

表計算ソフトを利用した現場透水試験（曲線一致法）の半自動解析

川崎地質株式会社 ○相澤 穂高, 内田 秀樹

1. はじめに

単孔を利用した透水試験方法（現場透水試験法）は、ボーリング調査の一貫として実施される比較的簡易な透水試験法で、我が国でも多くの適用実績があり、地盤工学会では JGS 1314-2012 に標準化されている。その基本となる手法は、1951年に Hvorslev の表した技術報文¹⁾に従って構築された試験方法で、その後、1976年に Cooper らの表したスラグ試験法²⁾で改良が行われた。非定常法による試験結果の解析方法として、直線勾配法 (Hvorslev 法) と曲線一致法 (Cooper 法) が、JGS 基準³⁾の附属書 A に記載されている。

本報告では、表計算ソフト (EXCEL) を用いて曲線一致法の非定常解析で、水理定数を半自動解析するツールを開発したので、現場事例を用いて紹介する。

2. 解析ツールの概要

解析ツールは EXCEL のマクロ記述言語 VBA を用いて作成し、標準曲線と測定データを PC 画面上でマッチングさせて水理定数を求めるものであり、2枚の片対数紙 (データ曲線と標準曲線) を用いて行う作業と同じである。マッチング指標には観測データとそれに対応する標準曲線の値との誤差二乗和を用い、これが最小となった時にマッチングと判定する。解析ツールとして EXCEL を利用したのは、下記のような利点があるからである。

- ①統計関数などは EXCEL の組み込み関数を利用することでプログラム開発を省力化できる。
- ②標準曲線の計算をユーザ定義関数にすることにより、関数の引数となるセルの値を変更するだけで、自動計算が行われる。
- ③解析結果は EXCEL のグラフ機能を用いるので解析者が自由に作成あるいはカスタマイズできる。

3. 曲線一致法の解析手順(手動解析)

JGS 基準では、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は直線勾配法を、地盤の貯留性を受けて $\log s-t$ 曲線に明瞭な直線が見られないと判断される場合は曲線一致法を適用するとしている。

Cooper ら (1967) は、被圧帯水層に設置された完全貫入井戸で実施した透水試験 (スラグ試験) における井戸の中の水位変化 (低下あるは上昇) 量の一般解として次式を示している。

$$\frac{H_w}{H_0} = F(\alpha, \beta) \quad \dots (1)$$

$$F(\alpha, \beta) = \left(\frac{8\alpha}{\pi^2}\right) \int_0^\infty \frac{\exp(-\beta y^2/\alpha)}{y^2 \Delta(y)} dy \quad \dots (2)$$

$$\alpha = Sr_w^2/r_c^2 = SsBr_w^2/r_c^2 \quad \dots (3)$$

$$\beta = Tt/r_c^2 = K B t/r_c^2 \quad \dots (4)$$

$$\Delta(y) = [uJ_0(y) - 2\alpha J_1(y)]^2 + [yY_0(y) - 2\alpha Y_1(y)]^2 \quad \dots (5)$$

ただし、 J_0, J_1, Y_0, Y_1 : 第 1 種及び第 2 種ベッセル関数
ここに、 H_w : ケーシング内水頭、 H_0 : 初期水頭、 r_w : 試験区間半径、 r_c : ケーシング半径、 S : 貯留係数、 Ss : 比貯留係数 (=S/B)、 T : 透水量係数、 K : 透水係数、 B : 被圧帯水層の厚さ、 t : 時間:

$F(\alpha, \beta)$ は井戸関数で、図-1 に示すような一連の曲線群となる。

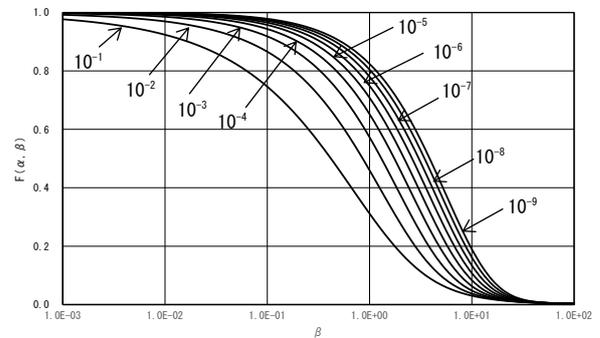


図-1 井戸関数 $F(\alpha, \beta)$

上記の一般解は試験井戸が完全貫入井戸であるが、現場透水試験で行われるような不完全貫入井戸の場合は、帯水層厚さ B を試験区間長 (有効スクリーン長) L に置き換えることで用いることができる。ただし、不完全貫入井戸の透水試験では、 α あるいは試験区間のアスペクト比が大きい場合は、帯水層の実際の透水係数より大きな値を与えることが検証されており (Hyder ら 1994)、透水係数の上限値と見なす方がよいとされている。⁴⁾

曲線一致法の解析手順は以下の5つのステップからなる。

- 1) 経過時間 t を対数スケールで横軸 (X 軸) に、水位差比 H_w/H_0 を縦軸 (Y 軸) にとって試験結果をプロットする。
- 2) データ曲線と同じスケールで作成した標準曲線を重ねて、X 軸方向に平行移動させながらデータプロットに最も一致する標準曲線 (α_m) を選ぶ。
- 3) 任意のマッチポイントを選択する。計算を簡略化するため $\beta = 1.0$ に対応する実時間 (t_m) をデータプロットの X 軸から読み取る。
- 4) 透水係数 K を β の定義式から計算する。
- 5) 比貯留係数 Ss を α の定義式から計算する。

4. 解析ツールによる解析手順(半自動解析)

(1) 地盤構成と試験の概要

試験地は第三紀泥岩層を主体とする丘陵地で、透水試

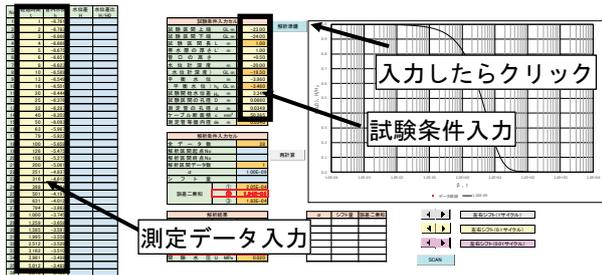
験は泥岩層の GL-23m~24m 間に挟在する厚さ1m の砂層で実施した。試験区間はは GL-25m まで掘削して、砂層の厚さを確認した後、砂層の上端部をバッカーで締め切って区間設定を行った。なお、試験区間は裸孔である。試験条件を表-1に示す。

表-1 試験条件

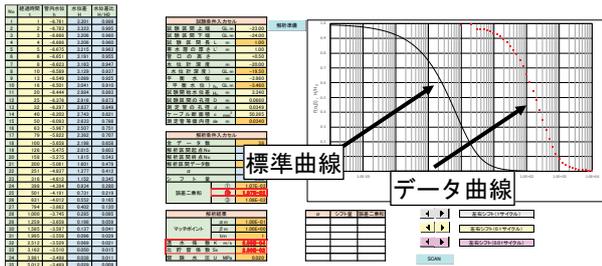
試験方法	試験区間の深さ (GL-m)	試験区間長 L (m)	試験区間孔径 D (m)	ケーシング内径 d (m)	平衡水位 (GL-m)
非定常法 (水位上昇)	23.00~24.00	1.00	0.066	0.034	3.460

(2) 解析ツールの操作手順

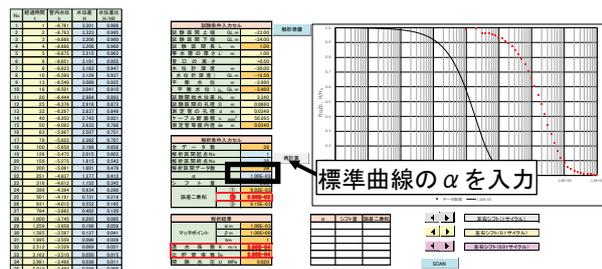
手順①：別のシートで整理した透水試験の測定データと試験条件入力セルに入力し、解析準備ボタンをクリックする。



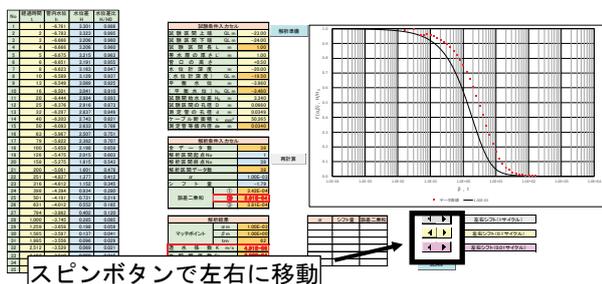
手順②：標準曲線 ($\alpha=1E0, 1E-1, 1E-2$) とデータ曲線が表示される (初期画面)。



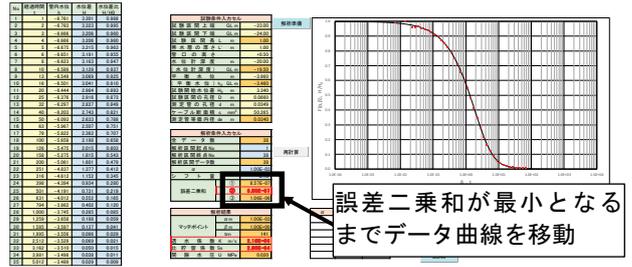
手順③：描きたい標準曲線の α 値を該当セルに入力すると、グラフの標準曲線が描き直される。



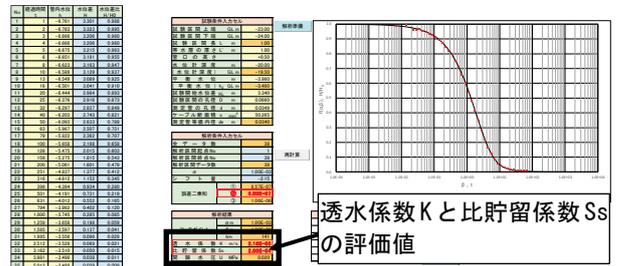
手順④：グラフ下のスピノボタンをクリックするとデータ曲線が左右に移動するので、標準曲線と最も一致する箇所を探す。データ曲線のシフト量は直接セルに値を入力することも可能である。



手順⑤：データ曲線と標準曲線の誤差二乗和が最小となるまで、データ曲線をシフトする。



手順⑥：標準曲線の α を変えて、同様に最適フィットを探す。最も小さな誤差二乗和を示した α の標準曲線が最適フィットであり、その時の透水係数、比貯留係数が透水試験結果による評価値である。この試験では $\alpha=1-3$ の時に誤差二乗和が最小値となり、透水係数 $K=2.16E-(m/sec)$ 、比貯留係数 $S_s=2.80E-4(m^{-1})$ が得られた。



5. 今後の改良点

算は複雑であり、EXCEL VBA でプログラミングしている関係で、CPU 性能によっては計算に多少時間を要する場合があります。よって、今後の改良点としては井戸関数の外部プログラム (DLL: Dynamic Link Library) とすることにより、処理速度と計算精度の向上が期待される。

《引用・参考文献》

- 1) Hvorslev, M. (1951): Time lag and soil permeability in ground-water observation, Waterways Experiment St. Corps of Eng., U.S. Army, No. 36
- 2) Cooper, H.H. Jr., Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, S.S. (1967): Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resources. Research, 3(1), 263-269.
- 3) 地盤工学会：改訂版(2013)：地盤調査の方法と解説-二分冊の1-, 512-614
- 4) Butler, J. J. Jr. (2020): The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests. CRC Press, 266p.