

単孔を利用した透水試験方法の非定常法における直線勾配法の解釈に関する検討

Interpretation of the Straight-line Technique of the Transient Method for Hydraulic Conductivity of Aquifer by Single Borehole Testing

小松満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

中本萌 Moe NAKAMOTO (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

単孔を利用した透水試験方法の非定常法における結果の整理方法のうち、直線勾配法により透水係数を求める理論式である Hvorslev 式は、その導入過程から初期定常状態からの試験データを適用するのが本来の形である。しかし、現在の地盤工学会基準の試験方法は、測定用パイプ内の水位を瞬時に変化させるスラグ試験が示されており、理論式の誘導過程の条件とは必ずしも一致しない。本研究では、被圧帯水層を対象とした数値解析により、スラグ試験結果を Hvorslev 式で評価した場合に求まる透水係数に含まれる誤差について、定常試験後に連続して非定常試験を行う場合と比較する形で検討した。

キーワード：原位置透水試験，透水係数，直線勾配法，スラグ試験（IGC：D-04）

1. はじめに

地下水に関する諸問題は以前より存在しているが、近年それらはますます複雑化している。地盤の浸透特性に基づき、実際の地下水の挙動を正確に把握するためのシミュレーション技術は電気計算機の汎用化及び高精度化に伴って高度化している¹⁾。数値解析手法による地下水シミュレーションは、モデルの選定・設定を適切に行なえば、理論解で解くことができない複雑な地盤条件や施工条件等での設計が可能となる有効なツールであるが、実際にはこれらの条件に即した解析モデルが使われていなかったり、入力すべき情報が十分でないにも関わらず高度な解析手法が使われていたりすることから、不適切な解析結果であっても定量的な評価は信頼されやすく、設計と施工の乖離が生じることが懸念される²⁾。

地下水シミュレーションを実施するにあたり、その入力情報の一つである透水係数は、地盤の特性を示す重要なパラメータである³⁾。最近では、理工学のさまざまな分野でデータ同化や逆問題の研究が活発に行われており、不均質地盤における透水係数の分布の評価に適用された事例が報告されている⁴⁾。しかし、これらの技術の実用化には、信頼性と計算速度を高めることが必要であり、現状での実務において、透水係数は室内透水試験及び原位置透水試験により直接測定されている⁵⁾。このうち、室内透水試験ではサンプリングした試料に対して諸条件の影響を除外した正確な透水係数を求めることができるが、実際の地盤の不均一性を考慮することができない。一方、原位置透水試験では気象条件や地下水変動等の影響を受けるものの、より実際の地盤状況に即した透水係数を求めることが可能である。

原位置透水試験⁶⁾には、揚水試験と単孔を利用した透

水試験（以下、単孔式透水試験と称する）があり、揚水試験は揚水井と複数の観測井を用いた一定揚水時の観測井における水位低下量から透水係数を求める試験である。帯水層全体の平均的な透水特性を評価することができる上に貯留性も得られ、信頼性が高い試験法であるものの、経済性の理由から比較的大規模な工事の際に実施されている。一方、単孔式透水試験は1本のボーリング孔や井戸を用い、測定用パイプ内で揚水あるいは注水した際の地下水位の回復または低下挙動から透水係数を求める試験である。ボーリング孔先端部、スクリーン設置部などの局所的な地盤の透水性を評価することができ、深さや位置を変えて複数回試験を行うことで三次元的評価が可能になる。しかし、透水係数の算定式の前条件や境界条件が満たされていない場合、信頼性が低下する懸念がある⁵⁾。つまり、試験方法や試験孔仕様の違いによる点、さらにはこれらに基づく理論解を必ずしも正しく適用していない点などが信頼性が低下する要因として挙げられる。

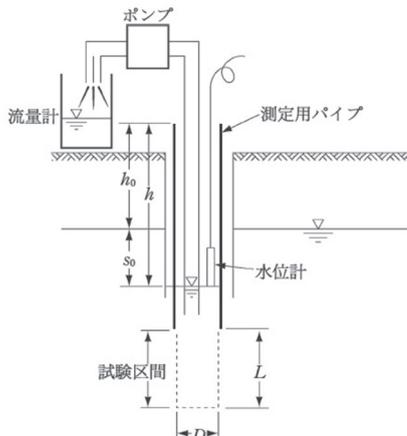
単孔式透水試験の試験方法には定常法と非定常法があるが、このうち非定常法における結果の整理方法は曲線一致法（Cooper 法）と直線勾配法（Hvorslev 法）が用いられる。曲線一致法が試験開始から平衡水位に達するまでのデータを用いるのに対し、直線勾配法は試験開始直後のデータを用いることから、平衡水位までのデータを用いないため、試験が早く終了し、結果の整理方法も簡易である等のメリットがある。しかし、水位差と時間の関係に直線が見られない場合には適用できない。元々、この直線勾配の理論式である Hvorslev 式は、定常式に非定常項を導入して誘導されており、初期定常状態からの試験データを適用するのが本来の形であると言える⁷⁾。しかし、現在の学会基準（JGS1314-2012）⁶⁾では、測定

用パイプ内の水位を瞬時に変化させるスラグ試験が示されており、理論式の誘導過程の条件とは必ずしも一致しない。そこで本研究では、被圧帯水層を対象とした数値解析により、スラグ試験結果を Hvorslev 式で評価した場合に求まる透水係数に含まれる誤差について、定常試験後に連続して非定常試験を行う場合と比較して検討した。

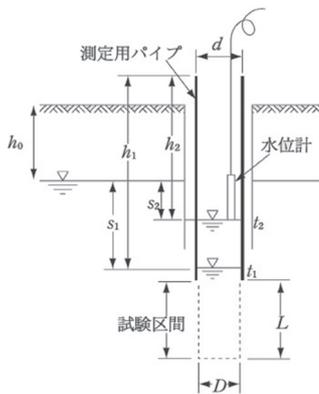
2. 現行の地盤工学会基準

2.1 単孔を利用した透水試験方法 (JGS1314-2012) ⁶⁾

単孔を利用した透水試験方法には前述のように、定常法と非定常法の2種類がある。図-1にこれらの試験方法の概要を示す。定常法は揚水または注水を続け、測定用パイプ内の水位が一定になったときの流量を測定して地盤の透水係数を求める方法である。非定常法は、測定用パイプ内の水位を一時的に低下または上昇させ、平衡状態に戻る時の水位変化を経時的に測定する方法であり、スラグ試験と呼ばれる。非定常法は、透水係数が 10^{-2} cm/s 程度以上と予想される砂質・礫質地盤においては、水位の経時変化が速く、計測しにくいため注意を要する。また、試験時間内に初期水位の90%程度まで水位が回復し、この時間に少なくとも10点以上の測定データが得られる際に適している。



(a) 定常法



(b) 非定常法

図-1 試験方法の概要 ⁶⁾

非定常法の試験結果の整理のうち、直線勾配法 (Hvorslev 法) は、図-2に示すように片対数グラフに平衡状態からの水位差 s (cm)と時間 t (s)をとって $\log_{10}s-t$ 曲線を作成し、得られた直線の勾配から透水係数を算定する方法であり、試験結果が地盤の貯留性の影響を受けていないと判断される場合に適用することができる。

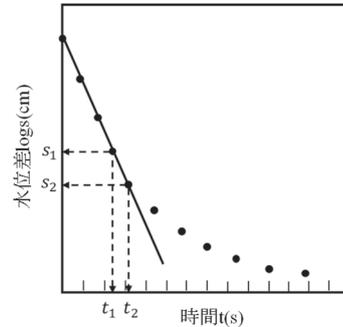


図-2 $\log_{10}s-t$ 曲線の例 ⁶⁾

2.2 非定常試験の理論的背景

非定常試験の2種類の方法は、透水係数 k を求める理論式の誘導における基礎式の元々の形が異なる。このうち、曲線一致法の Cooper 式は非定常試験時の地下水挙動を無限の広がりをもつ被圧帯水層内の二次元放射状流で表したときの支配方程式に基づいている。

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 S : 貯留係数 T : 透水量係数である。

一方、直線勾配法の Hvorslev 式は、下式のように定常式に非定常項を導入して誘導されている ⁷⁾。

$$KFH = -A \cdot \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

ここで、 K : 透水係数 H : 孔内外水位差 F : 形状係数、 A : 試験孔内外水位変動域のパイプ断面積である。

式(2)は試験孔に流入する流量によって孔内水位が上昇した時、帯水層は孔内水位に即座に呼応して定常になる、すなわち時間遅れが無い状態を表している。帯水層の貯留性が十分に小さい、または孔内貯留が十分に大きいと、孔内水位変動の影響が瞬時に帯水層に伝わるので、時間遅れが無いとみなすことができ、Hvorslev 式が成立する。一方、帯水層の貯留性が無視できないほど大きい、またはスラグ試験のように初期水位が定常状態でない場合、孔内水位変動の影響が瞬時に帯水層に伝わり難いので、Hvorslev 式では不整合が生じる。よって、帯水層内では、少なくとも孔内水位に呼応した水圧分布になっていることが必要条件であることから、図-3に示すような初期定常状態から非定常試験によるデータを適用するのが適切であると考えられる。しかし、実務で実施されている手法は、図-4に示すように、測定用パイプ内の水位を一時的に低下させるか上昇させるスラグ試験について整理している事例が多く、理論式の誘導過程の条件とは必ずしも一致しない。

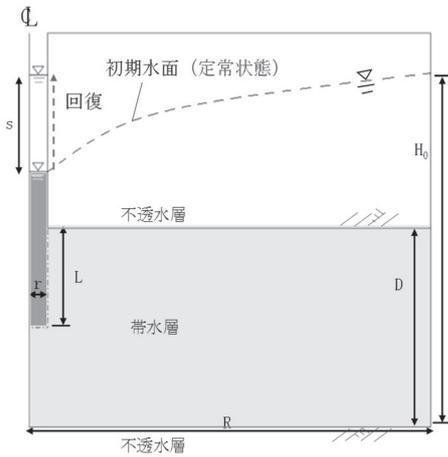


図-3 定常後の非定常試験概念図

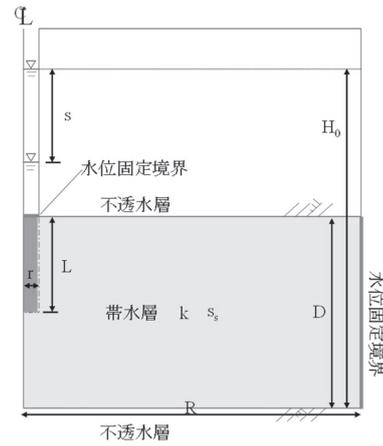


図-5 解析モデル図

表-1 解析条件

帯水層透水係数	$k=10^{-2}\text{cm/s}$
影響圏半径	$R=20\text{m}$
初期水頭	$H_0=700\text{cm}$
初期水位差	$s=200\text{cm}$
井戸半径	$r=4.3\text{cm}$
試験区間長	$L=206.4\text{cm}$
層厚	$D=412.8\text{cm}$

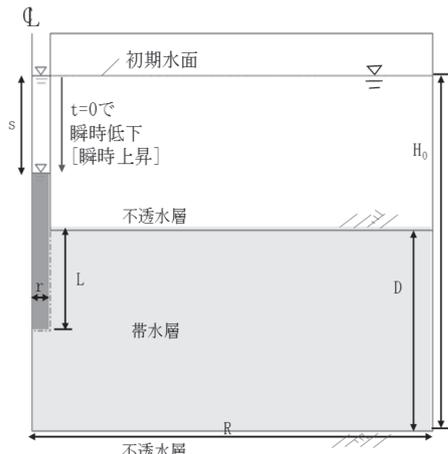
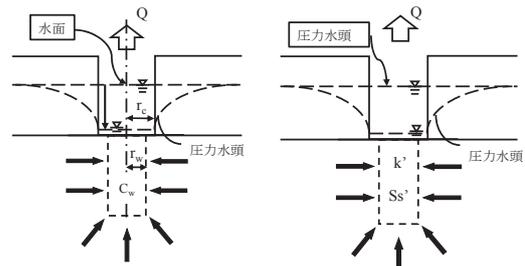


図-4 スラグ試験概念図



(a) 井戸貯留効果 (b) 等価井戸材質

図-6 井戸貯留項と等価な井戸材質モデル⁸⁾

3. 解析モデルおよび検討結果

3.1 解析モデル

図-5 および表-1 に本研究で用いた被圧帯水層の解析モデル図と解析条件を示す. ここで, 解析条件は任意の値を用いた. また, 井戸部分には図-6 に示すように井戸貯留と等価な特性を有する材質を与えた⁸⁾. この理由として, 数値解析で井戸貯留を考慮した場合, 井戸内水位が非線形境界条件として働き, 解の収束性が悪く, 繰り返し計算を行うことによる解析精度が低下することが懸念されるためである. なお, 用いた解析コードは二次元軸対称浸透流解析の AC-UNSAF2D³⁾である.

3.2 定常解析

3.2.1 定常時の流量計算

次式(3)で表される理論式から図-5 の解析モデルにおける定常流量を計算した結果, $Q=568.25\text{cm}^3/\text{s}$ となった.

$$Q = \frac{2\pi s L k}{\log_e\left(\frac{4\lambda L}{d}\right)} \quad (3)$$

ここで, s : 水位低下量(cm), d : 孔径(cm), L : 試験区間長(cm), Q : 流量(cm^3/s), λ : 異方性度である.

3.2.2 微小要素の有無に対する検討

井戸境界での極端に不均質な透水性に対応するため, 井戸底および井戸壁の内外に微小要素として縦横 1mm 幅の要素を入れた場合と入れていない場合の計算結果の違いを検討した. さらに, 井戸内の最も細かい要素の縦幅を井戸内の最小要素縦幅と定義し, 17.2, 8.6, 4.3, 2.15, 1.075cm の 5 段階に変化させて検討を行った. 図-7 に井戸内の最小要素縦幅と定常流量の変化を示す. 井戸底, 井戸壁内外に微小要素を入れることで, 流量の低下が見られ, 理論解の流量 $Q=568.25\text{cm}^3/\text{s}$ に近づいた. したがって, 井戸底および井戸壁内外に縦横 1mm 幅の微小要素を入れたモデルとした.

3.2.3 マトリックス解法の選択

次に, マトリックス解法として PCG 法 (間接解法) とガウスの消去法 (直接解法) の 2 つの解析手法を比較した. 一般的に, ガウスの消去法の方が計算精度が良好とされているが, 要素数が多くなるとマトリックスが大きくなり, 計算時間を要する. そこで, 精度に加え, 計算に要する時間も比較した. 図-8 に 2 つの方法による井戸

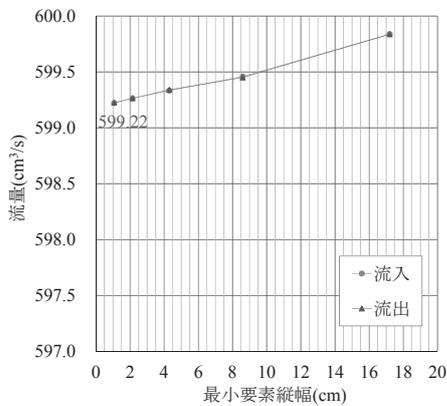
内の最小要素縦幅と定常流量の変化を示す。結果として定常流量に違いは認められなかった。なお、計算に要した時間は、PCG法が1.1秒、ガウスの消去法が2.0秒となった。計算時間もさほど変わりが無いため、以後の計算は精度が高いガウスの消去法とした。

3.2.4 井戸内の透水係数に関する検討

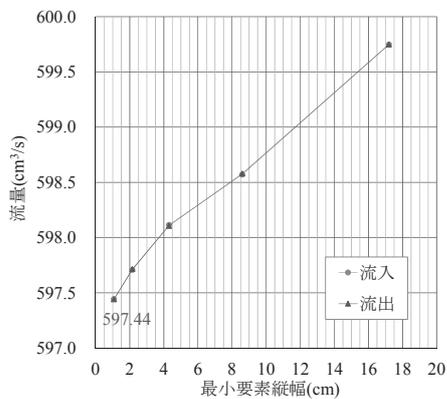
定常状態で井戸境界で同じ流量になるためには、透水係数が非常に高い井戸内では動水勾配が小さくなる。したがって、水頭差が非常に小さくなるために計算精度が低下する。そこで、井戸内透水係数 k' を $1.0 \times 10^5 \text{cm/s}$ から $1.0 \times 10^4 \text{cm/s}$ に変更させた場合の差異を検討した結果を図-9に示す。透水係数を低下させると僅かではあるが流量の低下があり、理論解の流量に近づいた。また、井戸内節点の全水頭分布を確認し、井戸内が静水圧分布になっていることを確認した。ここで、井戸内透水係数が $1.0 \times 10^4 \text{cm/s}$ で井戸内の最小要素縦幅が 1.075cm であるとき、流量の解析値と理論値の誤差は約5%となった。

3.2.5 解析モデルと解析条件の決定

これらの検討結果を踏まえ、解析モデルと解析条件を、①縦横1mm幅の微小要素を井戸底および井戸壁に作成する、②マトリクス解法にはガウスの消去法を使う、③井戸内透水係数は $k'=1.0 \times 10^4 \text{cm/s}$ とする、④井戸内の最小要素縦幅は 1.075cm とする、の各条件を踏まえて定常流量を解析した結果、 $Q=597.23 \text{cm}^3/\text{s}$ となり、倍精度での数値解析結果と理論値との誤差は約5%であった。

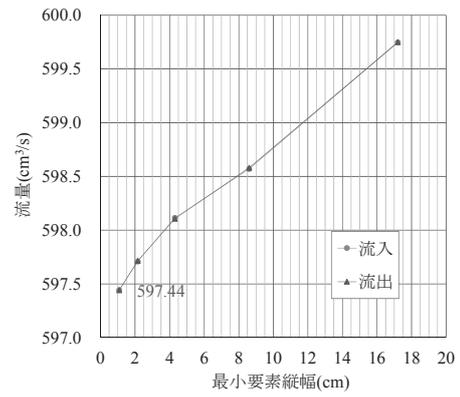


(a) 微小要素なし

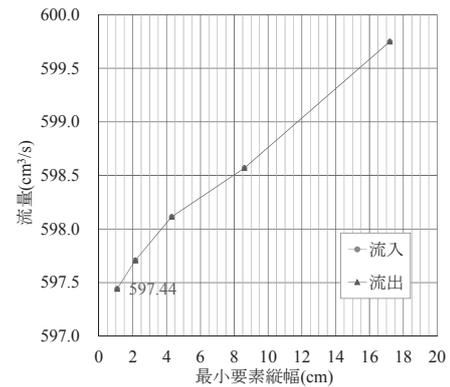


(b) 微小要素あり

図-7 微小要素の有無による定常流量の変化

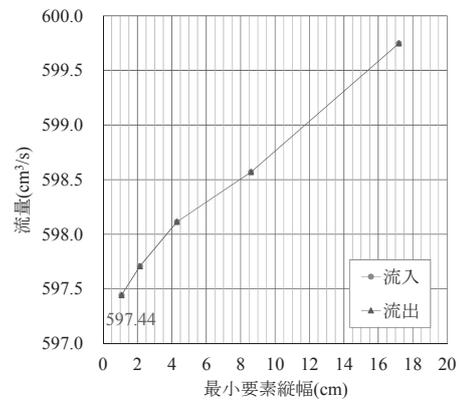


(a) PCG法

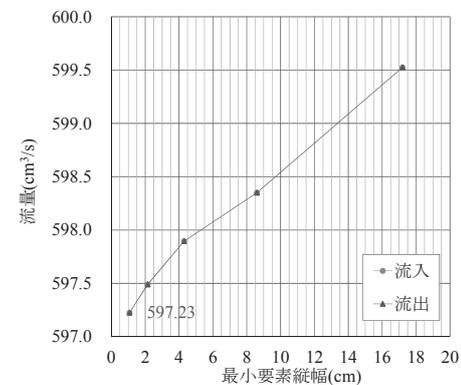


(b) ガウスの消去法

図-8 解析手法による定常流量の変化



(a) 井戸内透水係数 $k'=1.0 \times 10^5 \text{cm/s}$



(b) 井戸内透水係数 $k'=1.0 \times 10^4 \text{cm/s}$

図-9 井戸内透水係数の変化による定常流量の変化

3.3 非定常解析

3.3.1 結果の整理方法

地盤工学会基準では、試験時間内に初期水位差の90%程度まで水位が回復することが望ましい⁶⁾とされている。ここで、定常解析と同条件で式(4)に示すHvorslev法の非定常式(以下、Hvorslev理論式)から90%回復するまでの時間を求めると46.97秒となった。したがって、2.5秒間隔で60秒まで計算を行い、その結果を基にlog₁₀s-tグラフを作成した。そして、種々の条件を変化させながら試行を繰り返し、Hvorslev理論式との比較を行った。

$$k = \frac{(2.3d_e)^2}{8L} \log_{10} \left(\frac{2L}{D} \right) \frac{\log(s_1/s_2)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

ただし、 $L/D \geq 4$ 。ここで、 d_e :有効直径(cm)(測定用パイプ内の断面積 d (cm)から水位測定ケーブルの断面積を差し引いて求めた有効断面積と等価な面積を有する円の直径)、 D :試験区間の孔径あるいは測定用パイプのスクリーン外径(cm)、 L :試験区間の長さ(cm)である。

3.3.2 検討項目

(1) 試験方法による違い

定常後の非定常試験およびスラグ試験での水位変化の違いとHvorslev理論解との差異を確認した。

(2) 帯水層の比貯留係数 S_s による違い

帯水層の比貯留係数の影響で、水位回復に時間遅れが生じる。そのため、それぞれの試験方法で、一般的な砂礫層の比貯留係数の範囲である 1.0×10^{-7} 、 2.0×10^{-7} 、 3.0×10^{-7} 、 5.0×10^{-7} 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ の1オーダー間での水位回復の様子の変化を確認した。

(3) 井戸内の比貯留係数 S'_s による違い

井戸内比貯留係数は、以下の式(5)で表される⁸⁾。

$$S'_s = \frac{C_w}{V} = \frac{\pi r_c^2}{\pi r_w^2 L} \quad (5)$$

ここで、 C_w :井戸貯留項、 V :井戸内水面下体積、 r_c :ケーシング半径、 r_w :井戸半径、 L :ストレーナ長である。 $r_w = r_c$ の時、 $S'_s = 1/L = 4.845 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ となる。この値から、井戸内比貯留係数を小さくする試行($r_w > r_c$)でのHvorslev理論解との合致具合を確認する。なお、岩盤のような低い透水性の地盤では回復に時間を要するため、 $r_w > r_c$ ($d > d_e$)になるような試験装置を使う場合がある。

(4) 帯水層透水係数に対する検討

JGS1314-2012に示されている定常および非定常の理論式は、本来、試験区間の孔壁が自立するような、比較的細粒分を多く含んだ地盤を対象とし、透水係数が $k = 1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度が想定されている⁶⁾。そこで、帯水層の透水係数がこの範囲での検討も実施した。

3.3.3 解析結果

(1) 試験方法による違い

図-10に定常からの非定常試験とスラグ試験の水位変化の解析結果とHvorslev理論式の結果を示す。定常からの非定常試験では、初期段階は直線になり、時間が経過するにつれ水位回復が遅れが生じた。一方、スラグ試験では初期段階から円弧を描くような曲線となった。

(2) 帯水層の比貯留係数 S_s による変化

図-11(a)に定常からの非定常試験を対象に帯水層比貯留係数を $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ まで変化させた際のlog₁₀s-tグラフの挙動の初期変化部分を示す。帯水層の比貯留係数 S_s が大きくなると、Hvorslev理論式の直線から外れる傾向が見られた。ここで50%回復までに限定すると、 $S_s = 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ の場合でもほぼ一致しているとみることができる。また、 S_s をさらに大きな値である $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ の間で変化させた際は、同様に帯水層の比貯留係数 S_s が大きくなると直線から外れることが分かった。また、50%回復までの範囲でも一致しないことが判明した。一方、図-11(b)より、スラグ試験でも定常からの非定常試験と同様、帯水層の比貯留係数 S_s が大きくなると直線から外れる傾向が見られた。しかし、いずれも試験開始直後から円弧を描き、50%回復までの範囲に限定しても直線に一致しているとは言い難い結果を示した。また、 S_s をさらに小さい値である $10^{-7} \sim 10^{-10} \text{cm}^{-1}$ の間で変化させた際は、直線性が見られることが確認できた。しかし、これらは実際の地盤では取り得ないような小さな値である。

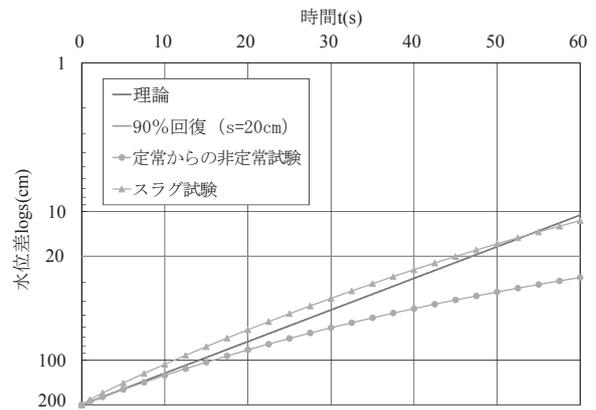
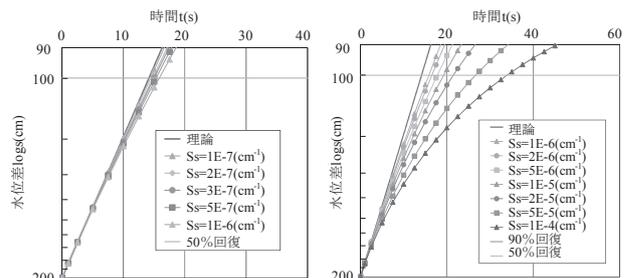
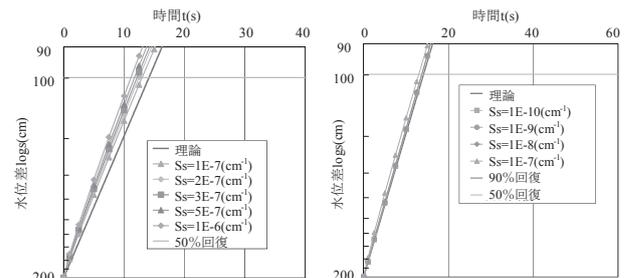


図-10 試験方法による違い($S_s = 10^{-6} \text{cm}^{-1}$)

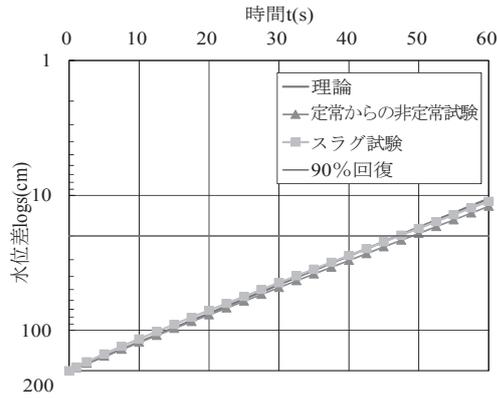


(a) 定常からの非定常試験

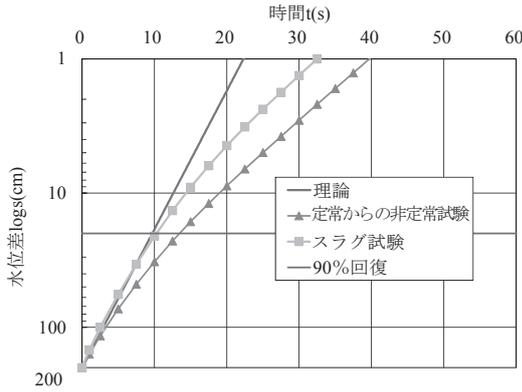


(b) スラグ試験

図-11 帯水層比貯留係数 S_s による変化

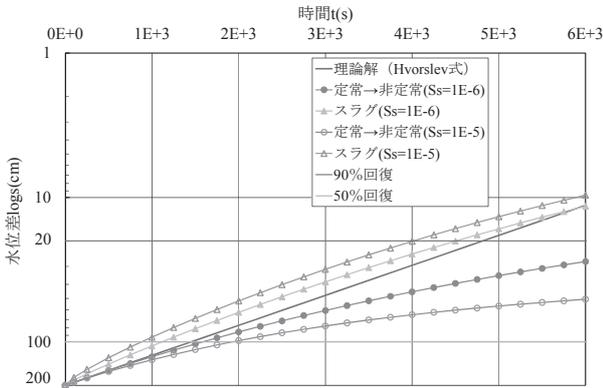


(a) $S_s' = 4.845 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$

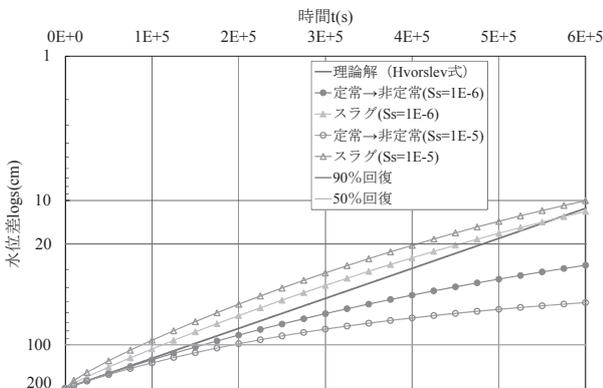


(b) $S_s' = 1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$

図-12 井戸貯留項による変化



(a) $k = 1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$



(b) $k = 1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$

図-13 帯水層透水係数に対する検討

(3) 井戸貯留項 C_w による変化

井戸貯留項 C_w を理論値より小さく、つまり、有効半径

r_c を小さくし、早く水位を回復させる試行を行った。図-12に式(5)の計算値である $S_s' = 4.845 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ と $S_s' = 1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ の結果をそれぞれ示す。井戸貯留項 C_w を小さくすると理論式に一致しなくなることが判明した。

(4) 帯水層の透水係数に対する検討

帯水層の透水係数を $k = 1.0 \times 10^{-6}$, $k = 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ として同様の検討を行った結果を図-13に示す。透水係数を変化させても、同様の傾向が確認できた。

4. 考察

4.1 試験結果の妥当性の検討

通常、Hvorslev法で試験結果を整理する際は初期水位差の90%程度まで水位が回復するまで試験を続ける⁶⁾が、実際の現場では時間の制約上、試験を短時間で終了させたい場合があることが想定される。そのため、これまでの解析結果に基づき、初期段階に限定した場合の試験結果の妥当性について検討した。まず、直線とみなす基準として、 $S_s = 1.0 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ の場合において定常後の非定常試験で初期水位差からの回復率が50%を超えた時間までのデータに設定した。そして、この時の残差平方平均(MSE)を直線とみなす許容範囲とし、このMSEの値を基準として定常後の非定常試験およびスラグ試験の直線とみなせる区間をそれぞれ決定した。また、試験結果の妥当性は、透水係数の誤差(kE)で評価し、許容範囲は理論値の10%以内とした。

4.4.1 試験方法の違いによる試験結果の比較

表-2に直線とみなせる限界の回復率とその回復率での透水係数の誤差の関係を試験方法ごとにまとめた。定常後の非定常試験は、許容範囲内の回復率では透水係数の誤差もほぼ許容範囲内であった。スラグ試験は、許容範囲内の回復率であっても、透水係数の誤差が許容範囲外であることが判明した。また、同じ比貯留係数の試験結果を比較すると、スラグ試験は定常後の非定常試験に比べ直線視できる区間が小さくなり、求まる透水係数の誤差も大きくなる傾向が認められた。

表-2 限界回復率と透水係数の誤差の関係

(a) 定常後の非定常試験			(b) スラグ試験		
S_s (cm^{-1})	限界 回復率 (%)	kE (%)	S_s (cm^{-1})	限界 回復率 (%)	kE (%)
1.0E-6	53.1	11.7	1.0E-6	38.5	32.4
5.0E-7	58.7	9.7	5.0E-7	45.1	22.4
3.0E-7	63.7	8.1	3.0E-7	44.1	18.4
2.0E-7	71.4	7.1	2.0E-7	50.1	13.3
1.0E-7	100.0	4.1	1.0E-7	54.7	7.6

4.4.2 定常からの非定常試験結果の妥当性の検討

図-14に比貯留係数 S_s と残差平方平均(MSE)が許容範囲内に入る限界の回復率の関係、図-15に直線とみなせる範囲内 ($MSE \leq 1.7 \times 10^{-5}$) での最大の透水係数の誤差 kE

および試験時間 t の関係を示す。帯水層の比貯留係数 S_s が大きくなると、直線視できる範囲は小さくなる。また、砂礫層が対象となる比貯留係数の範囲では、透水係数の誤差もほぼ許容範囲内で、試験時間も短くなっている。次に、図-16に残差平方平均 $MSE=1.7\times 10^{-5}$ 、透水係数の誤差 $kE=10\%$ 以内に入る限界回復率をそれぞれ計算し、比貯留係数 S_s との関係を整理した。比貯留係数が大きくなると、直線性の限界よりも先に結果の妥当性を示す透水係数の誤差が許容範囲内から外れる傾向にあることが判明した。

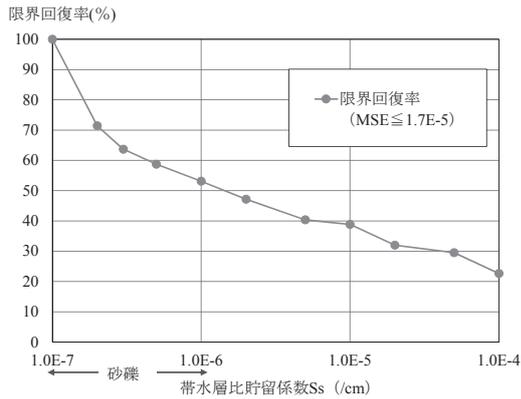


図-14 帯水層の比貯留係数と限界回復率の関係 (定常からの非定常試験)

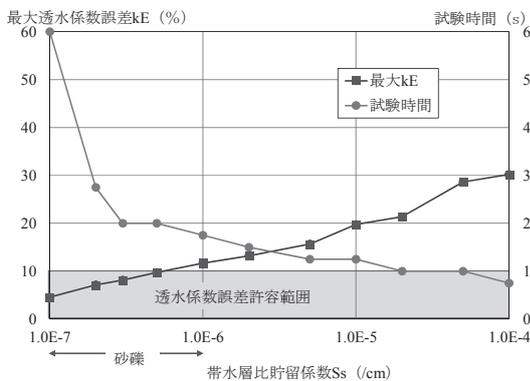


図-15 帯水層の比貯留係数と透水係数の誤差および試験時間との関係 (定常からの非定常試験)

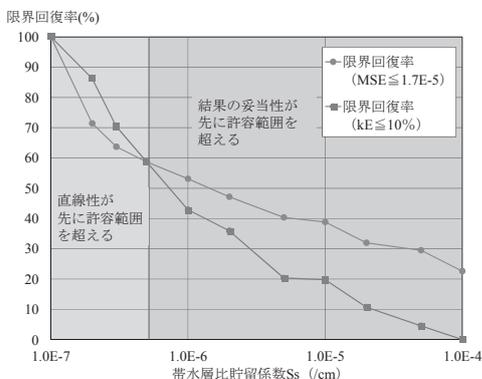


図-16 帯水層の比貯留係数と限界回復率との関係

4.4.3 スラグ試験結果の妥当性の検討

図-17に比貯留係数 S_s と残差平方平均 (MSE) が許容範

囲内に入る限界の回復率の関係、図-18に直線とみなせる範囲内 ($MSE \leq 1.7 \times 10^{-5}$) での最大の透水係数の誤差 kE 、試験時間 t の関係を示す。定常からの非定常試験と同様、帯水層比貯留係数 S_s が大きくなると、直線視できる範囲は小さくなっている。また、定常からの非定常試験に比べ、直線性を満たす限界回復率の値は小さい。砂礫層の範囲で、直線視できる範囲でも透水係数の誤差が許容範囲外となることが示唆された。

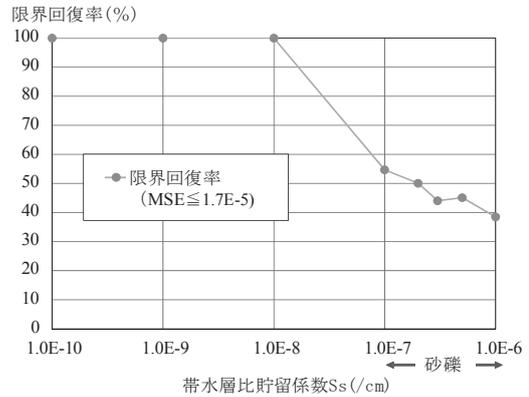


図-17 帯水層の比貯留係数と限界回復率の関係 (スラグ試験)

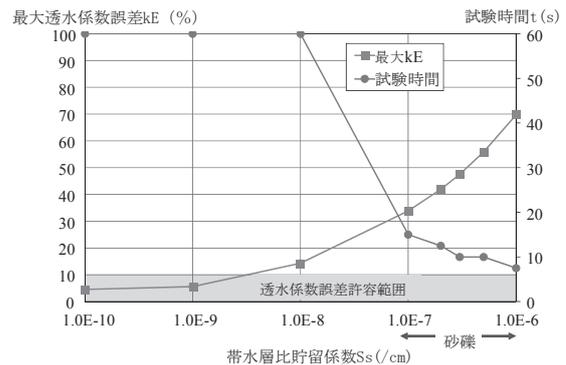


図-18 帯水層の比貯留係数と透水係数の誤差および試験時間との関係 (スラグ試験)

4.2 試験方法の違いによる解析結果に対する考察

定常からの非定常試験では、試験開始直後はHvorslev理論の直線に概ね合致し、試験後半になると外れる結果となった。つまり、試験開始直後は帯水層 S_s の影響が少なく、試験後半になると貯留性の影響が大きくなる。定常状態では、井戸付近の水位は下がっているの、初期の井戸内外の水位差は小さい。そのため、井戸内の水位が回復すると同時に井戸付近の帯水層の水位も上昇する。この水位変化が貯留性の影響で遅れるため、井戸内外の水位差、すなわち動水勾配は比較的小さい状況が続く。そのため、井戸内への流入流量が少なくなることで、水位回復が遅くなっていると考えられる。また、試験開始直後にHvorslev理論の直線に合致するのは、初期段階では流入流量が帯水層の貯留を回復させるより、孔に流入させる方が優先的に働いていることによる。その後、孔に入る水の動水勾配が小さくなると、流入流量が帯水

層の貯留を回復させるため、貯留性の影響が出てくるものと考えることができる。

一方、スラグ試験では、試験開始時に井戸内外の水位差が大きい。試験開始直後に井戸内の水位は回復するが、井戸付近の帯水層の水位は低下しようとする。この水位低下が貯留性の影響で遅れるため、井戸内外の水位差や動水勾配は比較的大きい状態が続く。そのため、井戸内への流入量が多い状態が続く。水位回復も早いままである。やがて帯水層の水位と井戸内の水位が一致すると、帯水層の水位上昇が貯留性によって遅れるため、井戸内へ流入する流量が少なくなり、回復に遅れが見られると考えられる。ここで、帯水層の比貯留係数 S_s が大きくなると、試験方法によらず直線から離れる。これは、理論式そのものに貯留性の影響を示す項が入っていないためである。また、井戸内の比貯留係数 S_s を小さくすると、試験方法によらず直線から離れる。そのため、岩盤のような低い透水性の地盤で直径 d のまま、孔内にケーブルを入れる等して、水位変動断面積を小さくしたり、試験削孔は直径 d で掘り切り、試験区間上端に直径 d_e となる内管を取り付けたりして、水位回復を早くする試験を実施すると、誤差が大きくなることが想定される。

5. まとめ

本研究では、被圧モデルを対象に、スラグ試験結果を Hvorslev 式で評価した場合に求まる透水係数の誤差について、定常試験後に連続して非定常試験を行う場合と比較して検討した。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 定常からの非定常試験において、一般的な砂礫層の比貯留係数での試験では、試験開始直後からしばらくの間は理論直線に合致し、透水係数の誤差も許容範囲内にある。その後は直線から離れていき、透水係数の誤差も大きくなる。
- (2) 定常からの非定常試験において、帯水層の比貯留係数が大きくなると、直線性の限界よりも先に透水係数の誤差が許容範囲外になることが判明した。ただし、これらは透水係数を一定とした条件での解析結果であり、実際には比貯留係数が高い土砂地盤では透水係数が小さいことに注意する必要がある。
- (3) スラグ試験では、試験開始直後から理論直線には乗らない曲線を描く結果となった。ある程度水位が回復すると、理論直線と平行な直線を示す。これは、あくまでも理論直線からは外れており、理論直線と合致するのは、かなり小さな帯水層の比貯留係数の場合のみである。
- (4) 一般的な砂礫層の比貯留係数で透水係数の算定を行うと、初期段階でも誤差は10%を超えることから、スラグ試験をHvorslev法で整理する際は、誤差を含む可能性に注意する必要がある。また、定常からの

非定常試験よりも水位が早く回復することから、算定される透水係数は大きくなることが想定される。

- (5) これらの結果を踏まえると、Hvorslev式の適用は、定常からの非定常試験が望ましいが、定常状態を判断する必要があることから場合によっては長時間の試験となる可能性がある。そのため、実務での実施を鑑みると、必ずしも定常からの非定常試験が推奨されるということではなく、現在の地盤工学会基準の試験法であるスラグ試験を適用する場合は、算定する透水係数にいくらかの誤差が含まれることを認識した上で結果を評価することが必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本原燃株式会社埋設事業部の進士喜英氏に貴重な助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 西垣誠：小特集「地下水流動解析の高度化手法と検証・確認」(その2)の掲載にあたって、地下水学会誌, Vol.57, No.3, pp.317-318, 2015.
- 2) 高坂信章：地下水掘削工事における地下水シミュレーションの適用—その手順と留意点—, 基礎工, Vol.46, No.6, pp.29-32, 2018.
- 3) 地盤工学会・地下水を知る編集委員会編：地下水を知る, 丸善, p.16, 2008.
- 4) 村上章：地盤工学における最先端のデータ同化／逆解析手法, 地盤工学会誌, Vol.65, No.10, pp.1-5, 2017.
- 5) 河野伊一郎：地下水工学, 鹿島出版会, pp.85-110, 1989.
- 6) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会編：地盤調査の方法と解説—第7編 地下水調査, 丸善出版, pp.471-659, 2013.
- 7) 進士喜英：地下水学の名著を読む(7)現場透水試験の源流 Hvorslev (1951), 地下水学会誌, Vol.58, No.2, pp.241-246, 2016.
- 8) 進士喜英, 嶋村貞夫, 濱野隆司：井戸貯留項と等価な井戸材質モデル, 第31回地盤工学研究発表会, pp.2155-2156, 1996.
- 9) 西垣誠：有限要素法による飽和不飽和浸透流解析-AC-UNSAF2D-プログラム解説およびユーザーマニュアル, 地盤工学会関西支部, 第41回実技セミナーテキスト「数値解析の理論と実務」, 1999.
- 10) 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会：地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説(2017年度版), <https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2017/10/0-introduction.pdf>, (参照 2019.3.15).

(2019年6月17日 受付)