

不均質浸透場における伝熱の実験と数値シミュレーション

Experimental and Numerical Study on Heat Transfer
in Nonhomogeneous Seepage Flow Field神戸大学工学部 正 員 川谷 健
神戸大学大学院 学生員 安田 敏夫

1. はじめに

地下水流による溶質や熱の輸送形態は流れの場の分散機構によって支配される。分散は一般に微視的分散(Microscopic dispersion)と巨視的分散(Macroscopic dispersion)に分けられる。前者は、溶質や熱が様々な形状とつながりをもつ土粒子間けきを流過することによって生じるそれらの拡散現象である。そして、その特性長は土粒子径のオーダーである。これに対して後者は、流れ場の透水性の不均質による溶質や熱の拡散現象である。この特性長は不均質性の規模によって異なり、土塊や巨礫のオーダーから地層のオーダーまで様々であると考えられる。分散現象を拡散方程式(または熱伝導方程式)によって解析しようとするとき、いずれかの分散機構が卓越している場であれば、単一の分散係数を方程式に導入することで解析を実行できる。とくに巨視的分散が卓越する浸透場においては、分散係数が大きな値となるので、拡散方程式にもとづく数値解析は解の収束・安定性の面から容易になるといえる。しかし微視的分散と巨視的分散が共に重要な役割を果たすと考えられる浸透場では、拡散現象そのものも複雑であると同時に、解析の面からも困難な点が生じる。本研究では、このような浸透場での分散(伝熱)現象の理解と数値解析手法の検討を目的として、伝熱の実験とその数値シミュレーションを行った。

2. 実験

2.1 実験装置と実験方法

浸透場における伝熱の実験を行った。微視的分散の場として、実験では径約 1mm のガラス球をつめた水平二次元水槽を用いた。実験区間は、長さ 142cm、幅 76cm、深さ 10cm である。水槽の底面と側面は厚さ 2cm の耐水合板であり、その内側を 1.5cm の発泡スチロールで覆って断熱を計った。上面は厚さ 1.5cm の透明アクリライト板であり、この部分には断熱材を用いていない。この場に透水性の不均質による巨視的分散を生じさせるために、断面が 7×3.5 cm (高さ 10cm) の木片 1 個と、断面が 3.5×3.5 cm (高さ 10cm) の木片 4 個を配置した。図-1 参照。実験区間の透水係数は 0.3 cm/s 、間けき率は 0.3 である。熱源としての棒状ヒーター(長さ 20cm、径 2cm)は深さ 3cm のところに、その軸を水槽の中心線と一致させて設置した。水槽内の温度分布は 47 個の熱電対で測定した。熱電対の検出部は上面から 5mm のところに置いた。ヒーターおよび熱電対の位置は、前掲の図-1 に示すとおりである。熱電対の配置は、予め色素を流して、その拡散状態を参考に決定した。温度読取りにはデジタル温度計(測定範囲 $-100 \sim +200^\circ\text{C}$ 、分解能 0.1°C)を用いた。水槽の上・下流端の水頭は可変である。

温度分布の測定は、浸透流が定常状態になったことを確認してからヒーターを作動させ、それから 3 時間後までは 10 分間毎に、それ以

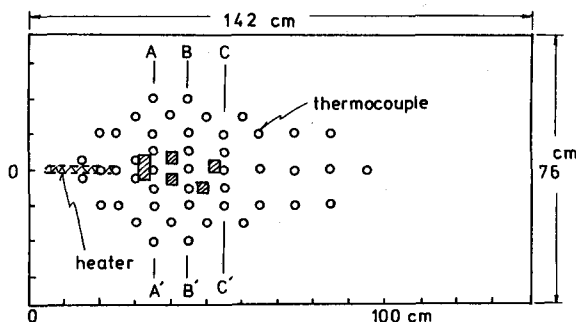


図-1 伝熱実験区間(平面図)

後は 30分毎に実施した。

2. 2 実験結果

図-2に、浸透場がガラス球のみからなる場合(Case-1)と、そこに木片を配置した場合(Case-2)の水温分布を示す。上・下流端の水頭差は、Case-1のとき 3cm(動水勾配 0.0211)、Case-2のとき 2.5 cm(動水勾配 0.0176)である。また流入水の温度は、Case-1のとき 12.2~12.5°C、Case-2のとき11.6 ~12.1°Cである。

前述のとおり水槽の上面は断熱されていないので、主としてそこからの放熱のために、実験開始後ほぼ3時間($t=3\text{hr}$)で水温分布は定常となる。Case-2では、Case-1と比較して、木片があるために明らかに温水域は広がっている。また温水域の下流への伸長も局部的にはCase-2の方がやや早く、長くなっているように見える。これは、図-3に示すように、 $t=3\text{hr}$ のときの断面 A-A' と B-B' (図-1参照)における水温分布からも指摘できることである。このように、木片群は巨視的分散に貢献していると言える。一方、個々の木片の下流では周辺に比べて低温になっており、したがって個々の木片のまわりでは微視的分散が支配的であると考えられる。これらの結果から、Case-2のような浸透場における伝熱現象(または移流分散現象)を熱伝導方程式(拡散方程式)に単一の熱伝導率(分散係数)を導入することによって解析することは必ずしも正しいと言えないであろう。

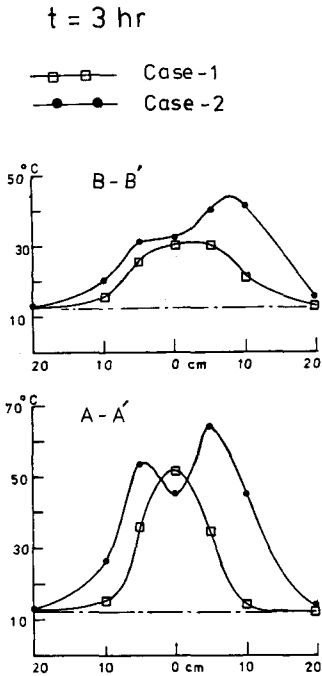


図-3 水温分布 (実験)

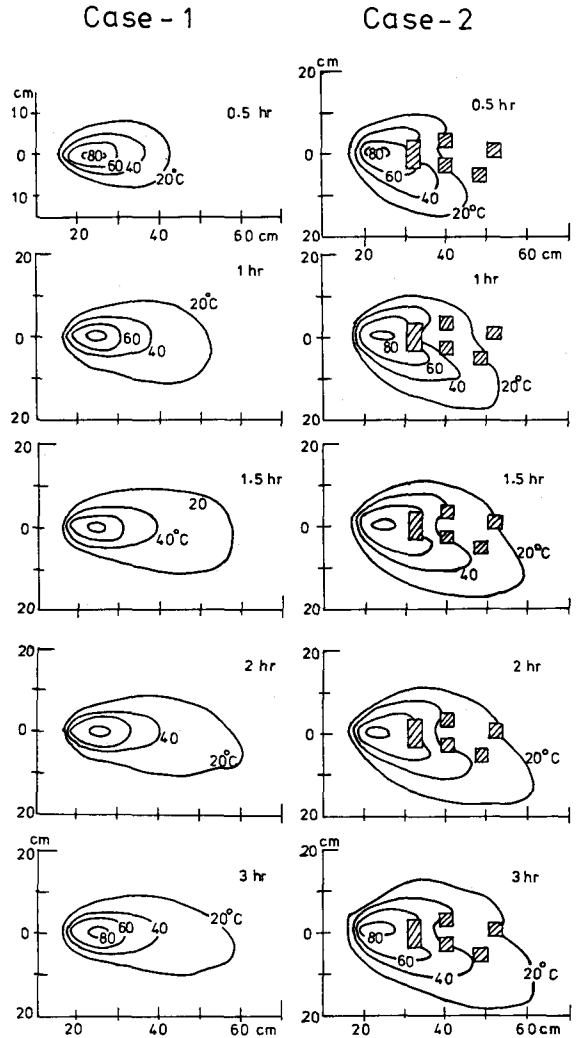


図-2 温水域の経時変化 (実験)

3. 数値シミュレーション

3.1 計算条件

上述の伝熱実験の結果を数値シミュレーションによって再現することを試みた。実験結果では、温水域は木片を配置することによって、木片がない場合に比べて広がっているが、個々の木片の下流では継続的に周辺より低温となっている。この木片背後の低温域は巨視的分散のスケールに対応する熱伝導率を採用した数値シミュレーションでは再現できないと思われる。そこで微視的分散機構に対応する熱伝導率を用い、熱伝導方程式を基礎方程式としてシミュレーションを実行しようとする、数値解の収束・安定性に関する問題が生じる。すなわち Peclet 数が 2 以上になると、解が不安定になるという問題¹⁾である。(ここに、Peclet 数は、 $Pe = v \cdot \Delta s / (\lambda / c\rho)$ であり、 v は浸透流速、 Δs は格子間隔、 λ は熱伝導率、 c は比熱、 ρ は密度である。)

対流項(移流項)が伝導項(分散項)に比べて卓越している場合(すなわち Peclet 数が大きいとき)、適用可能な数値解法として特性曲線法(粒子移動法)²⁾と FLIC 法³⁾があげられる。以下では、これら二つの数値解法によって数値シミュレーションを行い、またその結果を実験結果と比較することによって、それぞれの解法の適用性を検討することとした。

解析領域の要素分割を図-4に示す。この分割では、 $2 \leq \Delta x \leq 20\text{cm}$ (x は主流方向)、 $1 \leq \Delta y \leq 10\text{cm}$ である。以下に述べる計算条件のもとでは $Pe = 2 \sim 20$ となる。

透水係数は 0.3cm/s 、間げき率は 0.3 とする。上・下流端の水頭差は 2.5cm (動水勾配は 1.76×10^{-2})。透水部の熱伝導率は $5 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ とした。水とガラス球の熱伝導率および上記の間げき率から算定される透水部の熱伝導率は約 $1.8 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ である。この値を用いて行った予備的計算では温水域が実験結果に比べてかなり狭

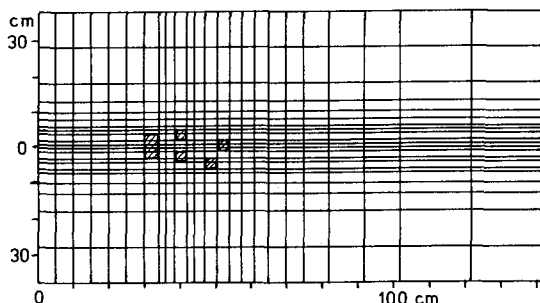


図-4 解析領域の要素分割

くなったので、以下のシミュレーションでは上記の値を採用することとした。透水部の見掛けの熱容量は、熱伝導率と同様に、間げき率およびガラスの熱容量から算定し、 $0.626 \text{ cal}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ とした。水槽の上面からの放熱を評価するために、そこでの熱伝達率は $7 \times 10^{-5} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 、外気温は 12°C とした。水温の境界条件は、上・下流端の水温を 12°C 、ヒーター周辺の水温は 92°C とした。側壁は断熱とした。また初期の水温は 12°C である。木片部については、解析手法上の理由で、透水係数を $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、熱伝導率を $1.8 \times 10^{-9} \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ とした、この部分が実質的に不透水性、非伝熱性となるようにした。

粒子移動法では最初、各要素に 4 個の粒子を配置した。その後は各タイムステップごとに、上流境界沿いの要素に 2 個ずつの粒子を流入させる。粒子の移動および各時刻における粒子温度(の増分)は、そ粒子にもっとも近い節点で計算した速度および温度に基づいて算定した。一方、節点での流速と温度は有限要素法によって算定した。このとき各節点での温度は、その節点にもっとも近い粒子群の平均温度とした。タイムステップ(Δt)は、解の安定条件²⁾を参考にするとともに、 Δt の間に粒子が二つ以上の要素を通過することのないように配慮して、 $\Delta t = 120$ 秒とした。

3.2 シミュレーション結果

粒子移動法によって算定した水温分布を図-5に示し、FLIC 法による算定結果を図-6に示す。また実験区間の A-A'、B-B'、C-C' 断面(図-1参照)において、シミュレーション結果と実験結果を比較したのが図-7 (粒子移動法)と図-8 (FLIC 法)である。

概観では、粒子移動法によるシミュレーションが FLIC 法によるものより実験結果に近い水温分布と

その経時変化を与えている。各断面における温水の拡散幅は、シミュレーションの方が実験よりも狭くなっている。これは、シミュレーションに採用した熱伝導率が実際よりも小さいためと思われる。このことは、また、各断面の温度が横方向に細く変っており、微視的分散の効果がやや強調されたシミュレーション結果となっていることからもうかがえる。

上述のとおり粒子移動法が FLIC 法よりも実験結果をよく再現しているものの、粒子移動法の難点は解析領域への連続的な粒子補給と個々の粒子の追跡のために大きな計算機容量を必用とすることである。そのため、この手法によって長時間にわたる現象を再現することは困難である。一方、FLIC 法では、粒子移動法に比べると、必用な計算機容量はかなり小さいが、タイムステップ(Δt)を小さくしなければ安定した解が得られないようである。例えば、このシミュレーションでは、粒子移動法で用いた $\Delta t=120$ 秒を FLIC 法に採用すると、解が発散した。したがって、FLIC 法では $\Delta t=30$ 秒とした。なお、 $\Delta t=10$ 秒とした場合は、 $\Delta t=30$ 秒のときとほとんど同じ結果になった。

これら二つの解析手法を比較すると、全般的には FLIC 法の方が適用が容易であり、長時間にわたる現象の再現に適していると考えられる。FLIC 法の適用に際して要素分割や物性値の設定を適切に行えば、微視的分散の影響を無視し得ない浸透場における溶質や熱の輸送現象がかなりよく再現されるものと思われる。

参考文献

- 1) Rasmuson, A., et al.: Chemical Transport in a Fissured Rock; Verification of a Numerical Model, Water Resources Research 18(5), 1479-1492, 1982
- 2) 神野健二、上田年比古：粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討、土木学会論文報告集第271号、p. 45-53、1978
- 3) 伊藤洋、佐藤邦明、清水昭男：変形FLIC法による亀裂性岩盤内の熱・物質拡散解析、第29回水理講演会論文集、p. 893-898、1985

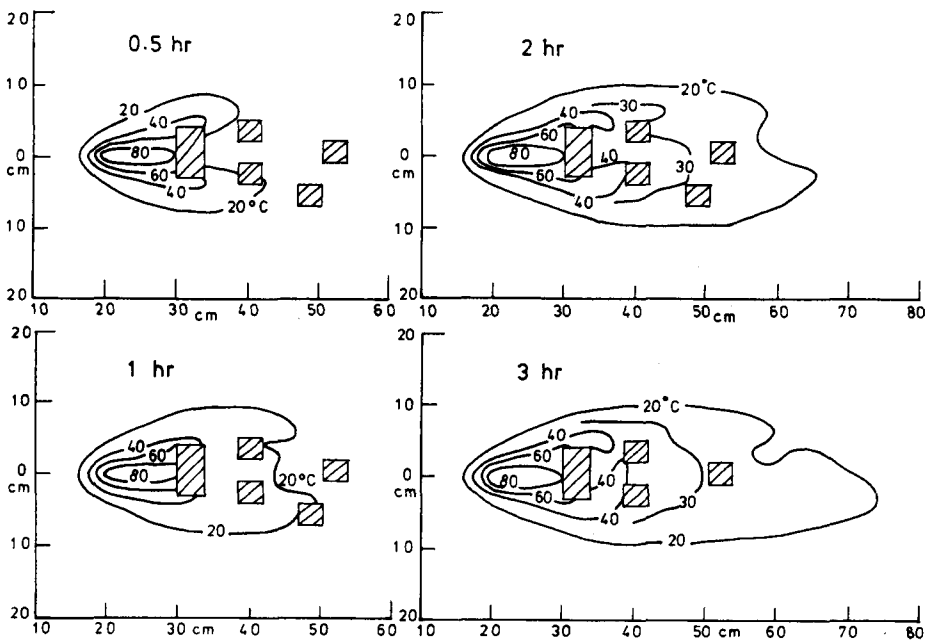


図-5 温水域の経時変化 (粒子移動法によるシミュレーション)

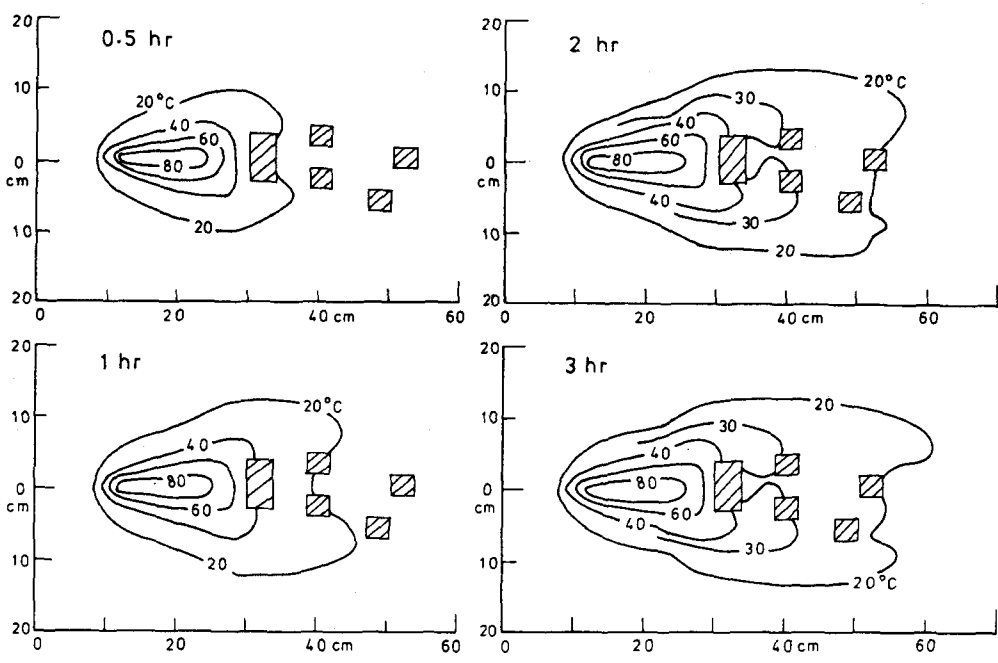


図-6 温水域の経時変化 (FLIC 法によるシミュレーション)

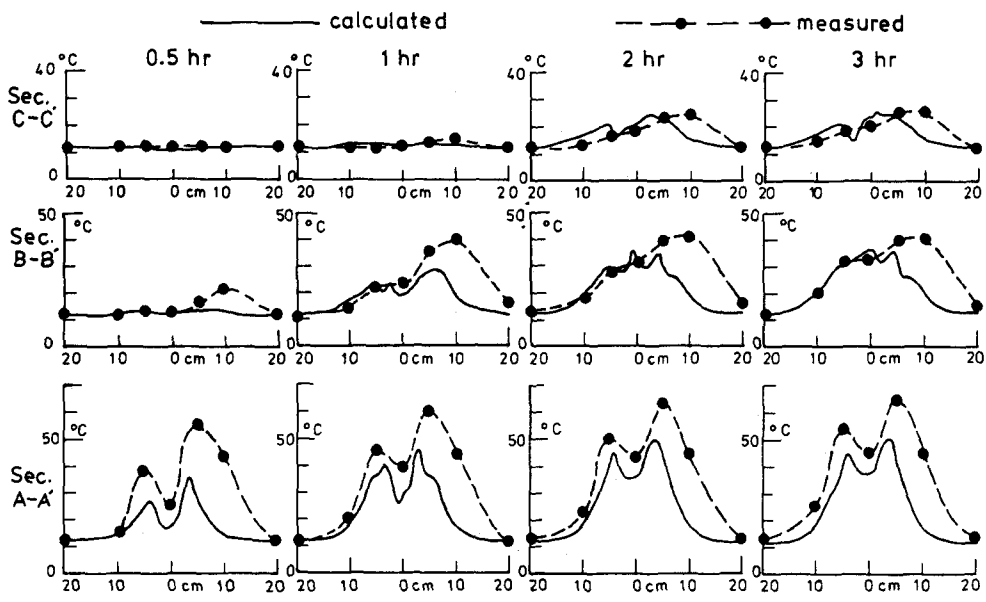
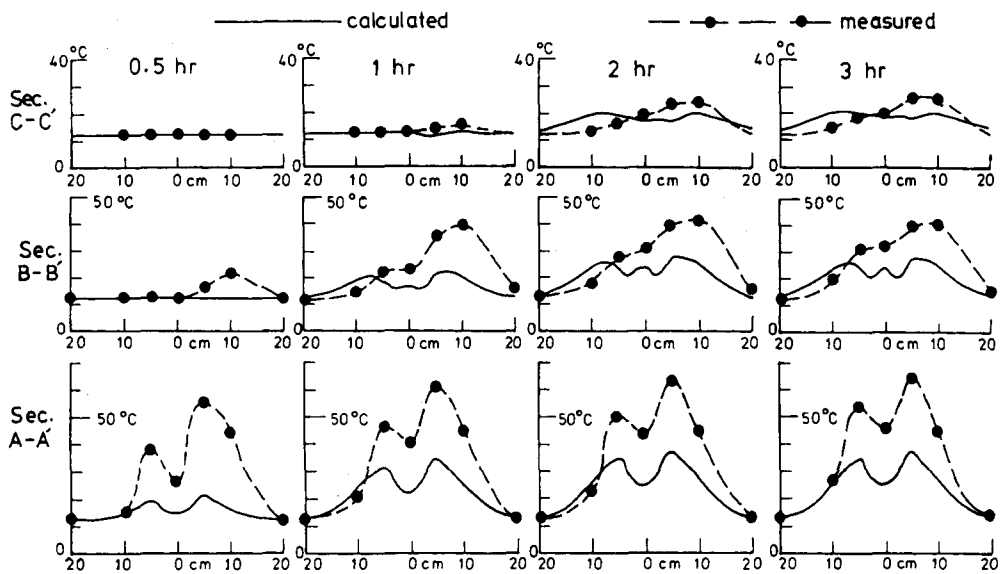


図-7 水温分布 (粒子移動法によるシミュレーションと実験結果の比較)



図一 8 水温分布 (FLIC 法によるシミュレーションと実験結果の比較)