

【質問】

解析結果に出てくる $r^2(\rho c)$ の考え方が良く分かりません。

ここでの r はボアホール半径ではないと思いますが、どのように考えたらよいのでしょうか？

最終的には、地中熱交換器の熱抵抗又は (ρc) を決定したいのですが、

この $r^2(\rho c)$ の値をどう使用したら良いのかが分かりません。

【回答】

確かに、地層の平均的な (ρc) は是非知りたいところです。

しかし、最初に結論を申しますと、熱応答試験により (ρc) を求めることはできません。

その理由は、熱応答試験の解析理論であるケルビンの線源関数の形にあります。

下記に、ケルビンの線源関数の概要を述べます。

Morgensen によって TRT のデータ解析に適用され、広く利用されているケルビンの線源関数理論 (Ingersoll and Plass, 1948) は、均質、等方性、無限遠媒体に強度一定の線源熱負荷を与えた場合の地層の熱応答が解析できる関数で、次の熱伝導方程式と初期条件および境界条件で表現される。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\{b(\rho c)\}}{(b\lambda)} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{初期条件: } T(r, 0) = T_0, \quad r_w \leq r < \infty$$

$$\text{境界条件 1: } T(\infty, t) = T_0, \quad t \geq 0$$

$$\text{境界条件 2: } \lim_{r \rightarrow r_w} \left(2\pi r (b\lambda) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = Q_H, \quad t > 0$$

ここに、 T は地層の温度 (K)、 T_0 は初期の地層温度 (K)、 r は熱交換井中心からの半径 (m)、 r_w

は熱交換井の半径 (m)、 Q_H は地層との熱交換量 (W)、 λ は地層の熱伝導率 (W/m/K)、 ρ は地層の密度 (kg/m³)、 c は地層の比熱 (W·s/kg/K)、 b は U 字管の埋設深度 (m) である。いま、ボーリング孔中心部での加熱に伴う地層の温度上昇を $T_r = T - T_0$ とし、(3) 式と初期条件・境界条件を変形して微分方程式を解くと、以下の解析解が得られる。

$$T_r = \frac{Q_H}{4\pi(b\lambda)} \int_X^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q_H}{4\pi(b\lambda)} E(X) \quad (4)$$

$$X = \frac{r^2(\rho c)}{4\lambda t}$$

ここに、(4) 式はケルビンの線源関数と呼ばれる関数である。

(4)式からもわかりますが、 r と (ρC) は一体となっているので、別々に分離して同定することは数式の構造から不可能です。しかし、 $r^2(\rho C)$ を一つの係数と見なせば、その同定は可能です。また、TRT アナライザーでは $r^2(\rho C)$ と λ が同時に同定できますので、その値を利用して $E(X)$ を次式で評価できます。

$$E(X) = -\gamma - \ln X + X - \frac{X^2}{2 \cdot 2!} + \frac{X^3}{3 \cdot 3!} - \frac{X^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

その評価結果を TRT のデータとともに図化して比較することにより、同定パラメータの妥当性も検証できます。

ところで、近似解を用いた従来法では、

$$T_r \cong \frac{Q_H}{4\pi(b\lambda)} \left(-\ln \frac{r^2(\rho C)}{4\lambda t} - \gamma \right)$$

を変形した

$$T_r \cong k \ln(t) + m \quad (7)$$

を用いて、傾き k を求めます。ここに、

$$k = \frac{Q_H}{4\pi(b\lambda)}, \quad m = \frac{Q_H}{4\pi(b\lambda)} \left\{ \ln \left(\frac{4\lambda}{r^2(\rho C)} \right) - \gamma \right\} \quad (8)$$

です。したがって、この方法では λ しか求まりませんので、評価結果を TRT のデータとともに図化して比較することができませんでしたが、TRT アナライザーによる逆解析法により計算結果と実測結果の比較が可能になりました。

ちなみに、 $r^2(\rho C)$ は地下水流速が大きくなるほど、小さな値になります。 (ρC) は地下水流速によっても変化しませんので、このことは地下水流速が大きくなるほど評価される r が小さくなることを意味しています。ただし、この r はボーリング孔の口径などとは関わりはありませんのでご留意頂ければ幸いです。