水係数に誤差を生じる要因となる。

現状、このような適用条件や誤差の影響を考えた試験の実施ならびに結果の解釈が、正しく行なわれていない場合が多い。たとえば、試験孔の洗浄後間もなく注水試験を行ったり、乱暴なベラーの投入や過剰な揚水により試験区間を崩壊させたり、また測定結果の初期の特異な傾向だけを用いた透水係数の算定などである。その結果、注水法と回復法による透水係数が1オーダー以上も異なり、挙げ句の果てには粒度試験から推定した透水係数を採用することも多いと言われている<sup>2)</sup>。これらの

調査結果は、大変残念ではあるが、現場透水試験の有効性を損ね信頼性を失う結果となっている。

スラグ試験は任意の水頭差を簡単に与えることができ、数秒間隔で水位測定が可能なデータロガーの開発により、短時間で解析に必要な測定ができる。また、最近のスラグ試験の解釈法に関する研究 (Chapuis, 1998)<sup>3)</sup>によれば、速度曲線 (Chapuis et al., 1981)<sup>4)</sup>を用いて静的な地下水位を補正することにより、Hvorslev 法やBouwer and Rice (1976)<sup>5)</sup>法による透水係数評価への適用性が高いとされている。

これらの手法を実際に適用した結果<sup>6)</sup>、注水法と回復法で透水係数の評価が良く適合し、幅広い透水係数の土に適用が可能であることが確認された。今後、スラグ試験を用いて理論の仮定に適合した透水係数評価を実施することで、現場透水試験の有効性と信頼性の回復を期待したいと考えている。

## 2. スラグ試験の特徴

スラグ試験は、観測井戸や打ち込みケーシングによる試験孔ならびにピエゾメーターなどのスタンドパイプ内の水位を急激に変化させ、その後の水位応答を経時的に計測して土の透水性や貯留係数などの水理特性を把握する試験として総称される。

水位を急激に変化させる手法として、スラグ (水密な金属棒) を水中に投入したことから "slug test" の名が生まれ (Ferris & Knowles, 1954)<sup>7)</sup>、その後スラグ試験の解釈に関する多くの研究がなされてきた。

Chapuis(1998)によると、現在普及している変水頭試験法は表-1のように分類され、中でもHvorslev (1951)、

Cooper et al. (1967)<sup>8)</sup>、Bouwer and Rice (1976) およびChapuis et al. (1981) の解析方法が流布しているようである。変水頭試験は局所的な透水係数を評価する手法として普及しているが、本来スラグ試験は透水量係数  $T$  と貯留係数  $S$  を求める試験として研究されてきた。国内では、Hvorslevのタイムラグ理論に基づいた現場透水試験が広く普及しているが、スラグ試験での適用は少ない。

スラグ試験の原理を図-1に示す。試験は地下水位が安定した状態で、スラグを即時に井戸の中に下ろしてスタンドパイプ内の水位を上昇させ、その後の水位の降下を計測する水位下降試験と、逆にスタンドパイプ内にあるスラグを即時に引き上げて孔内の水位上昇を計測する水位上昇試験がある。いずれの場合にも水位の変動量は小さく、水位の回復も短時間で終了する。したがって、図解解析のための十分なデータを得るために、孔内に設置した高精度の圧力センサーにより非常に細かい計測時間での水位測定が必要になる。

このようなスラグ試験の特徴は、以下の点にある。

- 試験の準備や試験時間が短く安価である。
- 測定結果に大気圧の変化や近隣の揚水井戸からの干渉のような地下水位の変動の影響を受けにくい。
- 一定の水位変動を簡単に与えることが出来る。その結果、過剰な揚水や注水による影響が少なく、幅広い透水係数の土に適用が可能である。
- デジタルデータロガーならびにプログラムの助けにより、正確で素早い解析が可能である。

一方、スラグ試験から計算される透水係数は、孔周辺の局所的な値であるので、地層の平均的な透水係数を見

表-1 ケーシング孔および観測井戸でのスラグ試験と変水頭試験の特徴 (Chapuis, 1998)

Table 1 Characteristics of overdamped slug tests and variable-head permeability tests in cased boreholes and monitoring wells.

名称	透水係数試験	軟らかい土の透水係数試験	overdampedスラグ試験
俗名	定または変水頭試験	定または変水頭試験	スラグ試験
方法	一定または変水頭	一定水頭	変水頭
周辺土の変形	変形を無視	弾性しかし時間遅れ (圧密)	完全弾性 (即時的)
適用箇所	帯水層または非帯水層	非帯水層	全帯水層
孔内準備	打ち込みケーシング 打ち込みピエゾメーター モニタリング井戸	良くシールされたピエゾメーター	掘削孔に設置されたスクリーン およびパッカー
解析方法	Lefranc(1936,1937) Hvorslev(1951) Bouwer & Rice(1976) Chapuis et al.(1981) CAN/BNQ(1988a, 1988b)	Gibson(1966,1970) Wilkinson(1968) Mieussen & Ducasse(1977)	Cooper et al.(1967) Papadopoulos et al.(1973) Rat & Laviron(1974) Nguyen & Pinder(1984)
成果	局所的な透水係数 $k$	局所的な透水係数 $k$ および圧縮性	帯水層の透水量係数 $T$ と 貯留係数 $S$
境界条件	形状係数によって考慮	形状係数によって考慮	固定

Overdamped : 静的な地下水位に単調に戻る。これに対してunderdampedは静的な地下水位に振動しながら戻る。

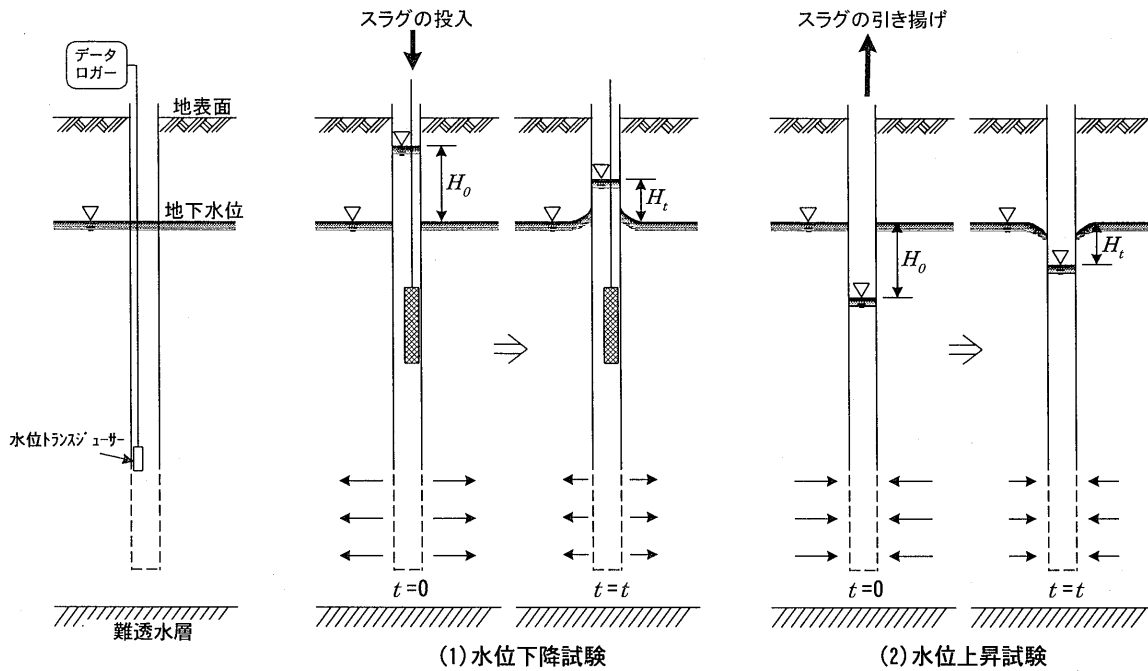


図-1 スラグ試験の原理

Fig.1 Principle of a slug test.

出すためには、対象領域のできる限り多くの孔（ならびに深度）に対して試験すべきである。

3. スラグ透水試験の解釈法

スラグ試験を土の透水係数評価に用いる場合を“スラグ透水試験”として区別する。スラグ透水試験の解釈法としては、Hvorslev法ならびにBouwer and Rice法が適用され、これらをChapuis et al.の速度曲線法を用いて補正することで、より確かな透水係数評価が可能である。以下にこれらの理論を概説するが、数式の展開には自然対数を用いて行なう。

3.1 Hvorslevのタイムラグ理論

Hvorslevは、スタンドパイプ内の水位と地下水位が等しくなるために生ずる時間の遅れは、主に土の透水係数と透水区間の寸法と形状ならびに静水圧勾配に影響され、これを静水圧的タイムラグと呼んで理論を解いた。その理論は変水位透水試験の理論と同じで、次の仮定に立っている。

- ①水位測定 of 誤差は、唯一静水圧的タイムラグによる。
- ②ダルシーの法則が成り立ち、土や水は圧縮しない。
- ③被圧条件が成立し、スタンドパイプ内の水位が地下水位に回復するのに、地下水位の変化は無視できる程小さいものとする（地下水位を変化させない）。

図-2に示すように、任意の時間  $t$  における水頭  $H$  を  $H = z - y$  とすると、流量  $q$  は次式で表される。

$$q = F \cdot k \cdot H = F \cdot k \cdot (z - y) \tag{1}$$

ここに、 $k$  は透水係数で、 $F$  は試験区間（取水口）の形状や寸法に関する形状係数である。

時間  $dt$  における水位変化を  $dy$  とすると、スタンドパイプの断面積を  $A$  として、

$$q \cdot dt = A \cdot dy$$

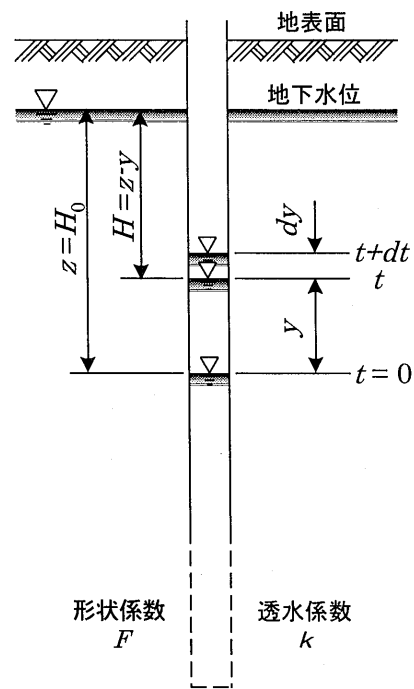


図-2 基本定義 (Hvorslev, 1951)

Fig.2 Basic definitions for time lag.

となり、これに(1)式を代入して、つぎの微分方程式が得られる。

$$F \cdot k \cdot (z - y) \cdot dt = A \cdot dy$$

$$\frac{dy}{z - y} = \frac{F \cdot k}{A} dt \quad (2)$$

スタンドパイプ内の水位が地下水位と平衡するのに必要な全流量  $V$  は、 $V = A \cdot H$  である。

ここで、最初の流量  $q = F \cdot k \cdot H$  を維持したときに、圧力差が平衡するのに必要な時間を基本タイムラグ  $T_B$  と定義すると、 $T_B$  はつぎのように表わすことができる。

$$T_B = \frac{V}{q} = \frac{A \cdot H}{F \cdot k \cdot H} = \frac{A}{F \cdot k} \quad (3)$$

さらに、(2)式は次のように書き換えられる。

$$\frac{dy}{z - y} = \frac{dt}{T_B} \quad (4)$$

この(4)式は、静水圧的タイムラグとその影響を決定するための基本的な微分方程式である。

地下水位が一定(定常状態)で  $z = H_0$  の場合(4)式は、

$$\frac{dy}{H_0 - y} = \frac{dt}{T_B}$$

となり、 $t = 0$  のとき  $y = 0$  であるので、両辺を積分した解は、次のとおりである。

$$\frac{t}{T_B} = \ln\left(\frac{H_0}{H_0 - y}\right) = \ln\left(\frac{H_0}{H}\right) \quad (5)$$

$t/T_B$  はタイムラグ比と呼ばれ、水頭比  $H/H_0$  ならびに平衡比  $E$  はそれぞれ次式で決定される。

$$\frac{H}{H_0} = e^{-t/T_B} \quad (6)$$

$$E = \frac{y}{H_0} = 1 - \frac{H}{H_0} = 1 - e^{-t/T_B} \quad (7)$$

図-3は、タイムラグ比に対する水頭比ならびに平衡比を示している。図より基本タイムラグ  $T_B$  は平衡比  $E = 0.63$  (水頭比  $H/H_0 = 0.37$ ) に相当していることが判る。平衡比  $E = 0.9$  (水頭比  $H/H_0 = 0.1$ ) に対応するタイムラグ比は基本タイムラグ  $T_B$  の2.3倍に相当することから、実際の現場ではおよそ平衡比が0.9以上の計測によって基本タイムラグ  $T_B$  の検討が十分に可能であることが判る。

また、図-4に示すようにタイムラグ比は全ての時間間隔で等しいので(5)式より、

$$\frac{t}{T_B} = \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right) = \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) = \ln\left(\frac{H_2}{H_3}\right), \text{ etc.}$$

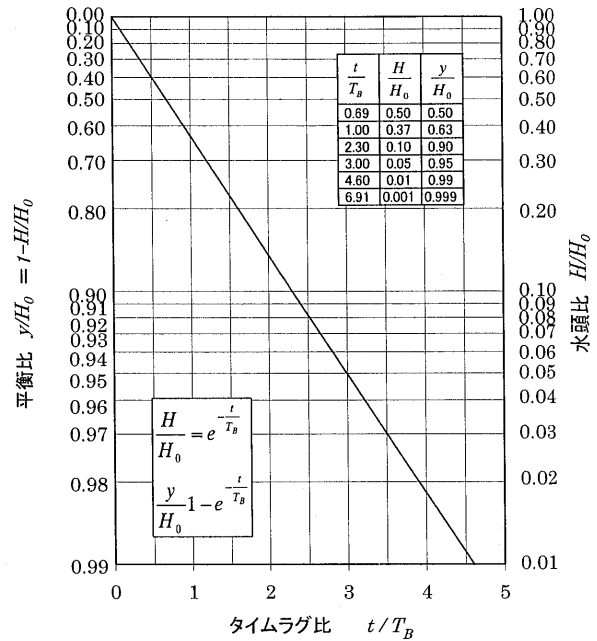


図-3 タイムラグ比と平衡比ならびに水頭比の関係 (Hvorslev, 1951)

Fig.3 Equalization ratio and head ratio against time lag ratio.

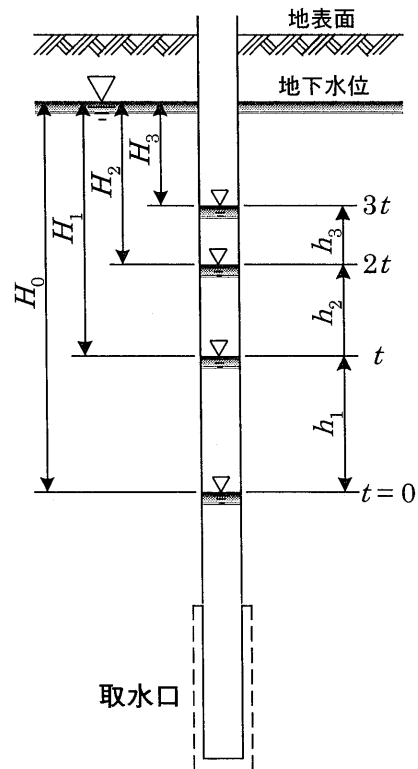


図-4 等時間間隔での観測値 (Hvorslev, 1951)

Fig.4 Determination of time lag by observations at equal time intervals.

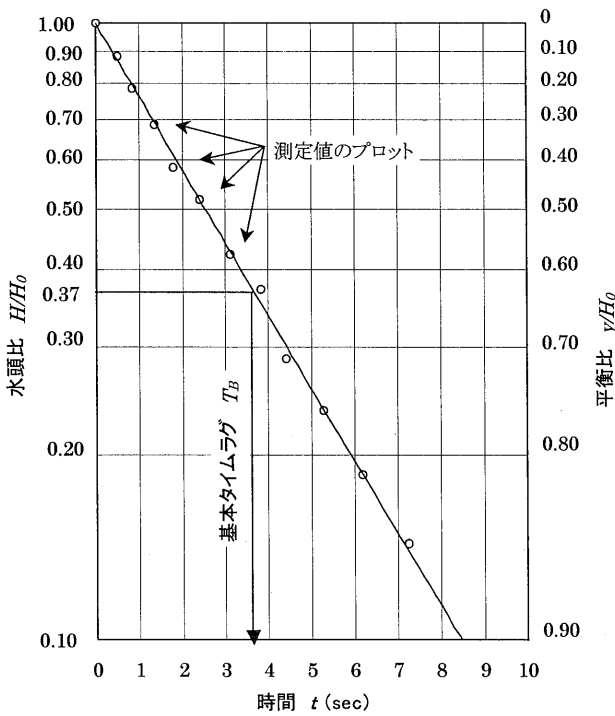


図-5 基本タイムラグの決定 (Hvorslev, 1951)  
Fig.5 Determination of basic time lag.

ここに、 $H_0/H_1 = H_1/H_2 = (H_0 - H_1)/(H_1 - H_2) = h_1/h_2$  より、

$$\frac{t}{T_B} = \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \ln\left(\frac{h_2}{h_3}\right) = \ln\left(\frac{h_3}{h_4}\right), \text{ etc.} \quad (8)$$

また、 $H_1 = H_0 - h_1, H_2 = H_1 - h_2, \text{ etc.}$  より、

$$H_0 = \frac{h_1^2}{h_1 - h_2}, \text{ or } H_1 = \frac{h_2^2}{h_2 - h_3}, \text{ etc.} \quad (9)$$

(9)式は平衡水位を予測するのに便利である。このように、水頭比あるいは平衡比または連続した圧力間の比が等時間間隔で変化する場合は、基本タイムラグは(5)、(7)、(8)式を用いて求めることができる。しかしながら、実際には多くの測定誤差を含むことから、図-5に示すように、水頭比(または平衡比)と時間の関係を片対数紙にプロットして確認することが得策である。理論の基礎とする仮定が十分に満たされている場合には、プロットした点は図の平衡比(または水頭比  $H/H_0 = 1.0$ )と時間の原点を通る直線上に並び、水頭比  $H/H_0 = 0.37$  に対応した時間は基本タイムラグ  $T_B$  に相当する。

透水係数は基本タイムラグを決定することにより、(3)式を用いて計算できる。すなわち、次式による。

$$k = \frac{A}{F \cdot T_B} \quad (10)$$

また、変水位の場合、一定の地下水位においてスタンドパイプ内の水頭  $H_1, H_2$  がそれぞれ時刻  $t_1$  と、 $t_2$  に対応するとすれば、(5)式から次式が得られる。

$$t_1 = T_B \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right), \quad t_2 = T_B \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$$

$$t_2 - t_1 = T_B \left( \ln\frac{H_0}{H_2} - \ln\frac{H_0}{H_1} \right) = \frac{A}{F \cdot k} \ln\frac{H_1}{H_2}$$

$$\therefore k = \frac{A}{F \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\frac{H_1}{H_2} \quad (11)$$

この(11)式は、室内変水位透水試験で透水係数を決定するために用いられる計算式と同じである。この場合にも、理論の仮定が満足される場合には、時間  $t$  に対する水位差  $H$  を片対数紙にプロットすると直線上に並ぶことになる。したがって、透水係数の計算は図解法により得られた勾配と形状係数  $F$  を用いて計算することができる。

Hvorslevはいろいろなタイプの観測井や水位測定装置に対する形状係数  $F$  を多くの研究者の成果を集約することによって、透水係数を計算する式として図-6に示すようにまとめた。

地盤工学会基準 (JGS 1314-1995)<sup>9)</sup> では、透水係数の計算は被圧帯水層の場合には図-6のケースFを、不圧帯水層の場合にはケースGを用いることとしている。しかし、形状係数  $F$  は取水口への水の流入に関する係数であり、試験に伴う地下水位の低下すなわち帯水層の厚さの変化を考慮しない条件での解釈に基づいている。したがって、帯水層が不圧もしくは被圧条件のいずれかで形状係数を選択するのではなくて、取水口の上端に難透水の境界面を持つ場合にケースFを、取水口が一般的な透水層の中にある場合にはケースGを用いるのが正しい。

### 3.2 Bouwer and Rice法による透水係数

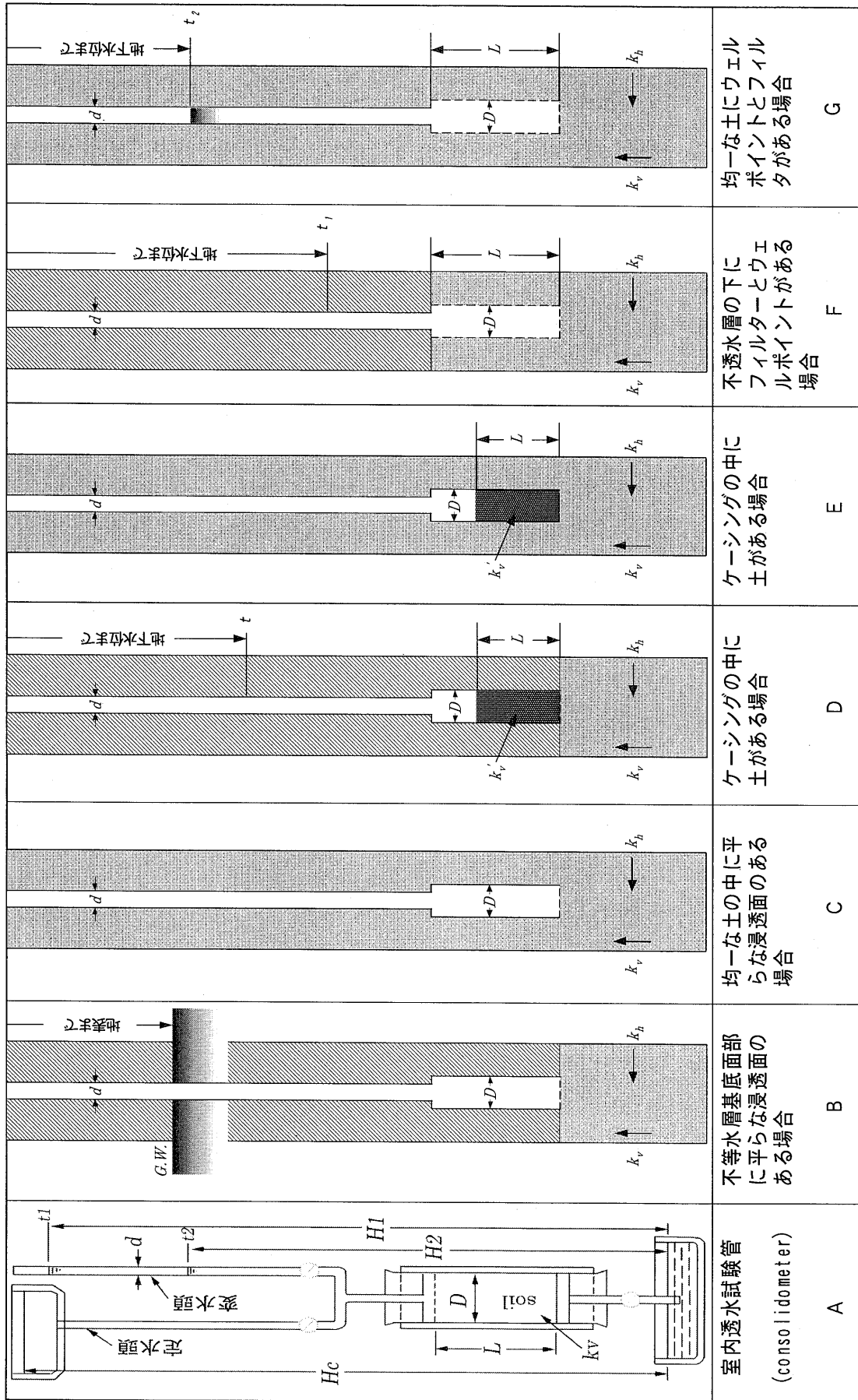
Bouwer and Rice(1976)は、貯留係数  $S$  の影響を無視すると仮定して、図-7に示す条件において、井戸に流れ込む水量  $Q$  はThiem (1907) の式によって与えられるとした。

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L_e \cdot H}{\ln(R_e/r_w)} \quad (13)$$

ここに、 $R_e$  は水位差  $H$  がゼロとなる有効半径である。すなわち、(13)式は内径周面積  $2\pi r_w L_e$ 、外径周面積  $2\pi R_e L_e$ 、流線長  $(R_e - r_w)$  を持つ放射流透水試験の式を表す。そこで、実験的に電気相似モデルを用いて、完全貫入井戸と部分貫入井戸の場合における係数  $\ln(R_e - r_w)$  の値を次のように決定した。

完全貫入井戸の場合

$$\ln(R_e/r_w) = \left[ \frac{1.1}{\ln(L_w/r_w)} + \frac{C}{L_e/r_w} \right]^{-1} \quad (14)$$



室内透水試験管  
(consolidometer)

不均一な土の中に  
フィルタとウエル  
ポイントがある場合

不均一な土の中に  
ケーシングの土がある場合

不均一な土の中に  
ケーシングの土がある場合

不均一な土の中に  
平らな浸透面のある  
場合

不均一な土の中に  
平らな浸透面のある  
場合

不均一な土の中に  
ウエルとフィルタ  
がある場合

A

B

C

D

E

F

G

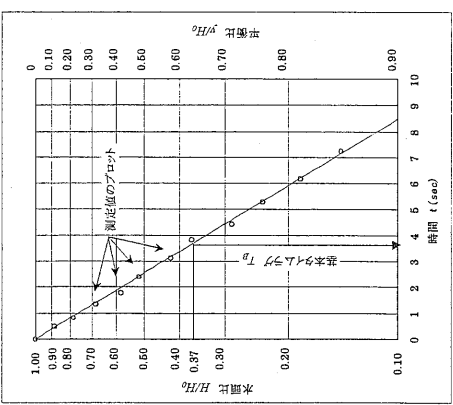
Case	定水位	変水位	基本タイムラグ	記号
A	$k_v = \frac{4 \cdot q \cdot L}{\pi \cdot D^2 \cdot H_c}$	$k_v = \frac{d^2 \cdot L}{D^2 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_v = \frac{L}{t_2 - t_1} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $d = D$	$k_v = \frac{d^2 \cdot L}{D^2 \cdot T_b}$ $k_v = \frac{L}{T_b}$ for $d = D$	$D =$ 取水口またはサンプルの径 (cm) $d =$ スタンドパイプの径 (cm) $L =$ 取水口またはサンプルの長さ (cm) $H_c =$ 定水位での水頭 (cm) $H_1 = t = t_1$ における水頭 (cm) $H_2 = t = t_2$ における水頭 (cm) $q =$ 流量 (cm <sup>3</sup> /sec) $t =$ 時間 (sec) $T_b =$ 基本タイムラグ (sec) $k_v =$ ケーシング内の土の鉛直透水係数 (cm/sec)
B	$k_m = \frac{q}{2 \cdot D \cdot H_c}$	$k_m = \frac{\pi \cdot d^2}{8 \cdot D \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_m = \frac{\pi \cdot L}{8 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $d = D$	$k_m = \frac{\pi \cdot d^2}{8 \cdot D \cdot T_b}$ $k_m = \frac{\pi \cdot D}{8 \cdot T_b}$ for $d = D$	
C	$k_m = \frac{q}{2.75 \cdot D \cdot H_c}$	$k_m = \frac{\pi \cdot d^2}{11 \cdot D \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_m = \frac{\pi \cdot D}{11 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $d = D$	$k_m = \frac{\pi \cdot d^2}{11 \cdot D \cdot T_b}$ $k_m = \frac{\pi \cdot D}{11 \cdot T_b}$ for $d = D$	
D	$k_v' = \frac{4 \cdot q \cdot \left( \frac{\pi \cdot k_v' \cdot D}{8 \cdot k_v \cdot m} + L \right)}{\pi \cdot D^2 \cdot H_c}$	$k_v' = \frac{d^2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot k_v' \cdot D}{8 \cdot k_v \cdot m} + L \right)}{D^2 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_v = \frac{\pi \cdot D + L}{8 \cdot m} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $\left\{ \begin{matrix} k_v' = k_v \\ d = D \end{matrix} \right\}$	$k_v' = \frac{d^2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot k_v' \cdot D}{8 \cdot k_v \cdot m} + L \right)}{D^2 \cdot T_b} + L$ $k_v = \frac{\pi \cdot D + L}{8 \cdot m} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $\left\{ \begin{matrix} k_v' = k_v \\ d = D \end{matrix} \right\}$	$k_v =$ 地盤の鉛直透水係数 (cm/sec) $k_h =$ 地盤の水平透水係数 (cm/sec) $k_m =$ 地盤の平均透水係数 (cm/sec) $m =$ 透水係数の比率 $k_m = \sqrt{k_h \cdot k_v}$ $m = \sqrt{k_h/k_v}$ $\ln = \log_e = 2.3 \log_{10}$
E	$k_v' = \frac{4 \cdot q \cdot \left( \frac{\pi \cdot k_v' \cdot D}{11 \cdot k_v \cdot m} + L \right)}{\pi \cdot D^2 \cdot H_c}$	$k_v' = \frac{d^2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot k_v' \cdot D}{11 \cdot k_v \cdot m} + L \right)}{D^2 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_v = \frac{\pi \cdot D + L}{11 \cdot m} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $\left\{ \begin{matrix} k_v' = k_v \\ d = D \end{matrix} \right\}$	$k_v' = \frac{d^2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot k_v' \cdot D}{11 \cdot k_v \cdot m} + L \right)}{D^2 \cdot T_b}$ $k_v = \frac{\pi \cdot D + L}{11 \cdot m} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $\left\{ \begin{matrix} k_v' = k_v \\ d = D \end{matrix} \right\}$	
F	$k_h = \frac{q \cdot \ln \left[ \frac{2mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{2mL}{D} \right)^2} \right]}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot H_c}$	$k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left[ \frac{2mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{2mL}{D} \right)^2} \right]}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left( \frac{4mL}{D} \right)}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $\frac{2mL}{D} > 4$	$k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left[ \frac{2mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{2mL}{D} \right)^2} \right]}{8 \cdot L \cdot T_b}$ $k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left( \frac{4mL}{D} \right)}{8 \cdot L \cdot T_b}$ for $\frac{2mL}{D} > 4$	
G	$k_h = \frac{q \cdot \ln \left[ \frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{mL}{D} \right)^2} \right]}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot H_c}$	$k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left[ \frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{mL}{D} \right)^2} \right]}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ $k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left( \frac{2mL}{D} \right)}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2}$ for $\frac{mL}{D} > 4$	$k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left[ \frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{mL}{D} \right)^2} \right]}{8 \cdot L \cdot T_b}$ $k_h = \frac{d^2 \cdot \ln \left( \frac{2mL}{D} \right)}{8 \cdot L \cdot T_b}$ for $\frac{mL}{D} > 4$	

図-6 透水係数の計算式 (Hvorslev, 1951)

既定条件  
 取水口の土は無眼に深く方向性は等方性(但し $k_v$ は一定)一乱れがなく、分層されなく、膨張もなく、圧縮されない。  
 フィルター部分で沈積せず、漏れもない、土の中に気泡がない、ウェルポイント、パイプに気泡がない、パイプ、ウェルポイントフィルターの気泡は無視できる。

Fig. 6 Equations to determine soil permeability for piezometers

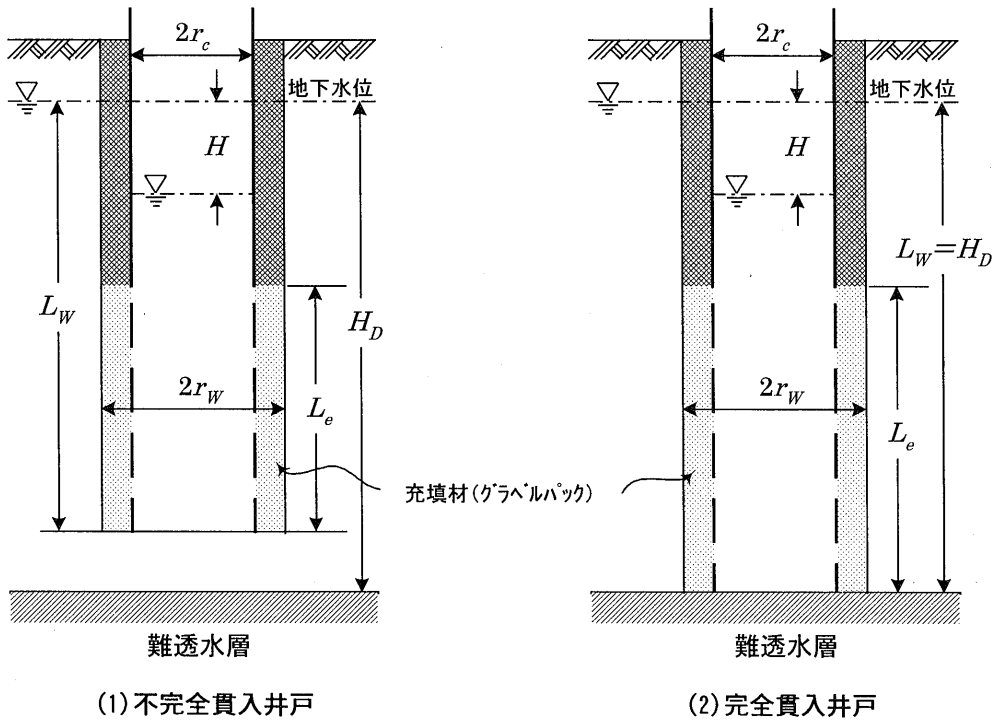


図-7 不圧帯水層における部分貫入井戸と完全貫入井戸の構成と記号 (Bouwer and Rice, 1976)  
 Fig.7 Geometry and symbols of both perfectly and partially penetrated to bottom of aquifer in unconfined aquifer.

部分貫入井戸の場合

$$\ln(R_e/r_w) = \left[ \frac{1.1}{\ln(L_w/r_w)} + \frac{A+B \cdot \ln\{(H_D-L_w)/r_w\}}{L_e/r_w} \right]^{-1} \quad (15)$$

ここで、 $A, B$  および  $C$  は  $L_e/r_w$  の関数として図-8 に示す無次元数である。

また、水位差  $H$  が小さく地下水位に影響が無いと想定することにより、不圧帯水層への適用に拡張できるとした。

つぎに、ある任意の時刻において、井戸に流れ込む水量は次のように表せる。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q}{\pi \cdot r_c^2} \quad (16)$$

したがって、(1), (4)式より、

$$\begin{aligned} -\pi \cdot r_c^2 \left( \frac{dH}{dt} \right) &= \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L_e \cdot H}{\ln(R_e/r_w)} \\ -\frac{1}{H} dH &= \frac{2 \cdot k \cdot L_e}{r_c^2 \cdot \ln(R_e/r_w)} \cdot dt \end{aligned}$$

$t = 0$  のとき  $H = H_0$ 、 $t = t$  のとき  $H = H_t$  で両辺を積分する。

$$\begin{aligned} \int_{H_0}^{H_t} -\frac{1}{H} dH &= \int_0^t \frac{2 \cdot k \cdot L_e}{r_c^2 \cdot \ln(R_e/r_w)} \cdot dt \\ \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) &= \frac{2 \cdot k \cdot L_e}{r_c^2 \cdot \ln(R_e/r_w)} \cdot t \end{aligned}$$

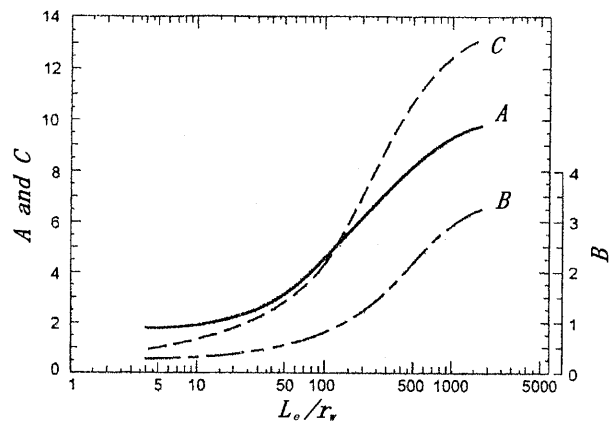


図-8  $L_e/r_w$  と係数  $A, B, C$  との関係曲線 (Bouwer and Rice, 1976)

Fig.8 Curves relating coefficients  $A, B$ , and  $C$  to  $L_e/r_w$ .

つまり、透水係数は次式で表される。

$$k = \frac{r_c^2 \cdot \ln(R_e/r_w)}{2 \cdot L_e} \cdot \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) \quad (17)$$

(17)式は、Hvorslevの(11)式と同様に、時間  $t$  に対する水位差  $H$  が片対数紙上では直線上に並ぶことを示している。すなわち、直線の勾配は次により決定される。

$$\frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) = \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H_1}\right) = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right), \text{ etc.} \quad (18)$$



3.3 速度曲線による静的な地下水位の補正

実際、Hvorslev法ならびにBouwer and Rice法を用いた図解法において、時間  $t$  に対する水位差  $H$  が片対数紙上で直線上に並ぶことは少ない。すなわち、それぞれの解釈を阻害する何らかの誤差が含まれていることになる。

Chapuis et al.(1981) は、その誤差の主な原因は試験時の静的な地下水位の仮定にあるとし、次の速度曲線による補正方法を提案した。

先に示した(2)式は、次のように書き換えられる。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{F \cdot k}{A} \cdot (z - y) \quad (19)$$

この式は水位の変化速度  $dy/dt$  と水位差  $H = z - y$  は、原点を通る一次関数であることを表している。すなわち、横軸に水位変化速度  $\Delta H/\Delta t$ 、縦軸に水位差  $H$  をプロットすると、そのプロットは  $F \cdot k/A$  に等しい勾配  $a$  を持ち、図の原点を通る直線上に並ぶことになる。もし、縦軸の水位差  $H$  に切片  $H_0$  が現れたならば、それは試験時の地下水位を誤って評価していることを示し、地下水位を  $H_0$  までシフトしなければならないとするものである。そして、その傾き  $a$  からは次式を用いて透水係数が算出される。

$$a = \frac{F \cdot k}{A} \quad \text{より、} \quad k = \frac{a \cdot A}{F} \quad (20)$$

さらに、Chapuis (1998) はCooper et al.(1967)の提案した貯留係数  $S$  を考慮しなければならないとしたスラグ試験の解析解について、実際に行なわれた多くのスラグ試験結果を速度曲線で静的な地下水位を解析することによって、貯留係数  $S$  はほとんど無視できるとした。そして、速度曲線で静的な地下水位を解析することで、Hvorslev法ならびにBouwer and Rice法による透水係数の評価が有効であるとした。

4. 適用例

つくば技術開発センターの敷地において実施したスラグ透水試験結果の評価例を示す。

4.1 礫混じり砂層 (G.L. -11.00 m ~ 11.40 m)

スラグ試験により観測した孔内水位の経時変化図を図-9に示す。試験の対象となった地層は、 $N$  値 30 ~ 50 以上の砂礫層で、10 m 付近の粘性土層下に分布する被圧帯水層を構成する。この帯水層は、層相を変化させながら深度 21.7 m まで連続している。試験孔はベントナイトを投入した孔底に 2 インチガス管を打設し、その中を清水を用いて掘削洗浄した。対象とする地層には礫を混入することから、削孔による坑壁の乱れや拡孔を避けるため、試験孔の長さを 40 cm と通常より短くした。試験区間の形状は内径 5.3 cm 円筒形の裸孔である。試験は、

試験孔を設けた翌朝に水位下降試験（以下下降法という）に引き続いて水位上昇試（以下上昇法という）を行なった。

スラグの容積により約 50 cm の孔内水位の変動を与えているが、下降法ではスラグの投入に伴う衝撃の影響が初期の孔内水位に現れるため、解析に用いる初期値はこの影響の直後とする必要がある。一方、上昇法ではスラグの引き上げの影響は少ないが、水位上昇をはじめて 10 数秒の間の水位回復速度が速いことが判る。これを、速度曲線 ( $H \sim \Delta H/\Delta t$  関係図) と  $\ln(H - H_0) \sim t$  関係図として図-10に示すように、従来の回復法試験で時々見られる“二直線結果”となっている。この場合、初期の急な勾配は試験孔（取水口）への地下水の流入に伴って孔壁が崩壊もしくは緩み（変形）が生じたことにより、過大な水位変動を表しているものと考えられる。したがって、それぞれ変化曲線の後半の傾向（ $t$  の後半ならびに  $\Delta H/\Delta t$  の小さい部分）に着目して、直線勾配を決定することが重要である。さらに、速度曲線の二直線の交点から水位差  $H$  を 14 cm シフトすること（ $H_0 = 14.0$  cm と同じ）で、図-11の水頭比  $H/H_0$  と時間  $t$  の関係図を補正することができる。

これらの図を用いて透水係数が解析されるが、まず下降法の結果は速度曲線から  $H_0 = 1.5$  cm の水位補正が必要と判断される。この補正に基づいた  $\ln(H - H_0) \sim t$  関係図から決定される直線勾配からは、Hvorslev法

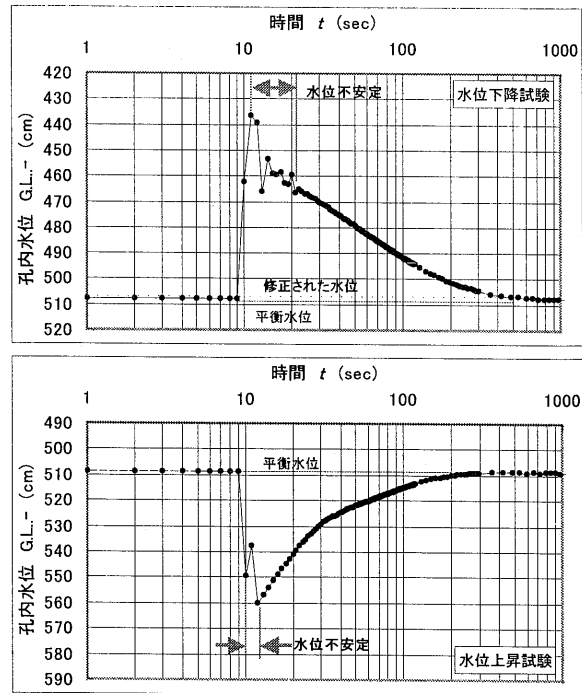
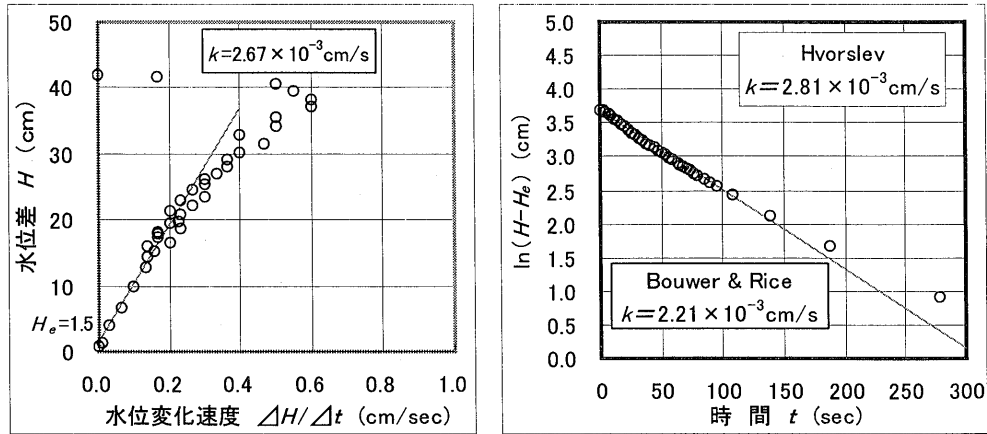
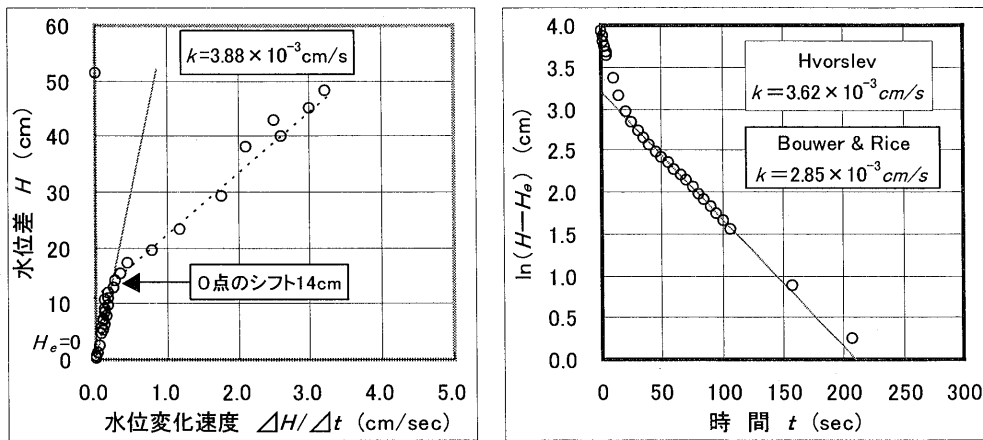


図-9 スラグ試験による孔内水位経時変化図（礫混じり砂層、G.L. -11.00 m ~ 11.40 m）

Fig.9 Semi-log graphs time versus head level recorded during the two slug tests.



(1) 水位下降試験



(2) 水位上昇試験

図-10 速度曲線と  $\ln(H-H_0) \sim t$  関係図 (礫混じり砂層, G.L. -11.00 m ~ 11.40 m)

Fig.10 Velocity graphs and semi-log graphs time versus displacement  $(H-H_0)$  recorded during the two slug tests.

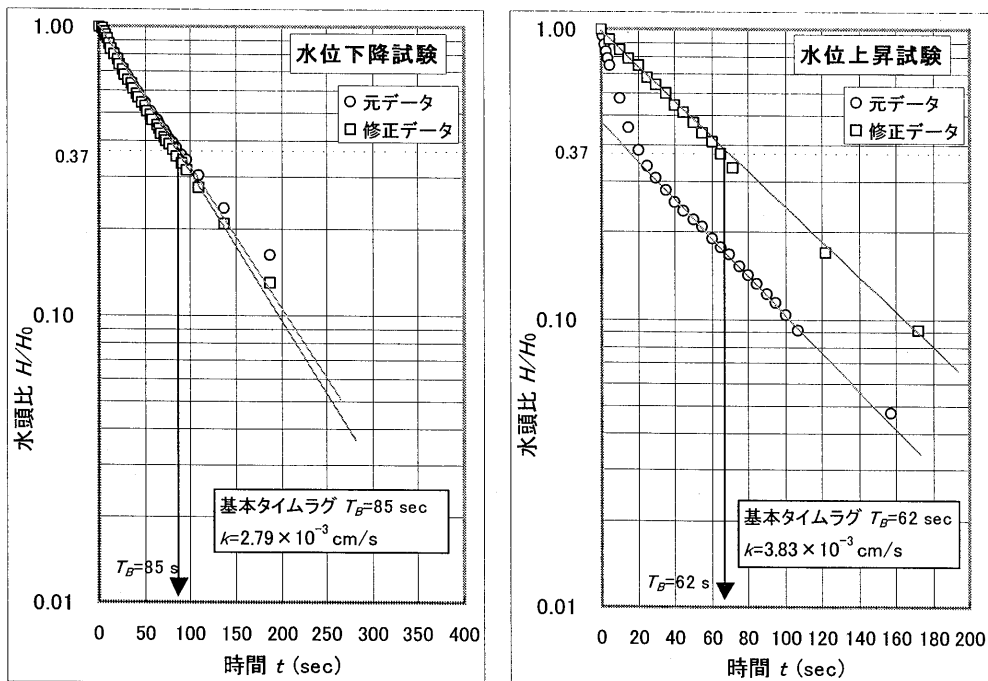
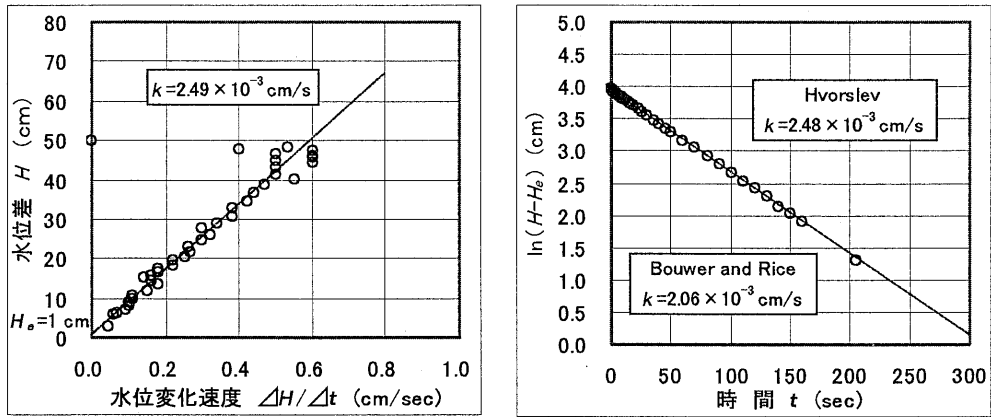


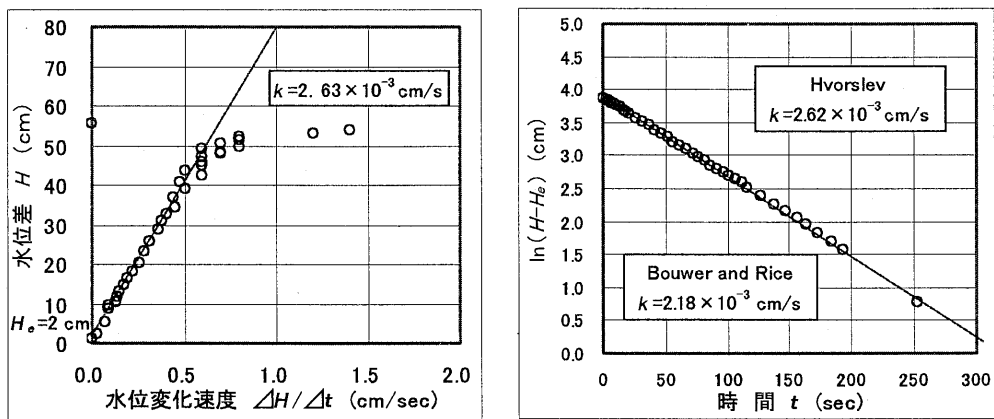
図-11 水頭比と時間関係図 (礫混じり砂層, G.L. -11.00 m ~ 11.40 m)

Fig.11 Semi-log graphs time versus head ratio recorded during the two slug tests.





(1)水位下降試験



(2)水位上昇試験

図-13 速度曲線と  $\ln(H-H_0) \sim t$  関係図 (細砂層, G.L. -15.00 m ~ 15.50 m)

Fig.13 Velocity graphs and semi-log graphs time versus displacement ( $H-H_0$ ) recorded during the two slug tests.

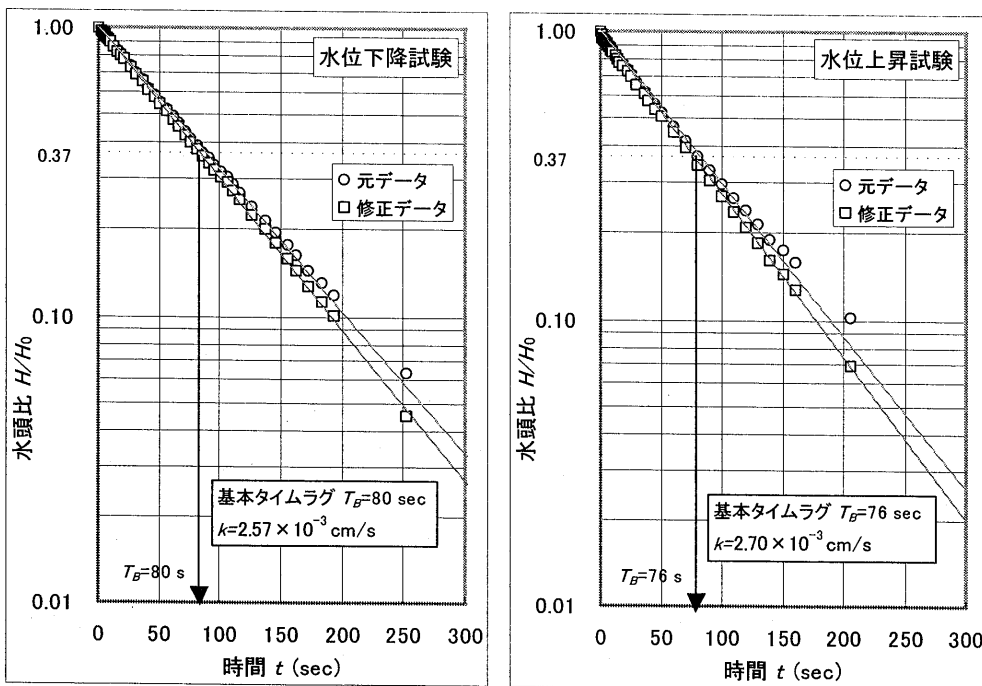


図-14 水頭比と時間関係図 (細砂層, G.L. -15.00 m ~ 15.50 m)

Fig.14 Semi-log graphs time versus head ratio recorded during the two slug tests.

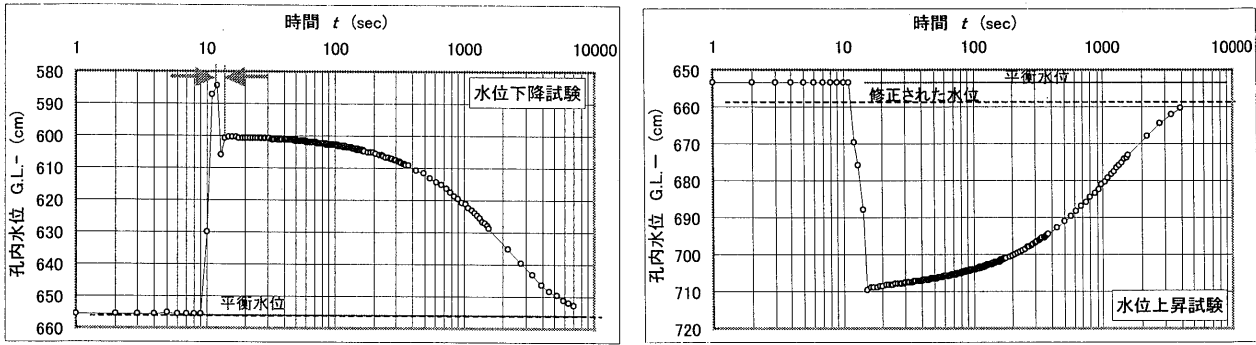


図-15 スラグ試験による孔内水位経時変化図 (貝殻混じり細砂層, G.L. -19.10m ~19.60m)  
 Fig.15 Semi-log graphs time versus head level recorded during the two slug tests.

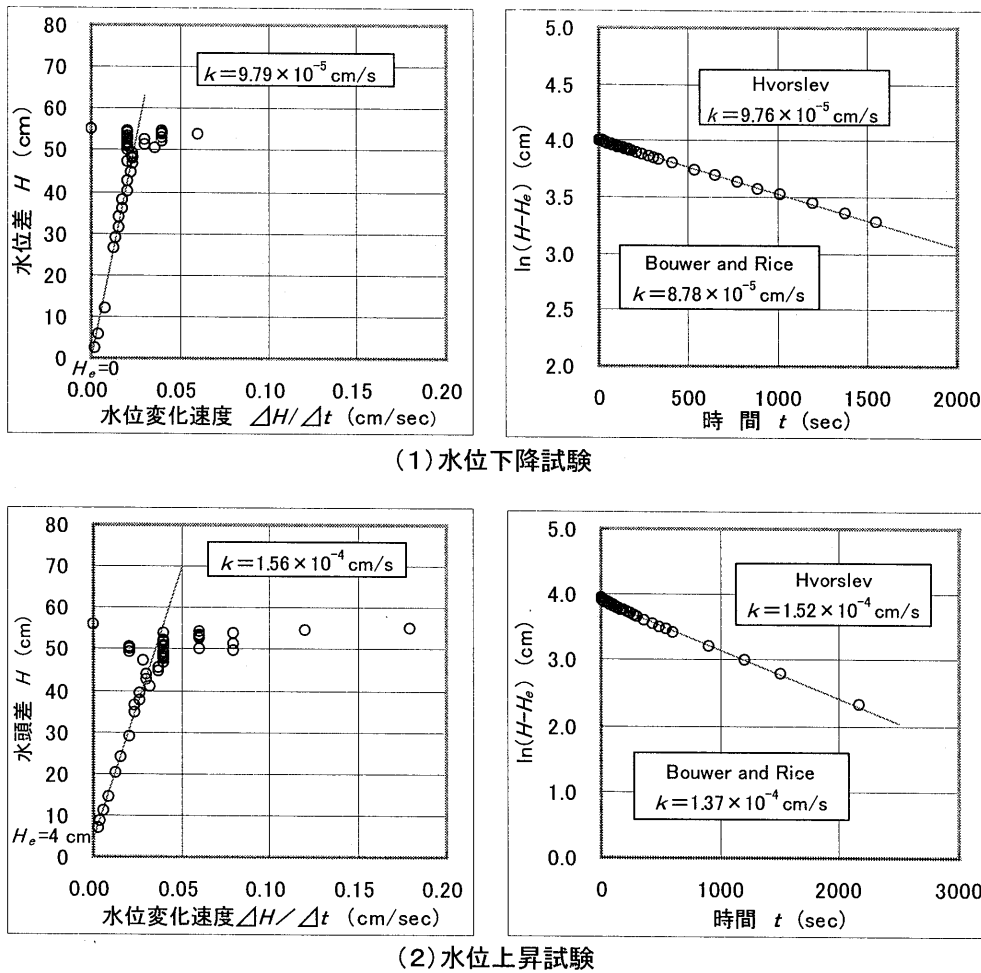


図-16 速度曲線と  $\ln(H-H_0) \sim t$  関係図 (貝殻混じり細砂層, G.L. -19.10 m ~19.60 m)  
 Fig.16 Velocity graphs and semi-log graphs time versus displacement ( $H-H_0$ ) recorded during the two slug tests.

翌朝に下降法を、さらに翌日に上昇法を行なった。

下降法の場合には、やはりスラッグの投入による衝撃の影響で初期の水位が不規則に変動することが判る。つぎに、速度曲線 ( $H \sim \Delta H / \Delta t$  関係図) と  $\ln(H - H_e) \sim t$  関係図を図-16に示す。速度曲線から、静的な地下水位の補正量は下降法で0 cm, 上昇法で4 cmであると考えられる。水頭比  $H/H_0$  と時間  $t$  の関係を図-17に示す。補正の必要が無いとされた下降法の測定データは、 $H/H_0 = 1.0, t = 0$  を原点とする直線上に並び、理論の適用が確認できる。しかし、補正が必要とされた上昇法の測定データは、下に凸の分布を示して理論の適用が不可能であることを示し、補正されたデータは  $H/H_0 = 1.0, t = 0$  を原点とする直線上に並ぶことが良く判る。そして、補正された  $\ln(H - H_e) \sim t$  関係図から計算される Hvorslev法による透水係数は、速度曲線の勾配から計算される透水係数とほぼ一致することが判る。

以上により計算された透水係数を以下に示す。

Hvorslev 法

$\ln H \sim t$  関係図より、 上昇法  $k = 1.52 \times 10^{-4}$  cm/s,  
 下降法  $k = 9.76 \times 10^{-5}$  cm/s  
 基本タイムラグより、 上昇法  $k = 1.71 \times 10^{-4}$  cm/s,  
 下降法  $k = 9.79 \times 10^{-5}$  cm/s  
 速度曲線より、 上昇法  $k = 1.56 \times 10^{-4}$  cm/s,  
 下降法  $k = 9.79 \times 10^{-5}$  cm/s

Bouwer and Rice法

$\ln H \sim t$  関係図より、 上昇法  $k = 1.37 \times 10^{-4}$  cm/s,  
 下降法  $k = 8.78 \times 10^{-5}$  cm/s  
 上昇法と下降法で透水係数の差が大きく、下降法から

求めた透水係数は上昇法の透水係数の約60%である。この原因として、対象とした地層には貝殻片が多く混入されることから、掘削時に生じた試験区間(取水口)の孔壁の乱れが影響したものと考えられる。すなわち、試験区間の乱れが下降法では孔内水の流出の妨げとなり、上昇法では孔壁の崩壊や緩みの発生により過大な地下水の流入を生じたと考えられる。この試験結果では、静的な地下水位の補正が必要で無いと判断された下降法の結果がより正しく土の透水係数を表しているものと考えられる。また、それぞれの試験法において、Hvorslev法からはいずれの計算方法においても同じ透水係数が計算され、Bouwer and Rice法はHvorslev法よりやや小さい透水係数を示す。

4.4 試験結果のまとめ

つくば技術開発センターで実施したスラッグ試験より、各手法を用いて算出した透水係数を表-2に一覧する。これらの結果より、スラッグ透水試験について以下にまとめる。

- ① 従来の現場透水試験に比べ、スラッグ試験は短時間で終了し、Hvorslev法やBouwer and Rice法の適用が可能である。
- ② 速度曲線による静的な地下水位の補正により、より正しいHvorslev法やBouwer and Rice法の適用が可能となる。補正の結果、Hvorslev法やBouwer and Rice法で求めた透水係数は補正前に比べて約10%高くなる。
- ③ 修正データを用いた場合、Hvorslev法である  $\ln$

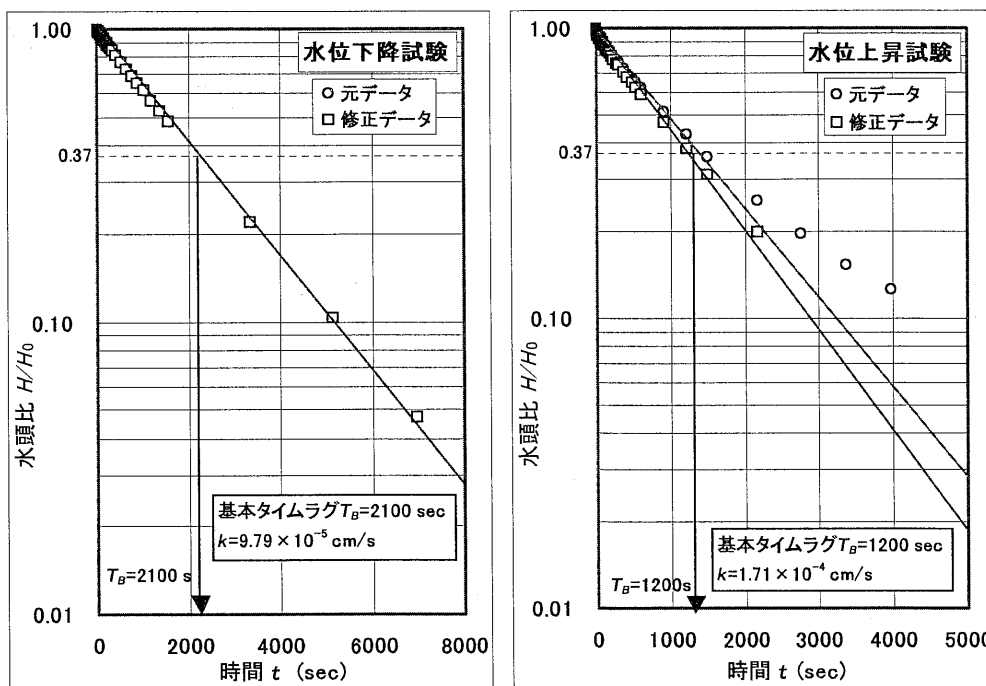


図-17 水頭比と時間関係図 (貝殻混じり細砂層, G.L. -19.10 m ~ 19.60 m)  
 Fig.17 Semi-log graphs time versus head ratio recorded during the two slug tests.

表-2 スラグ透水試験結果一覧表

Table 2 Results of soil permeability calculated from each methods.

場所：OYOつくば技術開発センター

深度 G.L.-m	対象土質	試験 方法	元データの解析		修正データの解析結果					
			Hvorslev法 透水係数 (cm/sec)	B & R 法 / Hvorslev法	Hvorslev法 透水係数 (cm/sec)	Hvorslev法の透水係数に対する比				下降法 / 上昇法
						元データ Hvorslev法	B & R 法	基本タイムラグ	速度曲線法	
11.50~11.40	礫混じり砂	上昇法	3.59E-03	0.79	3.62E-03	0.99	0.79	1.06	1.07	0.78
		下降法	2.68E-03	0.79	2.81E-03	0.95	0.79	0.99	0.95	
15.00~15.50	細砂	上昇法	2.43E-03	0.83	2.62E-03	0.93	0.83	0.98	1.00	0.95
		下降法	2.31E-03	0.83	2.48E-03	0.93	0.83	1.04	1.00	
17.10~17.60	貝殻混じり細砂	上昇法	8.20E-04	0.86	9.03E-04	0.91	0.86	0.99	0.99	0.68
		下降法	5.99E-04	0.86	6.13E-04	0.98	0.86	1.08	1.08	
19.10~19.60	貝殻混じり細砂	上昇法	1.41E-04	0.89	1.52E-04	0.93	0.90	1.13	1.03	0.64
		下降法	9.76E-05	0.90	9.76E-05	1.00	0.90	1.00	1.00	
25.50~27.50	シルト	上昇法	1.83E-05	0.84	4.18E-05	0.44	0.84	1.13	0.90	0.67
		下降法	2.00E-05	0.84	2.81E-05	0.71	0.84	1.00	1.12	
32.10~32.60	シルト混じり細砂	上昇法	9.23E-04	0.87	1.26E-03	0.73	0.87	0.90	1.03	0.07
		下降法	7.29E-05	0.87	8.67E-05	0.84	0.87	0.95	1.00	
36.10~36.60	細砂	上昇法	1.53E-02	0.93	1.60E-02	0.96	0.93	1.07	1.04	0.45
		下降法	6.82E-03	0.93	7.16E-03	0.95	0.93	0.96	0.93	
平均				0.86		0.87	0.86	1.02	1.01	0.60

$H \sim t$  関係図,  $H/H_0 \sim t$  関係図 (基本タイムラグ法),  $H \sim \Delta H/\Delta t$  関係図による図解法からは, ほぼ同じ透水係数が計算される。したがって, データの解釈が困難な場合には, それぞれの結果が等しくなるように図解法を行なうことにより, 結果の解釈が容易になる。

- ④  $\ln H \sim t$  関係図より, Bouwer and Rice法を用いて求めた透水係数は, Hvorslev法を用いて求めた透水係数の79~93%の値となる。これは, Chapuis(1998)の比較試験結果と同じ傾向であり, この程度の差が生じることを認識する必要がある。
- ⑤ 水位下降試験による透水係数は, 水位上昇試験による透水係数の7~95%になり, 平均では60%であった。唯一1オーダー近い差が生じたものの, 従来法に比べてそれぞれの試験法の差は小さい。礫や貝殻などを混入する土を対象とした試験では, 試験区間(取水口)の状態が試験結果に影響を及ぼすことから, その差は大きくなるものと考えられる。しかし, 深度が浅い場合ならびに透水係数が大きな土(細粒分の少ない土)を対象とした場合には, それぞれの試験結果の差は非常に小さくなる。

5. あとがき

スラグ試験はスタンドパイプ内に任意の小さな水位差を素早く与えることができ, 短時間で地下水位への平衡を計測できることから, Hvorslev法やBouwer and Rice法の理論の仮定に適合した変水位試験である。現場実験において, スラグ試験が幅広い透水係数の土へ適用できることが確認できた。さらに, 速度曲線(Chapuis et al., 1981)による静的な地下水位の補正方法は, 簡便で結果の解釈を判りやすく評価できることが確認できた。

従来の現場透水試験では, 翌朝水位を平衡水位として使い,  $\ln H \sim t$  関係図の図解法では初期の急な曲線の勾配を採用する(経験的に高い透水係数を評価するという習慣)など, 透水係数の計算式の理論的背景を省みない評価法が行われている場合も多い。

今後, スラグ透水試験が従来の現場透水試験に代わって適用されることにより, 正しい土の透水係数評価が可能となり, 試験の信頼性向上にも役立つものと思われる。つくば技術開発センターでは, スラグ透水試験用の小型水位トランスジューサーとデータロガー, さらに解析用ソフトを開発したので, 今後これらを用いたスラグ透水試験の普及が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Hvorslev, M.J. : Time-lag and soil permeability in ground water observations, U.S. Army Engineering Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, Bulletin 36, April, 1951.
- 2) 小松田精吉, 平山光信, 鹿野浩司 : 地盤の透水性定数を求める2, 3の新しい調査法, 土質工学会, 土と基礎, Vol.37, No.6, Ser.No.379, pp.75~79, 1989.
- 3) Chapuis, R.P. : Overdamped slug test in monitoring wells: review of interpretation methods with mathematical, physical, and numerical analysis of storativity influence, Can. J. Geotech. J. 35, pp.697~719, 1998.
- 4) Chapuis, R.P., Pare, J.J., and Lavallee, J.G. : In situ variable head permeability tests, In proceedings of the 10th International Conference on Soil

- Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, June 15-19, Vol.1, pp.401 ~ 406, 1981.
- 5) Bouwer, H., and Rice, R. C. : A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 12(3), pp.423 ~ 428, 1976.
  - 6) 小川重之, 米森博喜 : 単孔法スラグ透水試験の再評価, 全地連「技術フォーラム2001」, pp.35 ~ 36, 2001.
  - 7) Ferris, J.G., and D.B. Knowles : The slug test for estimating transmissibility, *U.S. Geol. Surv. Ground Water Note* 26, pp.1 ~ 7, 1954.
  - 8) Cooper, H.H., Jr., Bredehoeft, J.D., and Papadopoulos, I.S. : Response of a finite-diameter well to an instantaneous change of water, *Water Resources Research*, 3(1), pp.263 ~ 269, 1967.
  - 9) (社)地盤工学会 : 地盤調査法, 第7編地下水調査, 第5章ボーリング孔を利用した透水試験, pp.288 ~ 293, 1995.