

大粒径の球体で構成される透水層中の一次元移流分散特性に関する研究

名古屋大学大学院 ○太田雄一郎

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 自然環境保護の意識が高まってきた今日、水理学の分野ではこの動きに対応するために近自然工法を行うようになってきている。元来、自然河川の河床は礫、砂利などにより構成されており、流水は大きな空隙と広い接触面を持った河床と接し、その中を通過することにより浄化される。このような砂礫層内の流れは礫の粒径や空隙の分布により決まる。そこで本研究は、河床のモデルとして球体で構成された透水層を用いて、層内の流れによる物質輸送の特性を解明しようと試みた。

2. 一次元移流分散に関する理論的考察 透水層中の物質輸送は平均流による移流と分子拡散のみによる質量保存の式で表現されるが、透水層中の経路のランダム性に起因する流速変動を考慮すると(1)式となる。ここで D_t は機構的分散係数と言われる、ここで混合距離理論を多孔体の流れに適用すれば、空隙内流速変動強度を $\sqrt{u'^2}$ 、混合距離を l として D_t は(2)式で表せる。一方、経験的には、場の特性量である分散度 α と実質流速 u_R を用いて(3)式で表されることが多い。ここで n は定数であり1~2の値をとるとされている。

動強度を $\sqrt{u'^2}$ 、混合距離を l として D_t は(2)式で表せる。一方、経験的には、場の特性量である分散度 α と実質流速 u_R を用いて(3)式で表されることが多い。ここで n は定数であり1~2の値をとるとされている。

$$\frac{\partial \lambda C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda (D_m + D_t) \frac{\partial C}{\partial x} \right\} \quad (1) \quad D_t = l \sqrt{u'^2} \quad (2) \quad D = D_m + \alpha u_R^n \quad (3)$$

本研究では、この分散係数 D_t の特性実験的に検討する。

3. 実験方法 実験は図-1に示したような、焼成セラミック製球状材を層厚10cmに詰めて構成した透水層を持つ可変勾配水路（長さ540cm、幅20cm、高さ35cm）を使用した。上流端給水部において定常等流状態で水道水を供給し、ある瞬間からトレーサーとして使用したNaCl溶液へステップ関数的に切り換え、それによって生ずる比電気伝導度の時間変化を水路内各所（上流端から50cm、100cm、200cm、300cm、400cm、500cmの6カ所）に設置した比電気伝導度測定用プローブによって同時計測した。流速を変えて同様の実験を繰り返した。なお透水層を構成する球状材は3種類（粒径12~8mm、8~4mm、5~3mm、これをcase1,2,3とする）を詰め替え実験した。平均粒径と空隙率を表-1に示す。

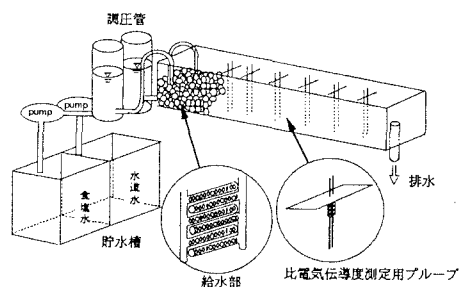


図-1 実験装置

表-1 平均粒径と空隙率

	平均粒径(mm)	空隙率
case1	9.13	0.423
case2	6.80	0.408
case3	3.68	0.406

4. 実験結果と考察

4.1 分散係数Dの算定

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化表示し、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を2乗誤差最小の基準で求めた。こうして求めた各プローブの比電気伝導度 C^* の時間変化の一例(Break Through Curve)を図-2に示した。実線は理論曲線である。実験値は若干テリングがみられるが、おおむね理論値と一致している。また本研究における透水層中の流れは、断面平均流速と動水勾配の関係が線形であることから全て層流であったと判断できる。

3種の透水層の粒径各々について分散係数 D と実質流速 u_R の関係を示したものが図-3である。これらを(3)式の形に整理すると次式となる。なお D_m は通常は極めて小さいといわれており、ここでは $D_m=0$ としている。

$$D = 1.75u_R^{0.80} \quad (\text{case1})$$

$$D = 2.50u_R^{1.00} \quad (\text{case2})$$

$$D = 2.20u_R^{0.78} \quad (\text{case3})$$

4.2 流速変動強度による分散係数Dの評価

透水層中の流れを、屈曲しながら連続する空隙の中の管路流れの集合と考え、流れの抵抗に関してHagen-Poiseuilleの式に従うとすれば、個々の空隙の実質流速 u_R とばらつきを示す標準偏差は平均実流速 $\bar{u}_R$ 、空隙に対する粒径 d 、全体の平均粒径 $\bar{d}$ を用いて(4)、(5)式で表される。また流速の(5)式となる。

$$u_R = \bar{u}_R \frac{d^2}{\bar{d}^2} \quad (4)$$

$$\sqrt{u_R'^2} = \left[\bar{u}_R^2 \left\{ \left(\frac{d^2 - \bar{d}^2}{\bar{d}^2} \right)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (5)$$

混合距離によるモデル化を検討するため(2)式に(5)式の値を代入して混合距離 l を求め、表-2に示した。しかし、常識的には混合距離は粒径の数倍程度と考えられ、この値は大きすぎる。これは各空隙の流速を1つで代表したため流速変動強度が過小評価されたためと考えられる。そこで、空隙内の流速分布も考慮するため、図-4のようにモデル化し流速分布の分散を推定した。こうして得られた混合距離を表-3に併記した。

粒径0.25~0.75mmのガラスビーズを用いた飽和流中の縦方向の分散に対し松林ら¹⁾は混合距離が粒径の1.8倍になると報告している。本研究で使用したセラミック製ろ材も同じ球体であり相似性があるとして比較すると、混合距離 l は空隙内の流速分布を考慮にいたした場合、case2, 3は少し大きすぎるが、case1は同程度であり、ほぼ同様な構造で説明ができると考えられる。また、case2, 3で大きくなった理由としては、粒径が小さくなり、死水域(dead end pore)ができることなどが考えられる。

5. まとめ 本研究において得られた結論は以下のとおりである。

(1) 本実験の範囲では流れは層流で分散係数Dと実質流速 u_R の関係はほぼ線形である。

(2) 透水層中の層流による分散係数Dを構成する混合距離は、粒径分布と空隙の内部の流速分布を考慮することにより、ある程度説明できる。

<参考文献> 1) Uichiro Matsubayashi, Laxmi Prasad Devkota and Fusetsu Takagi : Characteristics of Mixing Length in Dispersion Through Unsaturated Glass Beads Media, Annual space J. Hydraulic Engineering, JSCE, vol.40, 1996, pp.425-430.

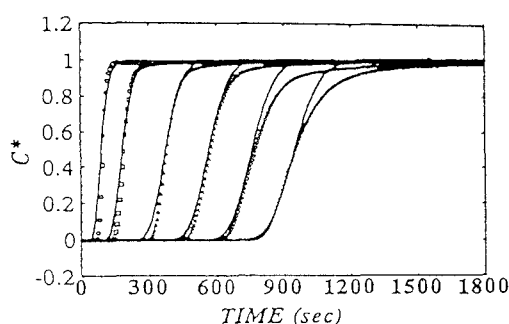


図-2 Break Through Curve

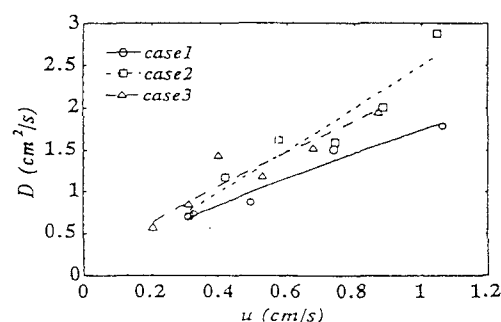


図-3 分散係数Dと実質流速 u_R の関係

表-2 混合距離

	混合距離(cm)	
	空隙内の流速分散を考慮せず ^a	空隙内の流速分散を考慮した
case1	12.5(14倍)	2.18(2.4倍)
case2	10.2(15倍)	2.43(3.6倍)
case3	9.2(25倍)	2.43(6.6倍)

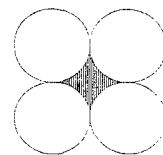


図-4 空隙形状のモデル