

スラグ試験結果への適用と留意点

1. 標準曲線一致法(1)

与えられた標準曲線値と測定値 s/s_p をそれぞれ同じスケールの片対数軸上にプロットする。このとき、時間軸を対数軸とする。ここまでの理論展開では時間軸の無次元値は t_D であったが、数表では β を無次元時間として与えている。再掲になるが、これらには以下の関係がある

$$t_D = \frac{Tt}{Sr_w^2} \quad \alpha = \frac{\pi Sr_w^2}{C_w} \quad \beta = \alpha t_D = \frac{\pi Tt}{C_w} \quad (1)$$

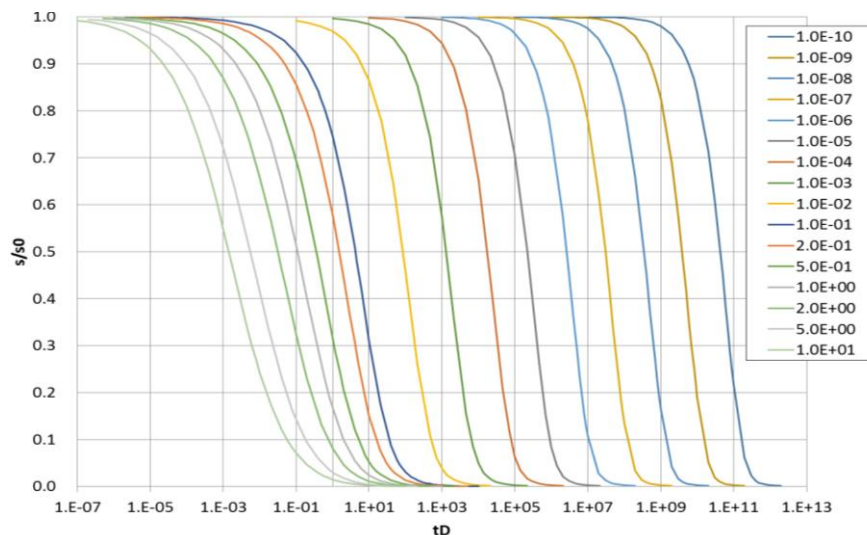
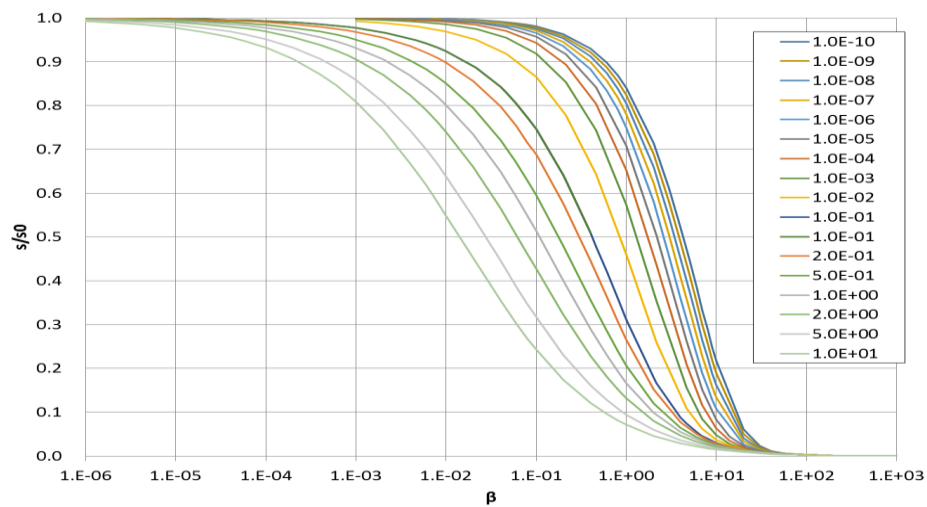
ここでの特徴は、 t_D には水理拡散係数 T/S が含まれているが、 β には T のみである。

揚水試験結果の解析法である標準曲線一致法では、両対数軸上での作業となり、基本的には縦横両軸に沿って移動作業を行うものであったが、ここで示す Cooper らのスラグ試験結果の解析法では移動作業は時間軸である対数軸に沿ったものだけである。標準曲線が複数あるため、フィッティングでは適切な曲線を選び、この曲線指標の α^* 値を確認する。

フィッティング時の両時間軸のずれから t^* と β^* を、これらと次式により T および S を得る。

$$T = \frac{C_w}{\pi} \frac{\beta^*}{t^*} \quad (2)$$

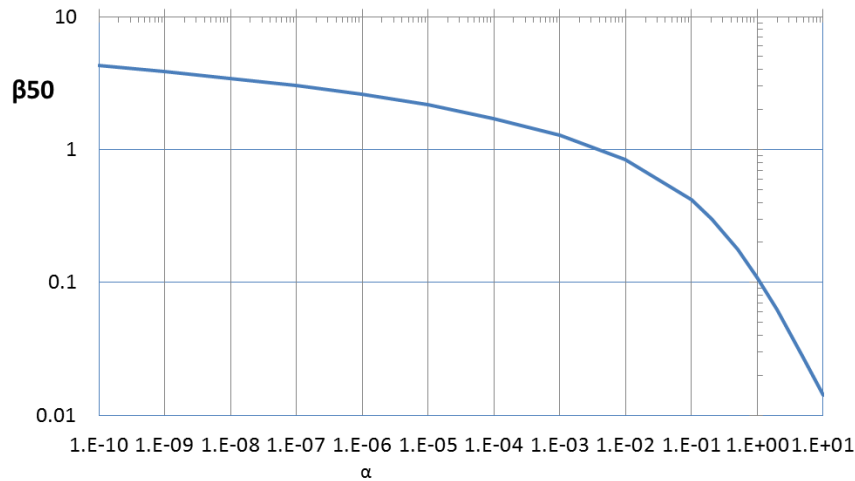
$$S = \frac{C_w}{\pi r_w^2} \alpha^*$$



Cooper(1967)でこの技法が提案されているが、理論的には β でなくとも t_D を用い、フィッティングできる。Cooper らは、 t_D ではなく敢えて β を用いた技法を提案している。ここで、 t_d を標準時間とした技法を考察してみる。図に示すように、 t_D-s/s_0 曲線は、密集していないことで幾分作業時の扱いが向上したように見える。ただし、このことは曲線ごとのフィッティング状況を定量的に差別化できない限り、作業性が向上したともいえない。それよりも、標準時間軸に地盤の貯留係数 S が残ることから、以下のように、どの標準曲線と合致したか、即ち α^* の選定結果が透水係数の結果に大きく関係する。

$$\alpha^* = \frac{\pi S r_w^2}{C_w} \rightarrow S = \frac{C_w \alpha^*}{\pi r_w^2} \rightarrow T = \frac{S r^2 t_D^*}{t^*} \tag{3}$$

以上の観点から、Cooper らの提案した標準時間 β を用いた方法が現時点では適切であろう。また、Ferris が紹介しているが、両対数軸上で考えるものもある。図に標準曲線を示しておく。これを見ると、時間がたつて孔内水位低下量が0に近づく一つの曲線(直線のようにも見える)に集約されていく。これは標準曲線一致方では非常に有益な特徴であるが、曲線が集約されるのは孔内水位低下量が試験初期導入 s_0 の1/1000程度より小さい値にまで回復したデータ領域であり実用的ではない。

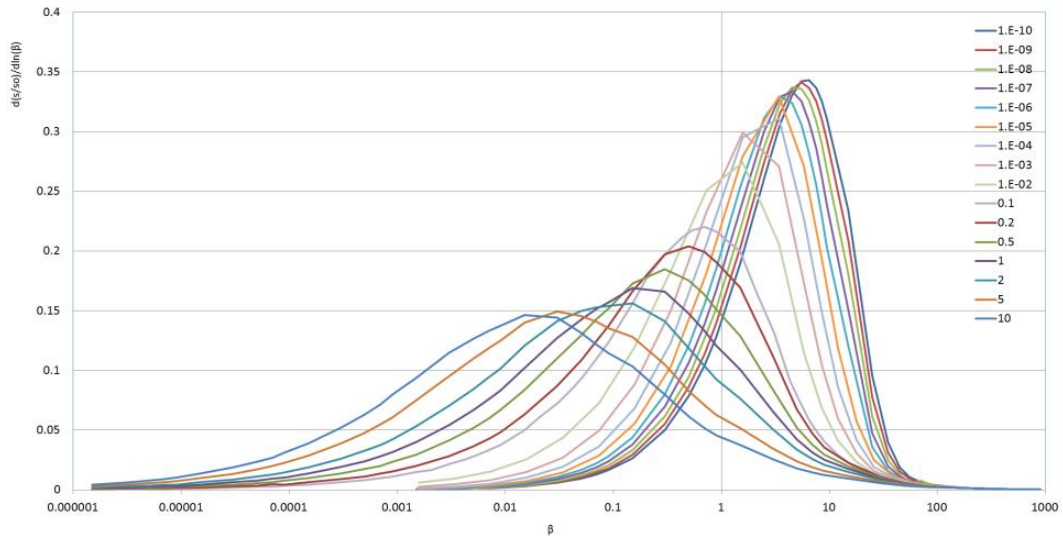


このように、Cooper らの研究グループによって提供されている標準曲線は都合3文献に及ぶが、ここでは一つの座標軸上に集約した。この曲線群からは、地盤の貯留性が比較的小さい場合($\alpha < 0.1$)では、オーダー単位でしか評価できないことから、貯留係数の推定にはよろしくないと考えられている。このように説明すると、用意されている標準曲線値 α 値が疎(大雑把)であることが原因のように受け取られるが、グラフ群を見れば α 値が小さいほど曲線形状に明確な違いが無いため、 α 値の疎が問題ではなくこの手法の本質的な問題として小さな α (一般には小さな S)には不向きと言える。しかしながら、試験時の測定時間に対応した標準値を個々に欲しい場合、これら数表や標準曲線に頼らずに結果を得る場合、先述の積分形式の解から s/s_0 値を求めることは計算負荷も少なくない。これに対してLaplace変換場での解から直接的に逆Laplace変換する技法が活用できる。これによってCooper らの文献にある数表値の妥当性も確認できる。この技法を用いることで、自動フィッティングのプログラミングも容易となる。

ここで、自動フィッティングにおける簡略化を提案しておく。手順では、ターゲットとする曲線(α 値)を選び、この α 値に対する曲線に対してデータと曲線の最適なフィッティング状態を探すことになる。しかし、これを手作業で実施する場合、予めフィッティングポイントは決めていないだろうか? 例えば、 $s/s_0=0.5$ となる点は必ずフィッティングするとして、この条件下で最適な一致を見せる α を探索する試行である。このように試行すると、ある α 値に対する時間軸の合致点は既に決まっており、時間軸上の試行が不要となる。当然、 $s/s_0=0.5$ が最適とはいえない多、予め想定されるポイントごとに用意をしておけばいい。

ここで、 $s/s_0=0.5$ の時の準備を示しておく。下図は、 $s/s_0=0.5$ となる標準時間 β_{50} と α の関係を示したものである。この図は、Cooper らの数表から内挿補間したものである。

この関係に対応して、実測データで $s/s_0=0.5$ となる時間 t_{50} を選んでおけば、 $\beta^*=\beta_{50}$ 、 $t^*=t_{50}$ となることから、 α の試行毎にこれを決めることができるのである。



2. 標準曲線一致法 (2)

揚水試験結果の整理技法の一つに derivative 曲線を用いるものが提案されている¹⁾ (Bourdet,1989)。この方法は、片対数軸上の $s-\ln(t)$ 曲線の接線勾配値を新たな標準値として使うものである²⁾ (Horn,1995)。この手法は、他の試験での活用も説明できるので、改めて説明するが、ここではスラグ試験でも活用を説明しておく。

先述の標準曲線が、 $s/s_0-\log(\beta)$ 軸上に描かれているので、derivative はこれら曲線の接線勾配であると理解できる。Cooper の誘導した s/s_0 式から直接 derivative 値を求めるのは難しいが、 \bar{s}_D から以下のようにして求めることができる。

まず、ここで無次元時間項に β を用いていることから、derivative も β による微分とすると Laplace 変換場では以下の様に展開できる。

$$\text{derivative} = \frac{ds_D}{d\ln(\beta)} = \beta \frac{ds_D}{d\beta} = \alpha t_D \frac{ds_D}{d(\alpha t_D)} = t_D \frac{ds_D}{dt_D}$$

よって、 (ds_D/dt_D) を求めればよく、Laplace 変換公式から以下の定義である。

$$\frac{ds_D}{dt_D} \rightarrow \overline{ps_D - s_D(t_D = 0)}$$

初期条件を代入すると以下となる

$$\frac{ds_D}{dt_D} \rightarrow \overline{ps_D}$$

よって以下となる

$$\overline{ps_D} = \frac{K_0(\sqrt{p}r_D)}{K_0(\sqrt{p}) + \frac{2\alpha}{\sqrt{p}} K_1(\sqrt{p})}$$

上式の逆 Laplace 変換から (ds_D/dt_D) 値を得、曲線を作成すればよい。ここでは、既に与えられている Cooper らの数表から区間の勾配計算したものを紹介しておく。スラグ試験の場合、derivative 曲線はピークをもつ曲線となり、ピーク点を抽出することでフィッティング精度の向上が期待できる。

【参考文献】

- 1) Bourdet, D., Ayoub, J.A. and Pirard, Y.M.: Use of pressure derivative in well-test interpretation, SPE Formation Evaluation, June 1989, pp. 293-302, 1989.
- 2) Horne, R. N. : Modern Well Test Analysis: A Computer-Aided Approach, 2nd. ed., Petroway, Palo Alto, 257p. , 1995.