

## 表面流を伴う浸透層内の流れ構造に関する基礎的検討

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  
 京都大学工学部 正員 清水義彦      京都大学      学生員○香西 稔

**1. まえがき** 一般に実河川は浸透性の河床を有しており、このため河床面を通じての流出入や主流部と浸透層部との相互作用の影響を受けるものと考えられる。特に、浸透層内の構造が非常に疎であれば比較的ゆるい動水勾配のもとでも流速の非Darcy化が進み、表面流の存在によって浸透層内に強い乱流場が形成されるものと考えられる。本報告は、水理実験を行なうことにより、表面流を伴なう疎な浸透層内の流れの特性を明らかにしようとするものである。

**2. 解析方法** 浸透層内の流速分布を決定するモデルとしては、表面流が与える浸透性界面での圧力変動を考慮したもので、Chu ら<sup>1)</sup>、中川ら<sup>2)</sup>により研究されており、本報告ではこれを用いて考察を進める。浸透層内の流れの基礎式は、Navier-Stokes 式の抵抗項をWardの提案した非線型 Darcy則に置きかえることにより式(1) で示される。ここで浸透層内流速分布を非擾乱流速  $U_{s1}$  ( 表面流の存在の有無にかかわらず浸透層の場の条件により決定される流速成分 ) と表面流が存在することによって生ずる境界面圧力変動により誘起される擾乱流速成分 ( $u_s, v_s$ ) に分ける操作を行い、式(2) ~ 式(5) を得る。これと連続式 (式(6)) を用い、境界面圧力変動特性を式(7) のように設定 ( 但し、 $\kappa$  : 角波数,  $\omega$  : 角周波数,  $p_0$  : 変動圧力の振幅 ) し、式(8)、式(9) がえられる。これらを一波長平均することにより式(10)が得られる。ここで  $\bar{u}_s \bar{v}_s$  は境界面圧力変動によって誘起されるみかけのReynolds応力に対応するものと考えられ、これより浸透層内にも活発な運動量交換が生ずるものと推測される。その結果生ずる流速成分 ( 誘導流速 ) を  $U_{s2}$  とすれば、みかけのReynolds応力と速度勾配との間に混合距離理論を適用し、式(10)を用いて式(11)のように表わされる。但し、境界条件としては  $y=-H_s$  で  $U_{s2}=0$  とした。Reynolds数 ( $R_k=U_{s1}\sqrt{k}/\nu$ ) の十分大きな浸透層内の流速分布は圧力変動の無次元角周波数  $\omega_*$  ( $= \omega/\alpha_2$ ) 及び、無次元角周波数  $\kappa H_s$  のみの関数となり、これらをパラメタとして流速分布を描くと図-1を得る。

**3. 実験方法** 長さ8m、幅33cmの直線水路を用いて実験を行なった。浸透層には直径1.75cmのガラスビー玉を用い、立方最密充填構造に4層積み上げた。空隙率は上面、下面の効果を考慮して0.346とした。また、透水係数K及び非線型抵抗係数Cは透水試験により  $K = 6.97 \times 10^{-4}$  (cm<sup>2</sup>),  $C=0.290$  と得られた。表面流の流速測定にはプロペラ流速計を用い、境界面近傍から水面付近まで計測した。浸透流の流速測定には、図-2に示すように塩分濃度計を用い、塩分濃度の出力時間差からトラベルタイムを求め、間接的に測定した。

**4. 実験結果及び考察** 実験条件を表-1に示す。図-3に実験の流速分布の実測値 (○印) を示す。これより表面流の流速分布と浸透流の流速分布は、なめらかな速度勾配を

もって接続することが理解される。本実験では浸透層境界面での圧力変動を測定していないため、式(11)を用いてただちに流速分布を求めることはできない。そこで実験に適合するように $\omega$ ,  $\kappa$ を推定し、式(11)からみかけの流速を求めたものが図-4の実線である。また実験値を説明するための $\omega$ ,  $\kappa$ を表-2に示す。これらの図より、浸透層内の流速はほぼ指數型分布形となり、式(11)の理論分布との対応は良好である。また、表面流の存在により、非擾乱流速に比べ非常に大きい Couette 的な誘導流速成分が生じ、特に境界面近傍には強いせん断層の存在が認められる。これは、浸透層内部といえども活発な運動量輸送の行われている可能性を示唆している。図-4(a), (b)は、誘導流速値が浸透層深部まで0とはならず、表面流からの運動量の取り込みがかなり深部まであると推測される。表面流水深が大きくなると、Slip速度（便宜的に $y=0$ の流速値として定義する）も大きくなり、ますます誘導流速値は大きくなる。さらに表面流水深を上げたものが図-4(c), (d)である。Slip速度は大きくなるものの誘導流速の減衰性は大きくなり、表面流の影響はほぼ $y=0.35H_s$ までしか及ばない。これらの実験分布は図-1(b), (c)のタイプに属している。これは、水深、表面流速を変化させることにより、表面流が与える境界面圧力変動特性が変わり（表-2）、変動圧力の浸透層内部への伝播特性が変化することに起因する。しかしながら、表面流の水理条件と境界面圧力変動特性（ $\omega$ ,  $\kappa$ ）との関係は明らかでなく、今後、系統的な実験を進めて考察しなければならない課題である。

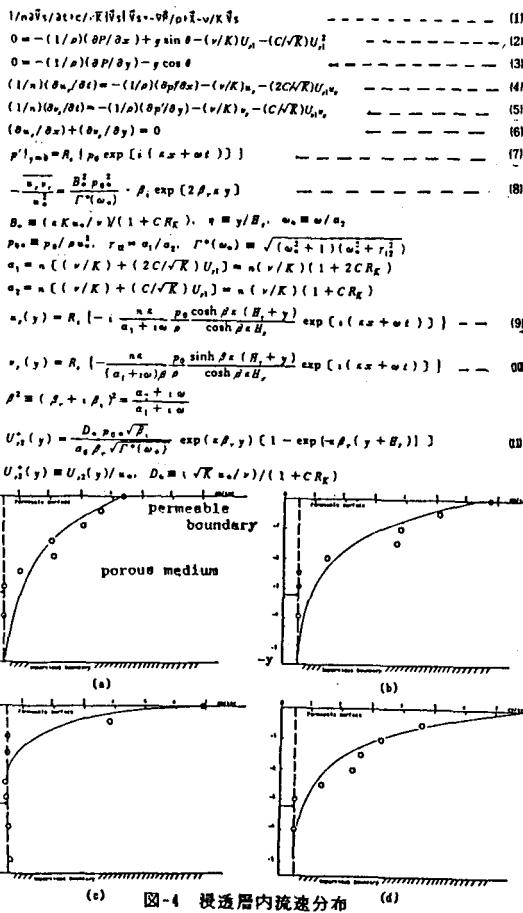


図-4 浸透層内流速分布

表-1 実験条件表

CASE	I	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$U_{s1}(\text{cm}/\text{s})$	$R_k$
a	1/100	2557	0.415	0.825
b	1/100	3344	0.419	0.846
c	1/100	6185	0.427	0.888
d	1/100	10005	0.431	0.909

表-2 境界面圧力変動特性

CASE	$\omega(\text{Hz})$	$\kappa(1/\text{cm})$
a	23	0.6
b	19	0.8
c	25	2.0
d	28	1.0

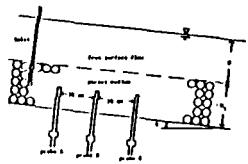
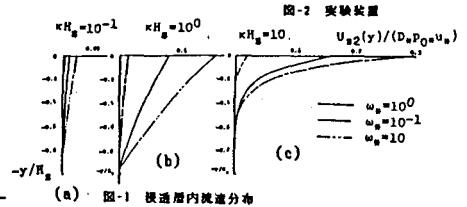


図-2 実験装置



(a) 図-1 浸透層内流速分布

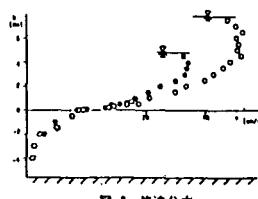


図-3 流速分布

#### 参考文献

- 1) Chu et.al :MIT Report , 1972
- 2) 中川、福津：土木学会論文報告集、第244号，1975