

あるlogk確率不均一場におけるトレーサーの輸送に関する考察

九州大学 工学部 学生員 中川 啓 正会員 神野健二
九州産業大学 工学部 正会員 細川士佐男

1. はじめに

一般に、自然状態の帯水層構造は、その透水係数や空隙率の分布について不均一性を有している。著者ら¹⁾は、このような不均一な分布を持つように、模擬的に発生した場を用いてモデルの透水係数の対数変換値(logk)の空間分布の積分特性距離と巨視的分散定数(あるいは巨視的分散係数)の関係について検討した。しかしながら実際は、対象場全体を調べることは不可能であるため、簡単に観測井戸で得られる情報から、トレーサーの状態を推定するかが問題となってくる。そこで本報では、模擬的に発生した場に対してトレーサー輸送の数値計算を行い、そのデータをもとに2本の観測井戸を用いたトレーサーの流れ方向の分散について検討する方法を提案した。

2. 対象とした不均一場

図-1に、検討の対象とした不均一場を示す。透水係数の対数変換値(logk)の分布が自己回帰式²⁾に従うと仮定して発生し、ガラスビーズの分布にあてはめた。発生方法の詳細については、参考文献1)を参照されたい。それぞれの粒径の特性値については表-1に示す。

3. トレーサー輸送の数値計算

トレーサー輸送の数値計算は、圧力水頭に関する式と2次元移流分散方程式を連立して解く方法を用いた。基礎式等は参考文献3)を参照されたい。本手法で多孔性不均一場におけるトレーサーの挙動を精度良くシミュレートできることはすでに示しており³⁾、精度上問題はないと考える。境界条件については、上下流ともに静水圧分布とし、上面および下面は不透水境界とした。上流と下流の水頭差は50.5cmとし、領域はx方向に195cm、y方向に95cmとして、差分格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 1.25\text{cm}$ とした。トレーサーの注入をヘッドをかけて行くと、注入後に若干上流側にも分散するため、上流端より12.5cmの位置から線源としてトレーサーの瞬間注入を行った。また上流端より125cmの位置に第1観測井戸、187.5cmの位置に第2観測井戸として、それぞれで得られるデータを観測値として後で用いる。得られたデータの濃度分布を図-2に示す。図によれば浸透層の中央部分が他の部分に比べ卓越していることがわかる。特に浸透層最上部の輸送が遅れていることもうかがえる。このような輸送が速い層と遅い層の相対的な差が生じることにより、浸透層全体としての巨視的な分散が説明される。

4. 2本の観測井戸を用いた巨視的分散の判定方法

一般に分散係数は、図-3の様な時間変化をされると考えられている。

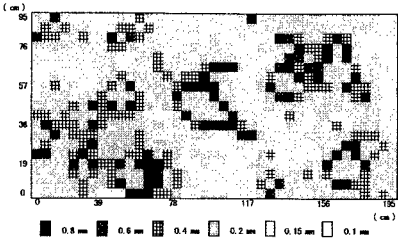


図-1 生成した不均一場($a_{xx}=a_{yy}=1$)

表-1 各ガラスビーズ粒径の物性値

$d_m(\text{mm})$	$k_s(\text{cm/s})$	$n(\%)$	$\alpha_L(\text{cm})$
0.1	8.92×10^{-3}	37.9	3.67×10^{-3}
0.15	1.84×10^{-2}	37.6	5.50×10^{-3}
0.2	2.98×10^{-2}	37.6	7.34×10^{-3}
0.4	8.57×10^{-2}	37.3	1.47×10^{-2}
0.6	2.16×10^{-1}	37.3	2.20×10^{-2}
0.8	3.58×10^{-1}	37.3	2.93×10^{-2}

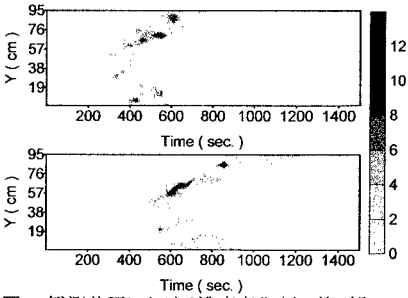


図-2 観測井戸における濃度変化(上:第1観測井戸, 下:第2観測井戸)

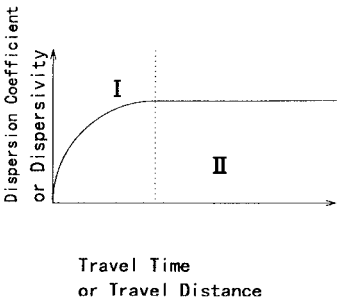


図-3 一般的な分散係数(定数)の変化

I の領域では分散係数は発達途中であり、流下時間あるいは流下距離にともない増加する傾向にある。一方IIの領域では分散係数はほぼ一定値となり、巨視的分散を用いた1次元の解析解の適用が可能である。すなわち、微視的な不均一性を考慮しなくても巨視的な分散係数を与えて均一な場としての取り扱いができる領域と考えてよい。ここで、観測井戸で観測されたトレーサーが、どちらの領域に存在するのか、あるいはどのような状態であるのかについて推定する方法を、図-4の流れ図にしたがって検討する。

(1) 第1観測井戸に於ける解析解による再現

解析解により第1観測井戸に於ける、断面平均濃度分布を再現するために、パラメータ U と A_L を最小自乗法により同定する。図-5はそのときの評価関数の等値線を示している。図より明らかなように、評価関数の最小値は、 $U=0.024\text{cm/s}$ 、 $A_L=2.6\text{cm}$ で $J=0.285$ である。なお評価関数 J は次式に示す解析値と測定値の標準偏差である。

$$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{obs.}(t_i) - C_{cal.}(t_i))^2}$$

添字 i は観測時点番号、 N はその総数である。さて、上記のパラメータを用いて第1観測井戸に於ける断面平均濃度の再現値と観測値を示したのが図-6である。観測値は複数のピークを持っておりガウス分布とは言い難いが、解析解による値の分布は概ね再現できているとして、ここでは第1観測井戸の巨視的分散定数を $A_L=2.6\text{cm}$ 、したがって巨視的分散係数を $D_L=0.06\text{cm}^2/\text{s}$ としよう。なお、観測値と解析値ともに濃度を50、時間を50のカテゴリーに分け、度数分布と見なし、度数分布の適合度検定をおこなうと、51%の確率で適合する。

(2) 第2観測井戸に於ける解析解と実測値の比較

ここでは、(1)で求められた解析解のパラメータ $U=0.024\text{cm/s}$ 、 $A_L=2.6\text{cm}$ を用いて解析した第2観測井戸での解析解と、第2観測井戸での観測値とを比較しよう。両者の結果を示したのが図-7である。同様に適合度検定を実施すれば、有意水準1%としても棄却された。したがって第1観測井戸において導かれた巨視的分散定数は、第2観測井戸では適用不可である。すなわち、トレーサーが第1観測井戸を通過した後から、第2観測井戸に到達する間でも、未だトレーサーの分散係数は定常に達していないことがわかる。

5. おわりに

本報で対象とした不均一場においては、最初の観測井戸から次の観測井戸に至る途中においても、分散が続けていることがわかった。すなわち、分散は成長段階であるため、より詳細に場を検討することが必要な場であると判定できよう。

謝辞：本研究は動力炉・核燃料事業団の「不均質多孔媒体中の水理・物質輸送に関する研究」に基づいて行われたもので、有益なご助言をいただいた畑中氏、井尻氏、亘氏に心より感謝申し上げます。

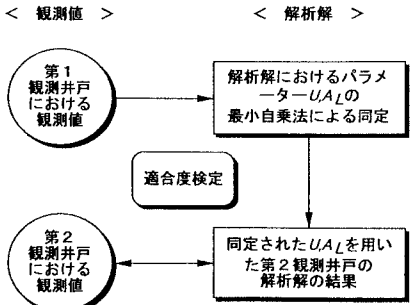


図-4 トレーサー分散状態の判定流れ図

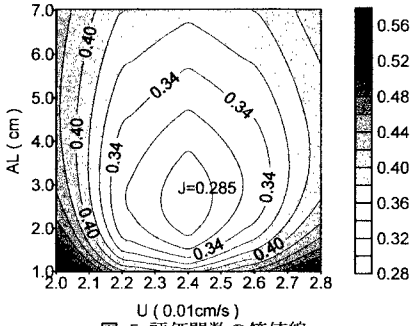


図-5 評価関数の等値線

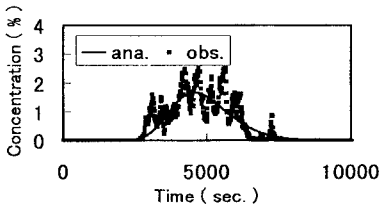


図-6 解析解と実測値の比較
(第1観測井戸)

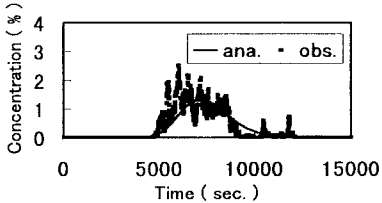


図-7 解析解と実測値の比較
(第2観測井戸)

参考文献

- 1) 中川ほか，土木学会水工学論文集，第42巻，1998，印刷中。
- 2) Smith, L. and R. A. Freeze, Water Res. Res., Vol. 16, No. 6, pp. 1543-1559, 1979.
- 3) 中川ほか，地下水・土壌汚染とその防止に関する研究集会第5回講演集，pp. 173-178, 1997.