

粗空隙浸透層内の水みちの流れの状態と空間的不均質性が分散係数に及ぼす影響

名古屋大学工学部 正会員
名古屋大学工学部 正会員

井上 康
松林宇一郎

名古屋大学大学院
名古屋大学工学部 フェロー

杉原 浩明
高木 不折

1. はじめに

近年の河川環境の整備において自然の回復や創出といった観点からのアプローチが盛んに行われているが、自然が持つ特性である水質浄化機能を論ずる場合、河床の礫層内での物質移動特性の解明が重要である。こうした粗空隙浸透層中の移流分散過程は層～乱流状態での現象であり、構造の複雑性、不均質性を原因とする機構的分散だけでなく、各々の空隙における分散が起こっていると予想される。本研究では一次元移流分散実験を行い、空隙内での分散と不均質性による機構的分散の特性を分散係数から調べることを目的とした。

2. 実験の概要

実験は図1の装置および図2の水路を用いて行った。実験水路は粗空隙浸透層中の水みちをモデル化した一本の水みちを持つ一次元水路、横方向にスケールアップし10本の水みちを持つ二次元均質水路および不均質場を持つ二次元不均質水路の3種類である。水路は塩ビ板を用い、内寸が長さ200cm、幅1.8cm(一次元)、18.0cm(二次元)、高さ1.0cmとなるように設計し、礫の代わりに直径1.8cm、高さ1.0cmの円柱形パイプを間隔0.3cm(均質)で千鳥配列となるように配置した。また、水路最上流には水の供給部、およそ5cm下流にNaCl供給装置を設けた。水は流量調整が可能なポンプにより供給した。さらに塩水注入口を $x=0$ として下流におよそ30cm毎に比電気伝導度測定用のステンレス製ブルーブ(直径0.3cm)を上下面に5対取り付け付けた。実験方法は初期状態として水を定常かつ飽和となるように流し、ある瞬間にNaCl溶液を瞬間面源として注射器を用いて注入する。この時刻を $t=0$ として各ブルーブにより比電気伝導度の時間変化を一定時間間隔で測定した。流量を変えて一連の操作を繰り返した。

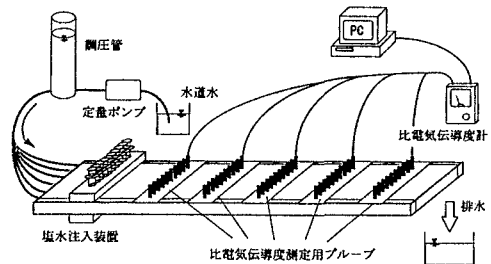


図1 実験装置

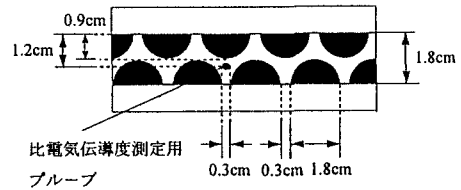


図2a 一次元水路と寸法

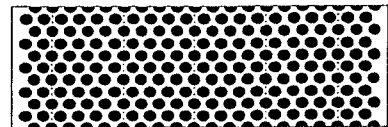


図2b 二次元均質水路

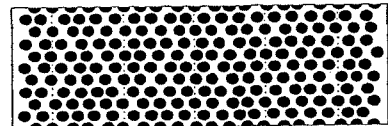


図2c 二次元不均質水路

3. 流速分布による分散に関する理論

浸透流による物質移動は基礎式として流下方向に x 軸を取ると(1)式で表される。ここで、 c :濃度、 u :実質流速、 D :分散係数、 n :空隙率である。次に個々の空隙内での分散を考える。空隙内の流れは流速分布を持つせん断流であり、空隙断面での流速分布、濃度分布を時間的平均 $\bar{u}, \bar{c}$ 、乱れ成分 u', c' に分け、さらに $\bar{u}, \bar{c}$ を断面平均値 U, C とそこからの偏り $\hat{u}, \hat{c}$ に分けて考えれば、流速分布と濃度分布による分散量が(3)式のようになる。 D_L を移流分散係数というが、ここでは流速分布による分散係数と呼ぶ。

$$\frac{\partial nc}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1) \quad \langle \hat{u} \hat{c} \rangle = -D_L \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3) \quad C = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp \left[-\frac{(x - Ut)^2}{4Dt} \right] \quad (4)$$

$$u = U + \hat{u} + u' \quad \bar{u} = U + \hat{u} \quad , \quad c = C + \hat{c} + c' \quad \bar{c} = C + \hat{c} \quad (2)$$

キーワード: 分散係数, 流速分布, 不均質

〒464-01 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学研究科地圏環境工学教室 TEL 052-789-5018 Fax 052-789-3837

4. 結果と考察

実験から得られた計測値より式(1)の瞬間面源での解析解(4)を用いて、分散係数 D と実質流速 U の組を2乗誤差最小の基準で求めた。得られた D と U の関係を示すと、一次元と二次元の比較が図3、均質と不均質の比較が図4となる。 D と U の関係はどの水路の結果においても非線形であり、次の特徴がある。まず、傾きが大きく変化する点の存在がそれぞれ2カ所確認されることである。但し、変化点の流速は水路により異なり、特に第1の変化点での流速は一次元、不均質、均質の順になっている。次に第1の変化点までの低流速域では直線的に D が増加し、変化点流速に達すると D の値がほぼ一定となり、さらに流速が増すと再び増加傾向を示すが、その傾きは低流速域よりも小さいことである。不均質水路では第1の変化点がやや分かりにくい、徐々に一定値に近づいている。砂礫など小粒径浸透層における D と U の関係は従来からほぼ線形の関係があると指摘されてきたが、本実験水路においては大きく異なる結果となった。これは流れが層流域のみでなく乱流域まで達していること(図5)、また機構的分散以外の間隙内部での分散の寄与が大きいたことが原因であると考えられる。

このような傾向に関して、間隙内の流れの流速分布により定性的な説明を行う。水みちの流れを *Metylen Blue* 溶液により可視化し簡単な層流限界流速の測定を行ったところ、一次元では2.5cm/s、均質では3.5cm/s、不均質では2.35cm/s程度となった。層流限界が各水路の第1変化点の流速値以上であることから、低流速域の線形変化は層流に対応する、つまり D の変化は流れの状態により決まると推察された。層一乱流の流速分布を水みちを管路として考えると図6となる。3.で述べた流速分布による分散の概念より、断面平均流速からの流速分布の偏りが大きければ分散も大きくなることから、乱流よりも層流である方が D の増加率が大きいと考えられ、図6はそれを示している。また、層流から乱流の遷移域は実際は一定値ではなく、図7に示すように一旦値が減少するような構造になっていると考えられる。

不均質では D の変化が均質と比べ緩やかになっており、第1の変化点は明瞭ではない。不均質場では機構的分散も加わると考えられるが、変化点を過ぎると値の逆転が起こり、第2の変化点後は不均質の値が大きくなっている。流れが乱れると間隙内流速分布が変化し、 D が小さくなる傾向があり、不均質性のため乱れが徐々にあるいは局所的に生じ、このような傾向になると推察される。また高流速域における不均質の D の値、傾きの大きさは機構的分散が大きく影響していると考えられる。

5. まとめ

本研究は粗空隙浸透層内での分散特性を間隙内の分散に着目して、分散係数の実質流速に対する傾向から流れの状態による分散係数の機構および不均質性による機構的分散への影響について定性的な説明を行ったが、今後の課題として壁面の影響の考慮、定量的な説明により分散機構について解明することが残された。

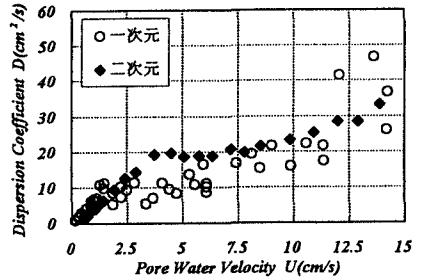


図3 分散係数と実質流速の関係 (一次元と二次元)

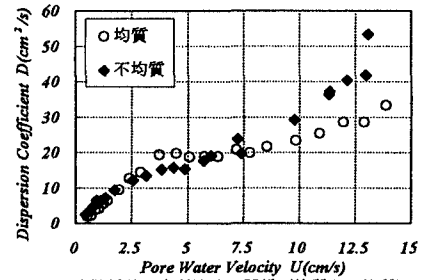


図4 分散係数と実質流速の関係 (均質と不均質)

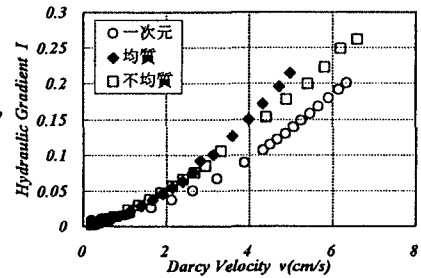


図5 浸透特性

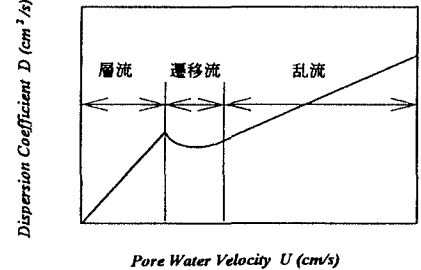


図7 分散係数の傾向

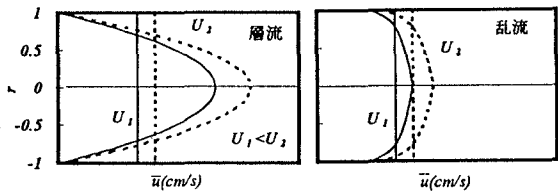


図6 層流-乱流の流速分布の比較