

CS2-4(II) 飽和多孔体中の熱拡散過程のモデル化について

名城大学理工学部 正 員 原田守博
 中部電力(株)技研 正 員 杉山陽一
 名古屋大学工学部 正 員 高木不折

1. はじめに

地下水は水温が年間を通じて安定しているという特長をもっており、それを有効に利用する方策として、井戸注入による帯水層への熱エネルギー貯留システムが開発されている。このように地下水を熱的に利用する際には、飽和浸透流に伴う熱拡散機構の解明が不可欠である。著者らはこれまでに、現地および室内で詳細な実験を行うとともに、固相と液相の温度を平均化して取り扱う一相系熱輸送モデルによるパラメータ値の変動性について検討を進めてきた¹⁾。現在までのところ、一相系モデルは現象の大略を評価できることが明らかとなったが、実験値の挙動を十分に再現するには至っていない。そこで本研究では、そうした一相系モデルの問題点を示すとともに、固相・液相間の熱交換の遅れを考慮した二相系モデルによる解析を試みた。

2. 実験の概要

実験は、ガラスビーズを充填した鉛直飽和カラムに温水を浸透させ、埋設した温度センサーによって熱の拡散過程を計測するものである(図-1)。温水を動水勾配一定で浸透させた場合、多孔体中の水温変化により透水係数および流速が変動し、それが熱の分散に影響を及ぼすという、流れ場と温度場が相互に作用した複雑な現象となる。したがって、熱の拡散機構のみを検討するためには、流れ場を安定させる必要がある。そこで本実験では、カラム上部にパイプを設けて一定流量を流下させ、パイプ内水位を自由に変動させることによって透水係数の変化を動水勾配の変化として吸収させる工夫を施した¹⁾。言うまでもなく、温度センサーには流体だけでなくビーズも接触しているため、センサーは水温とビーズ表面温度の両者を測定していることになる。しかし、センサーへの流体とビーズの接触面積率を考えると、前者の方が圧倒的に大きいことから、温度データは主として流体温度を表しているものと考えられる。

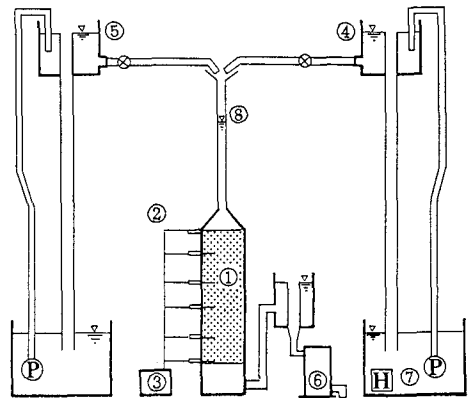


図-1 実験装置の模式図

- | | |
|-----------|-----------|
| ① ビーズカラム | ② 温度センサー |
| ③ データロガー | ④ 温水タンク |
| ⑤ 冷水タンク | ⑥ 面積流量計 |
| ⑦ パイプヒーター | ⑧ 水頭調節パイプ |

3. 一相系熱輸送モデルによる実験結果の再現性

一次元浸透場において、固相と液相の温度が短時間に平衡に達する場合、次の一相系モデルが得られる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + m u \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1) \quad m = \frac{n(\rho c)_r}{n(\rho c)_r + (1-n)(\rho c)_s} \quad (2)$$

ここに、 θ ：無次元温度 $(= (T - T_{cold}) / (T_{hot} - T_{cold}))$ 、 κ ：熱拡散係数、 u ：間隙流速、 n ：間隙率、 $(\rho c)_s$ 、 $(\rho c)_r$ ：固相と液相の熱容量である。上式の右辺第1項は熱伝導・熱分散などの熱拡散効果を、第2項は移流による熱輸送を表している。式(1)を差分法によって数値解析するにあたって、初期条件は $\theta(x, 0) = 0$ であり、境界条件として上流のセンサーでの実測温度上昇曲線を用いた。そして、下流側のセンサー位置での温度を計算して、測定データから熱拡散係数 κ を最小自乗基準によって同定した。

図-2は、 κ の同定時における実測値と計算値との適合状態の一例を示したものである。図の左の曲線は境界条件として用いた上流のセンサーでの温度データであり、右の曲線は下流センサーでの計算値、○印が実測データである。図からわかるように、各センサーでの温度上昇曲線は立ち上がり部分に比べて平衡温度に漸近する部分が緩やかであり、前後に非対称に歪んだ形となっている。これに対し一相系モデルによる解析では、上流での境界条件に実測値を用いても、データと計算値は十分には適合せず、解析モデルが温度上昇曲線の前後非対称性を表現しきれないことがわかる。なお、こうした実験値と計算値の差異は、ピーズの粒径が小さいほど大きく、流速が速いほど、そして下流の測定点ほど増大する傾向にあることが認められた。

4. 二相系モデルによる流体の温度上昇曲線

ここで述べる二相系熱輸送モデルとは、固相と液相の各々について熱移動式を立て、固液相間の熱交換をニュートンの冷却法則によって表現したものである。簡単のために、固相中および液相中の温度分布は均一としたうえで、固相同士の熱伝導を接触面積が小さいことから省略すると、次の連立方程式が導かれる²⁾。

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} + \frac{1}{m'} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa \frac{\partial \theta_f}{\partial x} \right] + u \frac{\partial \theta_f}{\partial x} \quad (3) \quad \frac{1}{m'} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = h (\theta_f - \theta_s) \quad (4)$$

ここに、 θ_s, θ_f : 固相と液相の無次元温度、 m' : 放熱係数 ($=m/(1-m)$)、 h : 吸熱係数である。 m' の値は固相と液相の熱容量から与えられるが、固液相間の熱交換の早さを支配する h は未知量として残る。

図-3は、 h の値を順次変化させた場合の液相の温度上昇曲線(流下距離 $L=10, 30$ cm)を、一相系モデルの解とともに示したものである。この図によると、 h が小さい場合、曲線の立ち上がりは早いが漸近部がかなり緩やかな勾配となり、非常に歪んだ曲線形状になっている。一方、 h が次第に大きくなってくると、曲線は一相系モデルの解に近づいている。これは固液相間の熱交換が速やかに行われ、早い時期に $\theta_s = \theta_f$ という条件が達成されるためであると考えられる。これらのことから、固液相間の熱交換の時間遅れを考慮することにより、実験データにみられた温度上昇曲線の非対称性を再現することが可能であると推察される。

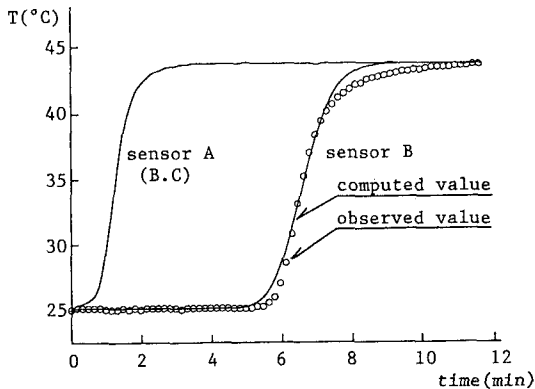


図-2 一相系モデルによる計算値と実験値の比較

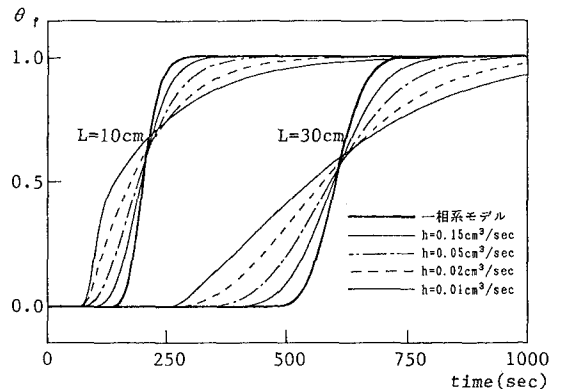


図-3 二相系モデルと一相系モデルとの比較

5. おわりに

多孔体中の流体温度の上昇過程は、二相系モデルを用いることによって、さらに精度良く再現しうることが示された。しかし、吸熱係数 h という未知パラメータが新たに加わり、解析モデルは複雑化した。現地のように、観測情報が少なく不確定要素の多い実現象へモデルの適用を考える場合、解析モデルの優劣の判断は、現象の再現・予測の精度を勘案しつつ、別の視点から行われるべきものと考えられる。

参考文献 1) 原田・高木・杉山: 水工学論文集 36巻, 1992. 2) 藤縄: 農業土木学会誌, 56(8), 1988.