

粗空隙浸透層内の一本の水みちにおける拡散特性に関する研究

名古屋大学大学院工学研究科

杉原 浩明

名古屋大学難処理人工物研究センター

正会員 井上 康

名古屋大学難処理人工物研究センター

正会員 松林字一郎

名古屋大学大学院工学研究科

フェロー会員 高木 不折

1. まえがき

人工的な礫層を用いて水質の浄化を試みる場合、その層内での流れおよび物質移動の特性の把握が重要となる。礫層のような粗空隙浸透層における物質の分散現象は、浸透層の構造のネットワークの複雑性に起因する機構的分散と流速分布などの流れの状態に起因する各空隙内での分散との和で表されるのではないかと考えられる。本研究では浸透層中の1本の水みちを取り出して考えることにより、機構的分散の影響がない、すなわち、各空隙内で起きる分散現象のみについて、その特性を実験的に調べることを目的とする。

2. 管路の移流分散に関する理論的考察

流れが流速分布を持つせん断流であると考え、一様流であるよりも分散効果は著しく増大する。ある径の管路内の流れがせん断流であると考えたとき、拡散物質の保存則は断面平均流速 U 、断面平均濃度 C を用いて(1)式のように表すことができる。ここで D_L は移流分散係数、 D_t は乱流拡散係数である。

この D_L 、 D_t に関して Taylor¹⁾ は半径 a の円管内の乱流について解析を行い、(2)、(3)式を導いている。ここで u_* は摩擦速度である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ A(D_L + D_t) \frac{\partial C}{\partial x} \right\} \quad (1) \quad D_L = 10.1au_* \quad (2) \quad \langle D_{tx} \rangle = 0.052au_* \quad (3)$$

3. 実験方法

実験は粗空隙浸透層内の一本の水みちでの分散現象の素過程を知るために、それを単純化した水路（長さ200cm 幅1.8cm 高さ1.1cm）を用いて行った。装置全体図を図-1に示す。水路内部は、図-2に示すように半円形の塩ビパイプを千鳥配列にし、屈曲した水路とした。まず、一定流量の水道水を供給し定常状態とし、ある瞬間 ($t=0$) に瞬間面源として NaCl 溶液を約 5ml 注入し、その後の水路内の比電気伝導度の時間変化を電気伝導度計を用いて測定した。なお、比電気伝導度測定用ブルーブは NaCl 溶液注入口から流下方向に 31.5cm, 63.0cm, 94.5cm, 126.0cm, 157.5cm のところに設置した。流量を変えてこれら一連の実験を繰り返した。

4. 結果と考察

実験から得られた比電気伝導度 C' の Break Through Curve を(1)式の理論解と比較し、2乗誤差最小の規準で実質流速 U と分散係数 $D (=D_L + D_t)$ の組合せを求めた。図-3に各ブルーブにおける比

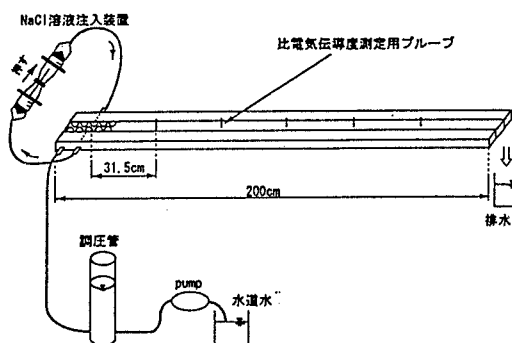


図-1 実験装置全体図

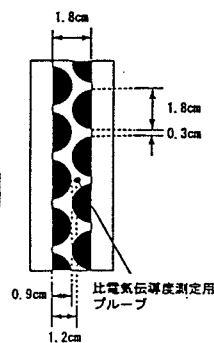


図-2 水路内部

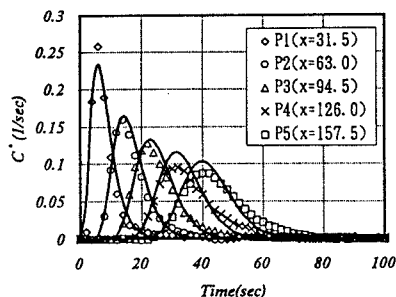


図-3 比電気伝導度の時間変化

電気伝導度 C^* (注入量が1になるように標準化した C) の時間変化の一例を示した。また同図中の実線は求められた U と D を用いて計算した理論曲線である。

図-4は流量を変えて行った実験から求められた U と D の関係である。これを見ると、その傾きが大きく変化する流速の存在が見てとれる。これまでの礫層を用いた分散実験では、今回のように U と D の関係が大きく変化するという現象は確認しておらず、これは新しい特徴である。

この傾きの変化の原因を考える。まず動水勾配 I と Darcy 流速 v の間には図-5に示す関係があり、それは Forchheimer 則 $I = I_0 + av + bv^2$ に従い、その一次の項(av)は層流、二次の項(bv^2)は乱流を表すと考えられる。変化点における Darcy 流速 v は約 0.6cm/sec で、このときの比率 bv^2/av は 0.4 程度である。これより、分散係数が大きい増加率を示す流速域では、乱流に比べて層流のほうが卓越していると推測できる。また Metylen Blue 溶液による可視化実験の結果からも、 D が大きな増加率を示す範囲は層流域であると確認した。

一方、乱流における管路の移流分散係数の理論式は Taylor により導かれている。これの導かれた場はこの実験の水路とは異なるが、ここではそのまま比較する。図-4において理論式と実験値とを比較すると、分散係数 D が緩やかな増加率を示す部分は Taylor の理論式に対応していることが分かる。なお、実験値の方が D の値が大きいことについては、可視化実験において見られた水路の凹凸におけるトラップの発生が原因であると考えられる。このことから、分散係数の増加率が緩やかな部分の流れは乱流域であると考えられる。

以上より、分散係数 D の増加率の変化は層流と乱流の違いにより起きるのではないかと考えられる。

そこで層流については Hagen-Poiseuille の流れを、乱流については Plandtl-Kármán の対数分布則を用いて流速分布を計算した(図-6)。いま断面平均流速を少し増加させた場合を考えると、偏りの増加分は乱流より層流の方が大きくなる。移流分散は断面平均流速および濃度からの偏りによって発生する分散である。その結果、実質流速に対する分散係数の増加率も層流の方が大きくなったと考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた結論は以下の通りである。

- 1) 水みちでの流れは層流から乱流であり、動水勾配 I と Darcy 流速 v の関係は Forchheimer 則に従う。
- 2) 分散係数 D は実質流速 U に対する増加率を大きく変化させる流速をもち、その変化は層流・乱流という流れの状態に対応するものと考えられる。
- 3) 乱流域では Taylor による直線管路での移流分散係数とほぼ近い値となる。
- 4) 分散係数の増加率が層流の方が大きいのは、流速分布を考えた場合、断面平均流速からの偏りの増加率が乱流のときに比べて大きいからである。

＜参考文献＞

- 1) G.I.Taylor : The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe, Proc. Roy. Soc. A, 223, 1954, pp446-468

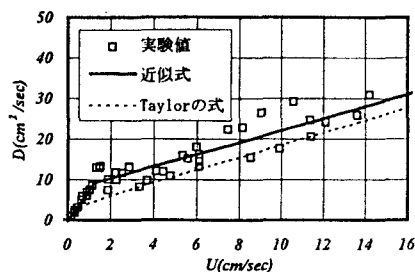


図-4 実質流速 U と分散係数 D の関係

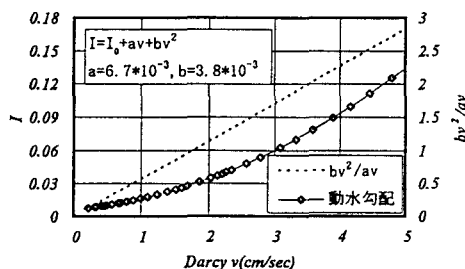


図-5 Darcy 流速 v と動水勾配 I の関係

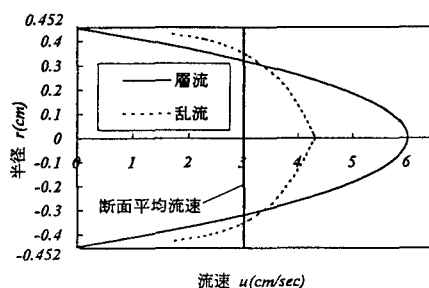


図-6 層流・乱流の流速分布