

粗空隙をもつ浸透層における物質移動に関する研究

名古屋大学大学院 井上 康
 名古屋大学工学部 正会員 松林宇一郎
 名古屋大学工学部 正会員 高木 不折

1. まえがき

河川やそれを模した環境下での水質の浄化を論ずる場合、河床の礫層内での物質移動の特性の解明、把握は非常に重要であると考えられる。こうした粗空隙中の物質の移流・分散過程は、層流～乱流状態での現象であると考えられ、河道や管路内での乱流拡散と多孔体内での機構的分散が同時に起こることが予想される。そこで、本研究では、自然河川の礫を用いた移流分散実験を行い、その結果得られる分散係数について、単に、現象論的係数と考えるのではなく、できるだけ論理的な説明を試みた。

2. 礫層内の移流・分散過程に関する理論的考察

2.1 浸透流の移流分散現象への混合距離理論の適用

一般に、浸透流中における物質輸送は、平均流による移流と分子拡散のみによる拡散過程による質量保存の式で表現されるが、これを浸透場における経路のランダム性による流速変動のある場合に拡張すると、(1)式となる。

ここで、 D_t は機構的分散係数と言われ、Prandtlの混合距離理論を援用すれば、乱れの強度を $\sqrt{u'^2}$ 、混合距離を l とすると、 D_t は(2)式となる。また、場の特性量である分散度 α を用いると D は(3)式で表される。

ここに m は定数であり、1～2の値をとるとされている。ここで、 u_R は実質流速である。

$$\frac{\partial \lambda \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda (D_m + D_{tx}) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda (D_m + D_{ty}) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda (D_m + D_{tz}) \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right\} \quad (1)$$

$$D_t = l \cdot \sqrt{u'^2} \quad (2) \quad D = D_m + \alpha u_R^m \quad (3) \quad u_R = u_m \sqrt{\frac{d}{d}} \quad (4) \quad \sqrt{u'^2} = \frac{u_m}{E \left[\sqrt{d} \right]} \left(E[d] - E \left[\sqrt{d} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

2.2 浸透流の乱れ速度の評価

浸透場の構造は複雑なので、ここでは2方法により単純化を行ない、浸透場の乱れ速度を評価する。

(1) 粒径分布による方法

ある粒径 d の礫の近傍の流れは、浸透層を構成する礫が全て粒径 d の球である場合と同一であり、また、礫の配列は角柱体型であると仮定する。屈曲しながら連続する空隙中の流れを管路と考えると、空隙中の流れの損失水頭はDarcy-Weisbachの式を変形した式で表され、これより、平均粒径 $\bar{d}$ として混合粒径の場の平均実質流速を求めると、個々の空隙の実質流速は(4)式で、流速のばらつきを示す標準偏差は(5)式で求めることが出来る。これらの式は、 u_R の分布が $\sqrt{d}$ の分布で評価できることを意味している。この手法は、個々の空隙には1つの実流速が対応し、空隙内での流速分布は考慮しない形になっている。したがって、(4)式から、これによる $\sqrt{u'^2}$ の評価は過小となっていることが予想される。

(2) 空隙の横断面積を基礎とする方法

礫層の個々の空隙も、実際には複雑で同一の空隙でも狭い部分と広い部分があり、前者では流速は小さく後者では大きいと考えられ、これらの流速の相違も分散に関連していると考えられる。そこで、空隙の微小部分の流れが平行平板間の乱流として取り扱い、空隙の開き a の分布が与えられる場合の実流速の確率分布の評価法を考える。

開き a の平板間の乱流の流速は $\sqrt{a}$ に比例する。したがって、様々な間隙をもつ流れの平均実質流速と標準偏差を求めると、(4)、(5)式の d の代わりに a を用いた式で与えられる。ここに、 F は平均操作を示す。

3. 実験および解析

実験には可変勾配水路を用い、これに粗空隙浸透層として砂利を詰めて行った。浸透層内には図-1に示した①～⑩の各位置に、比電気伝導度測定用のプローブが配してある。水路は幅10cm、高さ35cm、長さ600cmである。水路下流でのオーバーフローと供給流量により水深の制御を行い、水路勾配と動水勾配の一致をはかっている。礫は粒径が15mm～20mmのものを使用し、浸透層の間隙率は0.441、層厚は28cmである。

移流分散実験には、トレーサとして比電気伝導度 $C(\mu S/cm)$ を用いる。水路勾配の設定後、水道水を供給し、

浸透層内の流れを飽和定常の等流状態にする。その後、水道水を止めると同時に、同流量のNaCl水溶液を供給し、その時刻($t=0$)からの浸透層内の比電気伝導度の変化を各プループにより測定する。水路勾配を変えて、これら一連の実験を繰り返した。

分散実験の結果より得られた溶液の比電気伝導度 C ($\mu S/cm$) の測定結果を無次元表示し、1次元移流分散の解析解と比較し両者が最も一致する分散係数 D を両者の2乗誤差最小の基準で求めた。こうして求めた各プループの比電気伝導度 C の破過曲線の一例が図-2のプロットである。図-2には、同定された $\overline{u_R}$ 、 D を用いた理論曲線が実線で示されている。図-3は、得られた $\overline{u_R}$ 、 D の関係を示しているこれから、(3)式に対応するものとして、 D の式として次式を得た。

$$D = 1.41\overline{u_R}^{1.46} \quad (6)$$

4 結果の考察

乱れ速度の評価について、(1)の方法については100個の礫を無作為に選び出し、その重さを測定し、礫の比重を一定(2.5)として体積を求め、等価な球の直径として粒径分布を求めた。そして、(5)式により $\sqrt{\overline{u_R'^2}}$ を求め、実測の D より(2)式から混合距離を求めた。

一方、(2)の方法については、数10個の礫をシリコン充填剤と混ぜ合わせ、固まらせる。その後、礫を取り出し、礫と礫の間の膜状のシリコンを、礫と礫に直交する方向に切り刻んでその断面形状から隙間の厚さ a を測定し分布を求め、(1)と同様に混合距離を求めた。これらの結果を表-1に示す。ガラスビーズを用いた実験では混合距離は平均粒径の約2倍の値が得られている。この結果からすると、(1)の方法による結果は、極めて大きな値であり、 $\sqrt{\overline{u_R'^2}}$ がかなり過小評価されていると判断でき、(2)の方法は、一見かなり実際に近いようにも見える。しかし、この方法で求めた、隣り合う微小区間の流速は解析では互いに独立であると仮定しているが、実際には連続していて、(2)の方法は逆に $\sqrt{\overline{u_R'^2}}$ を過大評価する傾向がある。こうして考えると、常識的な混合距離に対して今回得られた分散係数が何らかの理由で大きすぎると判断する方が妥当であろう。この1つの解釈として、空隙内の乱れが考えられる。すなわち、大空隙の多孔体では、機構的分散以外にも、空隙内の乱流拡散が働き、結果として分散係数が大きくなったと推察される。

5. まとめ

本研究では、比較的空隙の大きい多孔体内での分散特性を考察した得られた結果は以下の通りである。

- 1) 多孔体の分散過程に混合距離の理論を援用し、分散係数がどのように構成されているかを示した。
- 2) 多孔体内の浸透流の間隙の実質流速の分布を評価する2つの手法を提案した。
- 3) 傾斜水路の浸透流において移流分散実験を行い、分散係数を求め、混合距離理論を当てはめてみた。その結果、混合距離がかなり大きくなる事が分かった。これは、浸透流による分散が単なる機構的分散だけではなく、空隙内の乱流分散も効いているためと考えられた。

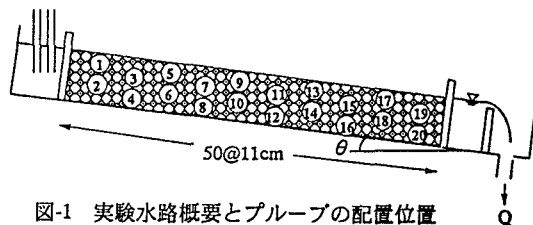


図-1 実験水路概要とプループの配置位置

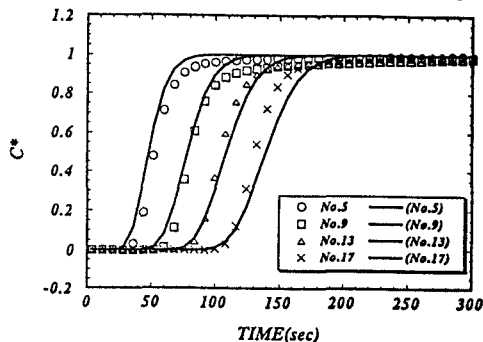


図-2 破過曲線

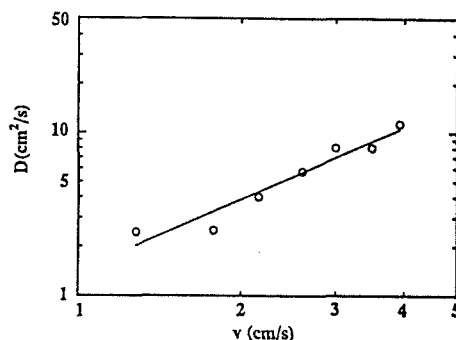


図-3 D - $\overline{u_R}$ 関係

表-1 混合距離

勾配	u_m (cm/s)	混合距離 (cm)	
		方法 (1)	方法 (2)
0.038	3.93	54.0	8.72
0.031	3.50	51.1	8.27
0.026	3.00	47.7	7.70
0.020	2.59	44.5	7.20
0.016	2.15	40.8	6.61
0.012	1.78	37.4	6.06
0.008	1.28	32.1	5.21