

非定常法による試験結果の解析技法

資料(2-03-1)で示したように、Hvorslev の説明した非定常法による試験結果は次式によって透水係数を算定することができる。

$$K = \frac{A\{\log_e(H_1) - \log_e(H_2)\}}{F(t_2 - t_1)} = \frac{A\log_e(H_1/H_2)}{F(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

上式を試験孔内水位変動 H について表すと以下となる。

$$\log_e(H_1/H_2) = \frac{KF}{A}(t_2 - t_1) \quad (2)$$

図式解法では自然対数より常用対数の方が扱いやすいので以下となる。

$$\log_{10}(H_1/H_2) = \frac{KF}{2.3025A}(t_2 - t_1) \quad (3)$$

ここで、透水係数 K は帯水層特性、形状係数 F と孔内水位変動区間断面積 A は試験孔などの特性であることから、当該試験によって変化するのは、孔内水位差 H と時間 t となり、(2) および (3) 式右辺の KF/A および $KF/2.3025A$ はいずれも定数として扱うことができる。これにより、 H を対数軸、 t を算術(普通)軸としたグラフ紙上では、(2)、(3) 式は、それぞれ直線を示すことになり、その勾配は KF/A (水位変動比が自然対数) あるいは $KF/2.3025A$ (水位変動比が常用対数) となる。

この特性を用いて、非定常試験結果から透水係数 K を算定することとなる。

ここで、試験孔内水位変動域の孔内径を d とすると、 $A = \pi d^2/4$ であり、(4) 式は以下となる。

$$K = \frac{A\log_e(H_1/H_2)}{F(t_2 - t_1)} = \frac{\pi d^2 \log_e(H_1/H_2)}{4F(t_2 - t_1)} \quad (5)$$

このように、定常井戸式(1)から非定常式(4)の誘導過程は、室内透水試験法の定水位法から変動水位法の理論式の誘導と全く同じ取り扱いである。実際に、Hvorslev の報文¹⁾ではいくつかの井戸形状に対して整理をしているが、その最初に室内の変動水位試験法の記載がみられる。以上では、定常井戸式が存在し、その形状係数 F が誘導できているなら、ほぼ自動的に非定常式が誘導できるように説明されており、汎用性を高くする説明の工夫が見られ、極めて実務的な説明になっている。

試験結果の解析では、(4) 式から、孔内外水位差 H の対数表示 $\log_e(H)$ は時間 t と比例関係にあり、このときの比例定数 KF/A は、片対数軸上にプロットした H と t が直線を示し、この勾配から得られる。JGS 基準 1314 では、この関係について、常用対数 $\log_{10}(H)$ を用いた片対数軸上で解析する方法として提示している。

他に、いくつか便利な技法があるので紹介しておく。

(1) Basic time lag 法

非定常試験の結果を、縦軸に試験孔内水位変動量を対数でとり、横軸に時間を算術軸でとると、(5) 式から以下の式形となる。

$$\frac{\log_e(H_1/H_2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{4FK}{\pi d^2} \quad (6)$$

(6) 式は、試験結果がこの軸上のプロットで直線を示し、その勾配が(6) 式の値となる。Basic time lag 法では、直線上の 2 測定点を $H_2 = 0.37H_1$ となるように選定する。何故この関係が選ばれたかは、この関係を(6) 式の対数に代入すれば明白である。

$$\log_e(H_1/H_2) = \log_e(1/0.37) = 0.994 \approx 1$$

このような 2 測定点の関係をを用いることで、対数計算を省略することができる。この時間差 $T(t_2 - t_1)$ を Basic Time lag と称し、(5) 式を以下としている。

$$K = \frac{\pi d^2}{4FT} \quad (7)$$

(2) 水位変動速度

ここで、(3)式に戻ってみる。

$$KFH = -A \cdot \frac{dH}{dt} \quad \text{再掲(3)}$$

dH/dt は孔内水位の変動速度を表している。この式を以下のように書き直す。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{-KF}{A} H \quad (8)$$

(8) 式は、水位変動速度(dH/dt)が孔内外水位差(H)と比例関係にあり、その比例定数は $(-KF/A)$ であることを示している (Chapius, 1981)²⁾。例えば、算術軸上に $dH/dt-H$ の関係をプロットし、ここに直線を見出せばこの勾配が比例定数となり、これより K を算定することができる (資料 2-03-2 参照)。

さらに、この直線は原点($dH/dt, H$)=(0,0)を通過するはずである。実データでは得られない値であることが多いため、直線区間を延長して原点を通過するか否かを確認することになる。仮に、原点を通過しない場合、その原因を H の定義、即ち、試験初期において自然水位状態になかったり、試験中に地盤内水位に変動が見られたり、などの判定に用いることができる。特に、全者の場合であれば地盤内水位の回復速度が遅く試験中に有意な回復みせないと考えられるなら、自然水位の設定誤りとみることができる。この場合には、当該直線が原点を通過するように H の値を補正することで自然水位を適切に推定することが可能となる。

(3) 試験手順について

これまで解説してきた非定常式の背景を見てみると、地盤の貯留性は考慮されておらず、試験孔内の貯留性に由来する水位上昇変動にのみ着目している。一般的には、貯留性が無視できる地盤での適用という条件がついてくることが多い。しかし、正しくは孔内水位変動速度よりも地盤内の変動速度が十分に速いため、地盤内は定常とみなせると理解すべきである。ここで、以下の考察がみられる。

a) スラグ試験

単孔式現場透水試験法の中にはスラグ試験がある。これは、比較的短時間に孔内外水位差をつけるために、孔内に錘を投入したりあるいは予め孔内に水没させた錘を引き上げたりする試験法であり、試験開始直後には地盤内には水位変動の影響を見せないようにするものであるが、この試験結果も非定常 Hvorslev 式で整理されることがある。非定常 Hvorslev 式では、井戸内水位と地盤内水頭は定常状態での釣り合いを示すものの過程であるため、本来スラグ試験のような急激な孔内外水位差をもたせる試験結果の整理には不適である。これに対して、地盤工学会基準の解説では、スラグ試験の理論解を用いた Cooper らの式による整理結果と Hvorslev 式による整理結果を比較することで、誤った試験結果の整理とならない適用を提示している。

b) 試験孔の仕様

岩盤など透水性の低い地盤では、孔内水頭の回復を促進させるために、開口型ではなく閉塞型の試験孔を用い、閉塞空間水やパッカーなど水圧変動と流入出流量に係る貯留性を評価し、等価な井戸内径 d に置き換えて試験することがある。このとき、この試験の目的である井戸内水頭の回復速度の促進が達成できるということで、非定常 Hvorslev の適用条件である孔内水位回復より地盤内水頭回復の方が十分に速く定常に達するという条件が成立しなくなる場合がある。特に、同じ試験区間で開口型と閉塞型の井戸仕様に切り替えて試験した場合、開口型では非定常 Hvorslev 式が適用できても閉塞型では適用し難い状況が出てくる。これは、対数軸 H —算術軸 t における試験結果のプロットが直線性を見せなくなり、この原因は地盤の貯留性が井戸孔内貯留と比して無視できなくなっていることが原因である。しかしこの知見を把握していないと、同じ地盤の試験区間で試験孔仕様を変えただけで、地盤の貯留性が出たり出なかったりすると、いずれかの試験が誤りとの誤解を生むことにもなりかねない。注意が必要である。

【参考文献】

- 1) Hvorslev, M. J. : Time lag and soil permeability in ground-water observations , Waterways experiment station, Corps of engineers, U.S. Army Bulletin, No.36, 50p., 1951.
- 2) Chapuis, R. P., J. J. Pare and J.G. Lavallee: In situ variable head permeability tests, in proc. Of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, June 15-29, Vol.1, pp.401-406, 1981.