

飽和多孔体中の熱拡散過程に関する室内実験

名古屋大学工学部 正 員 原田 守博, 工学部 学生員 武藤高太郎
名古屋大学大学院 学生員○杉山 陽一, 工学部 正 員 高木 不折

1. はじめに

地下水のもつ水資源的価値の一つとして、水温が年間を通じて安定していることが挙げられる。これは、帯水層が地下深部に位置し、優れた恒温性を有するためである。近年、地盤沈下などの障害を生ずることなく地下水の熱的利用を図る技術として、井戸注入による帯水層への熱エネルギー貯留 (Aquifer Thermal Energy Storage) が検討されている。ATESは、化石燃料に対する補助エネルギーとしてだけでなく、地表の廃熱処理や地下施設のクーリング技術としても可能性が期待されているが、一方で、地域の地下環境を人為的に乱す恐れがあり、実施にあたって慎重に検討を重ねなければならない。本研究は、ATESの検討課題の一つである飽和浸透流に伴う熱拡散機構の解明をめざして、基礎的な実験を行なったので報告する。

2. 実験のねらい

浸透流に伴う熱拡散過程に関する研究はまだ緒に着いたばかりであり、その物理機構は未だ十分に解明されていない。これに対し、帯水層中の溶質の輸送過程は、地下水汚染問題とも関連して既に数多くの研究がなされ、現象を評価する解析モデルもほぼ確立された段階にある。両者は、多孔体中の密度流という点で類似の現象であり、溶質輸送における分子拡散・機構的分散は熱輸送における熱伝導・熱分散に対応する。仮に、固相と液相の温度が短時間に平衡に達し、流体の密度差に起因した自然対流が生じない場合であれば、そうした溶質輸送の解析モデルを基礎とした一相系の熱輸送解析が可能となろうが、実現象では必ずしも上記の条件が満たされないことも多いと考えられる。したがって、一相系の熱輸送モデルの有効性とその限界を評価することは工学的にきわめて重要なことである。以下では、多孔体粒子の粒径・動水勾配・浸透水の温度の三者を変化させることによって様々な条件下での温水浸透実験を行い、熱拡散パラメータ、とりわけ熱分散定数の同定を通じて一相系解析モデルの評価を試みた。

3. 実験の概要

本研究で行なった実験は、図-1に示すように、ガラスビーズ (粒径 0.1-1.0 mm) を充填した鉛直飽和カラム中に温水を浸透させ、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。カラムを鉛直にしたのは自然対流の発生を防ぐためであり、カラムや温水タンク等には断熱材が施してある。温水タンクにはコンピュータによって制御された熱ヒーターが設置され、温水の温度は所定の値に維持される。実験はまず、右側のタンクから冷水を定常浸透させたのち、左側の温水タンクに切り替え、一定の動水勾配のもとで温水を浸入させるものである。水温データはデータロガーを経てコンピュータに集録され、熱拡散モデルによる計算結果との比較や熱分散定数の同定といった解析処理にかけられる。

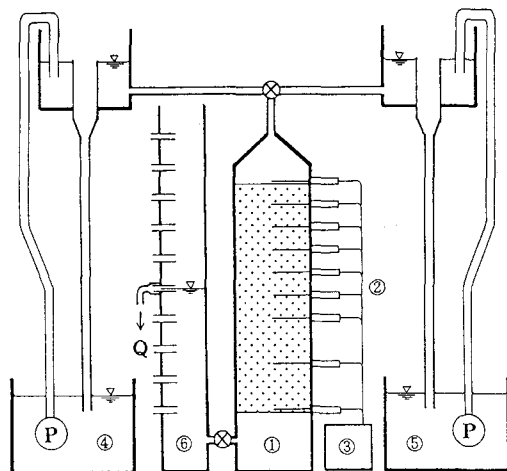


図-1 実験装置の模式図

- 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 ヘッド調節タンク

4. 実験結果

実験結果の一例を図-2に示す。注入水温はカラム側壁からの熱損失のために、浸透に伴い徐々に低くなるが、その差は温水と冷水の温度差の数パーセント以下であり、カラムの断熱は適切であったと考えられる。ところで、透水係数は温度によって変化することが知られている。これは、浸透する流体の粘性や密度などが温度により変化することに起因するものである。今回の実験においても、動水勾配を一定に保っているに関わらず、温水の浸透に伴い流速が大きくなる現象がみられた。今回解析に適用するモデルは流速を一定としたものであるため、データをそのまま解析結果と比較することは不可能である。そこで、注水直後の流速を基準として、流速の時間的変化により生ずる各温度センサーへの熱水塊の到達時刻のずれを修正した。

5. 一相系モデルによる熱拡散係数の同定

解析に用いる熱輸送モデルは、半無限の均質な多孔体中の一次元定常流に対するもので、基礎方程式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (1) \quad D = D_m + \alpha \cdot v_0^n \quad (2)$$

である。ここに、 θ ；無次元温度、 D ；熱拡散係数、 D_m ；多孔体中の熱伝導係数、 α ；熱分散定数、 v_0 ；多孔体と流体との熱交換のために生ずる遅れを考慮した流速であり、一般には $n=1$ として取り扱われる。式(1)の左辺第2項は移流による熱輸送を、右辺は熱伝導・熱分散などの熱拡散効果をまとめて表している。解析にあたって、初期条件を $\theta(x, 0) = 0$ とし、上流端境界で一定温度の温水を連続注入する場合の解析解に対し、上述の流速修正を行った温度データを用いて、熱拡散係数の値を各温度センサーごとに同定した。

図-3は粗いビーズ(粒径1mm)における流速 v_0 と同定された熱拡散係数 D との関係をプロットしたものである。まず全体的に見ると、流速 v_0 が $0.1(\text{cm}/\text{sec})$ 以下の場合には v_0 に伴い D も線形的に増加する傾向が見られるが、それを越えると D はほぼ一定値の $0.02(\text{cm}^2/\text{sec})$ で安定している。このことから、式(2)において $n=1$ として取り扱うことのできるのは、流速がある一定値までの範囲に限定されるのではないかと推察される。注入する温水温度が異なるケースの同定値は、図中の $D=0.01(\text{cm}^2/\text{sec})$ 近傍にプロットされており、温度差による D への影響は明確には認められない。尚、細かいビーズ(粒径 0.1mm)による実験結果は、流速値が小さい($0.02\text{cm}/\text{sec}$ 以下)のために、熱拡散係数が流速の大きさに伴って増大する傾向が確認された。

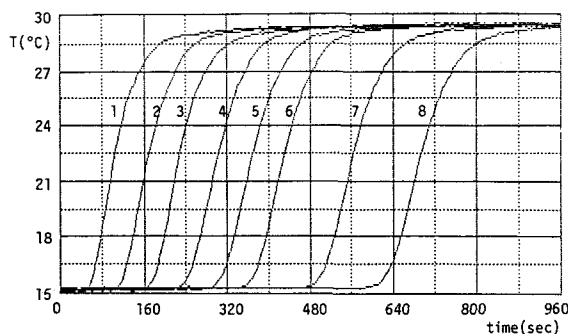


図-2 実験データの一例

(図中の番号は各温度センサーを指す)

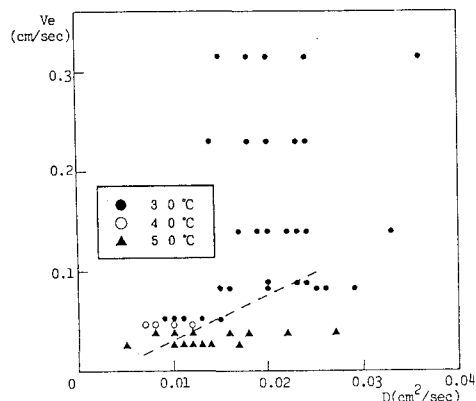


図-3 熱拡散係数 D の同定値と流速 v_0 との関係

6. おわりに

今後、さらに異なる粒径での実験も実施し、一相系モデルの妥当性の評価に多方面からアプローチしようと考えている。また、流速が速くなってくると、固相と液相とに温度差が生じ一相系のモデルの仮定が満たされなくなる可能性があるため、それを補完する二相系のモデルについても検討する予定である。

参考文献 藤縄克之：流動地下水中の熱移動機構について、農業土木学会誌、56(8)、pp.47～54、1988。