

II-227

表面流を伴う浸透層内流れの構造と運動量交換機構に関する検討

京都大学工学部 正 員 清水義彦
 京都大学工学部 正 員 中川博次
 京都大学工学部 正 員 村上正吾
 京都大学大学院 学生員 岩田美幸

1. まえがき 浸透流と表面流が共存する場合での流れの構造は両者の間で互いに影響を及ぼし合って流れが決まるという相互作用が本質的な問題といえる。すなわち、透水性河床面を介在して両者の間に運動量交換が活発に行われ、早い表面流にひきずられた形の付加的な浸透流流速成分が生じ、河床面でのすべり速度が表面流自身の構造も変化させる。本研究は表面流の存在によって透水性河床面近傍の浸透層に生じるShear Layerに注目し、このような場合での流れ構造を運動量拡散に焦点をあてて検討するものである。

2. 実験方法 透水性河床構成材料として直径2.98cmのガラス玉を用い、これを密な配列で4層積んだものを水路幅21.5cmの直線水路内に敷き詰めて実験を行った（図-1）。実験条件を表-1に示す。透水層の空隙率は0.358、また透水試験の結果から浸透流の抵抗則をWardの提案した非線形Darcy則で整理すると、透水係数 $K=2.80 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 、非線形抵抗係数 $c=5.54 \times 10^{-2}$ であった。表面流流速はピトー管及び2成分x型hot-filmを用いて計測した。次に、浸透層内の平均流速場はメチルアルコールで比重を1.0に調節した3.0%の塩水をトレーサとして用い、導電率計を流れ方向に3本設置して塩分濃度変化を記録し、ピーク濃度の出力時間差から求めた。さらに浸透層層厚方向に導電率計を設置し、河床面から定常投入されたトレーサの濃度変化を計測し、これと1次元拡散方程式から得られる解とを比較することから、浸透層内の鉛直拡散係数を評価した。

3. 実験結果及び考察

図-2に得られた流速分布の代表例を示す。浸透層内の透水性境界面近傍には表面流にひきずられた指数関数型の流速分布が認められる。すなわち、この領域においては表面流と浸透流の間に活発な質量・運動量交換の存在が示唆される。そこで、求められた鉛直方向の塩水濃度拡散係数を図-3に示し、同図に、比較のため本実験とはほぼ同様な条件で行われた大垣ら（1983）のデータも併せて表示する。これより両者はオーダー的には良好に一致しており、透水性境界面近傍では表面流水脈と浸透層との間で、活発な物質交換が生じているものと理解される。

Table 1 Experimental conditions

Run	Ie	h	Um	Re	Hs
		(cm)	(cm/sec)		(cm)
1	0.002	5.67	43.5	23510	8.91
2	0.002	8.61	48.7	38690	8.91
3	0.001	6.03	31.9	18080	8.91
4	0.001	9.10	34.9	30590	8.91
5	0.002	5.91	41.7	23390	11.9
6	0.002	7.59	33.2	23130	11.9
7	0.001	5.72	21.9	11880	11.9
8	0.001	7.95	20.3	14750	11.9

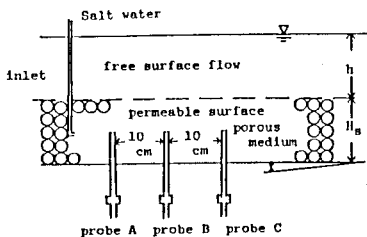


図-1

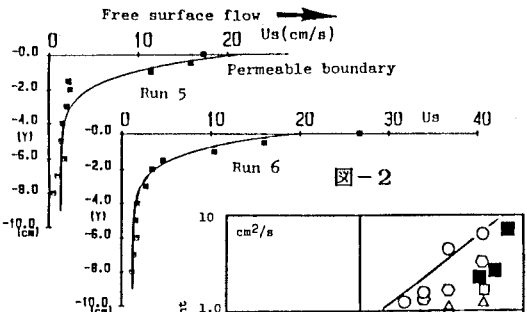
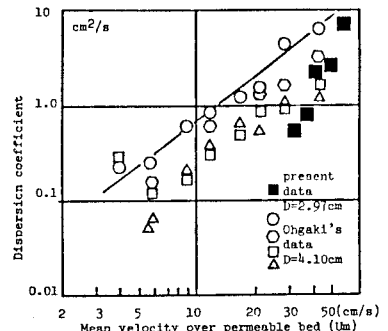


図-2

図-3



4. 浸透層内流れのMacroscopic Modelling

一定層厚の疎な構造を有する浸透層上に二次元等流の表面流が存在する場合を考える。このとき、透水性河床面を通じてのrandom transpiration（流体のランダムな吸い込み、吹き出し）により、表面流と浸透流との間に質量・運動量交換が生じ、透水性河床面近傍の浸透流に乱流場が形成され、付加的な流速成分が生じる。このような領域を取り扱う基礎式として、式(1)の境界層近似されたReynolds方程式より検討を進める。まず、局所流速を用いての議論は境界条件の複雑さから考えて困難であるため、平均化された見かけの流速(U)を用い、さらに移流慣性項・粘性項を式(2)のように簡略化する。一方、式(1)のReynolds 応力項をtranspirationによる運動量交換の結果として、生じるshear stress(τ_s)として同様に式(2)のように置き換える。このとき、基礎式(1)は式(3)の様になり、図-4に示すcontrol volumeに作用する力の釣合式と解釈される。ここで、浸透流流速成分を次の二つに分割して考える。即ち、表面流の存在に関わらず、動水勾配と浸透層の構造で決まる流速成分($Us1$)と表面流の存在によって誘起される付加的な流速成分($Us2$)（誘導流速と定義する）に分割する。さらに、乱流場を考慮して浸透流Reynolds数(Res)が十分大きく、式(3)の右辺第2項が無視でき、結局式(4)の方程式を得る。次にshear stress(τ_s)の評価に関しては、Boussinesqの渦動粘性モデルを用いることにする。ここに、乱れ長さスケールは浸透層の空隙空間スケールに拘束されることから透水係数(K)を取り、乱れ速度スケールは誘導流速($Us2$)自身に比例するものとして、式(6)のように仮定する。これと式(4)と合わせることにより、実験パラメタ(η)をあたえて流速分布が求められる。ところで、 $Us1$ は $Us2$ に比し、オーダー的に小さく式(4)の右辺第1項を無視しでき、このとき指数関数型の解析解を得る（式(7)）。図-2に示す実験値は、式(7)の流速分布（同図の実線）からほぼ良好に説明できる。さらにReynolds analogy を用いて実験から求められた鉛直方向物質拡散係数(Dy)と式(6)の対応を図-5に示す。実験値から求めた Dy には、ばらつきがあるものの、オーダー的な議論から見れば、式(6)との対応は良い。

5. あとがき 本研究は、表面流と浸透流との相互作用を検討する手始めとして、透水性境界面近傍の付加的な浸透流速を説明し得る運動量拡散係数を実験から評価し、簡便なモデルを用いて現象の把握を試みた。今後は実験パラメタ(η)の推定やsolid boundary上の表面流の抵抗特性や乱流構造との比較から、その違いを検討してゆきたいと考えている。実験・解析を進めるにあたり、香西稔君（当時京都大学大学院生、現飛島建設）の協力を得たことを記して謝意を表す。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{u'v'}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$0 = -g \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{c}{K} U^2, \quad \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{U}{K} U, \quad \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{u'v'}) = \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_s}{dy} \quad (2)$$

$$\frac{d\tau_s}{dy} = (1 + \frac{1}{cRes}) \frac{\rho c}{K} U^2 - \rho g l e, \quad (Res \equiv U\sqrt{K}/\nu) \quad (3)$$

$$0 = \frac{\rho c}{K} Us1^2 - \rho g l e, \quad \frac{d\tau_s}{dy} = \frac{\rho c}{K} (2Us1 \cdot Us2 + Us2^2) \quad (4)$$

Boundary condition;

$$\begin{cases} y=0 : Us2=Us1p-Us1 \\ y=-\infty : Us2=0 \end{cases} \quad (5) \quad \epsilon = \eta \sqrt{K} \cdot Us2 \quad (6)$$

$$Us2 = (Us1p - Us1) \exp(\frac{\sqrt{\Omega}}{2} y) \quad \Omega = 2c/\eta K \quad (7)$$

参考文献

大垣・長岡(1987): 疎で構成された水路床における物質輸送機構と生物学的自浄作用、第42回土木学会年講

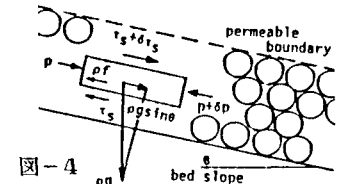


図-4

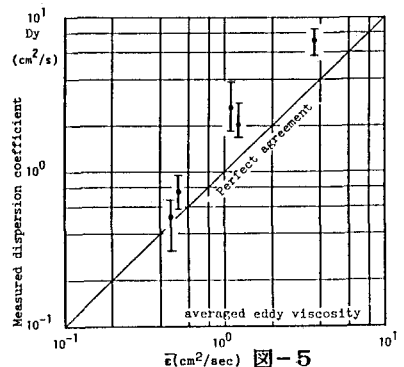


図-5