

II-167 表面流を伴う浸透層内の流れと砂粒の初期移動機構に及ぼす影響について

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
 金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎
 京都大学工学部 正員 村上 正吾

1. まえがき 透水性の高い浸透層を有する移動床流路においては、表面流と浸透流の間に著しい相互作用が存在する。特に相互作用の1つである透水性境界面を通じての流出入は表面流と浸透流との運動量交換を担い、浸透層内に強い乱流場を生起させ、表面流の流れ構造を変化させる。また条件によっては移動床現象へのこれらの影響は無視し得ないものと推測され、これらの合理的な評価を行うことが必要と考えられる。本研究では、始めに表面流を伴う浸透層内の流れを検討する。次にこの様な場での移動床現象を明らかにすることを目的として、砂粒の初期移動機構に与える流出入流速の影響を検討する。

2. 表面流を伴う浸透層内の流れ特性 浸透層として直径1.75cmのガラス玉を4層積み上げたものを水路幅30cmの直線水路内に敷きつめて実験を行った。ガラス玉の配列は立方最密充填構造で、空隙率 n は0.346である。また、透水試験の結果をWard¹⁾が提案した非線形ダルシー則式(1)の形で整理すると、透水係数 K 及び非線形常数 C が決定される(図-1)。表面流の流速測定はプロベラ流速計を用い、浸透流の流速測定は図-2に示すように3本の塩分濃度計を用いて塩分トレーサのピーク濃度の出力時間差から算定した。図-3は得られた流速分布を示したもので、これより表面流と浸透流の流速分布はなめらかに接続することが理解される。浸透層内の流速分布を決定するモデル^{2), 3)}は、次の物理的なイメージに基づいて検討されている。すなわち、表面流の存在は透水性境界面に圧力変動を生み、これが浸透層内部へ伝播することによって流速変動を誘導する。その結果抵抗の非線形性から流速変動の間に相関が生れ、みかけのReynolds応力が誘起される。このため、表面流との間に運動量交換が起り、表面流にひきずられた浸透流速分布が出現する。式(2)は上記の考えのもとに導かれたもので、浸透層の場の構造と動水圧 ω 及び圧力変動特性の関数として表現される。本実験では圧力変動特性(角周波数 ω 、角波数 κ)を測定より得ていないため、式(2)を用いてただちに算定できないが、実験値に適合するように ω 、 κ を推定してみかけの流速値を求めると図-4の実線及び破線を得る。これより実験値と式(2)の対応は良好であり、流速分布はCouette的な様相を示し、透水性境界面付近に強いせん断層の存在が認められる。このことは、透水性境界面を通じて活発な運動量交換の行われている可能性を示唆しており、これを流出入流速によるものとしてとらえると、透水性河床上の移動床現象にも大きく貢献するものと推測される。

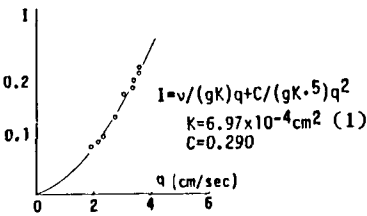


図-1

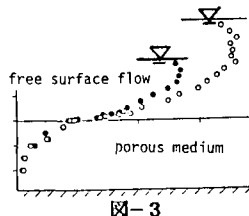


図-3

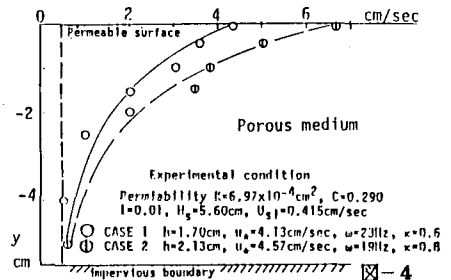


図-4

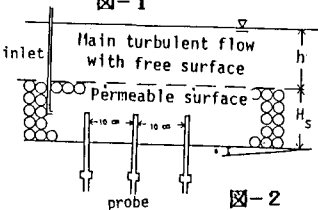


図-2

$$u(y) = \frac{n\kappa}{\sqrt{K} \kappa \beta_r \int (\alpha_1^2 + \omega) (\alpha_1^2 + \omega)} \left(\frac{D_0}{\rho}\right) \int \beta_1 \exp(\kappa \beta_r y) \quad (2)$$

$$\alpha_1 = n(\nu/K)(1 + 2CR_K)$$

$$\alpha_2 = n(\nu/K)(1 + CR_K)$$

$$(\beta_r + i\beta_i)^2 = \frac{\alpha_2 + i\omega}{\alpha_1 + i\omega}$$

$$R_K \equiv (-1 + \sqrt{1 + 4CR_K}) / (2C)$$

$$R_{K0} \equiv g l_c K^{3/2} \nu^{-2}$$

3. 流出入流速の初期移動機構に与える影響

ここでは、流出入流速 v_0 が砂粒の初期移動機構に及ぼす影響の検討として、局所的な流体力に鋭敏なpick-up rateの評価を試みる。図-5に示すように区間長30cmの移動床部を設け、上・下流側に移動床部の使用砂（粒径 $d=0.164$ cm,比重 $\sigma/\rho=2.5$ ）と同一の砂で粗度付けした固定床を接続した。移動床部の下には流出入流速を調節するためのバルブを設け、この区間での流出入流速が一樣となるように工夫した。先のガラス玉層内の浸透流においてもオーダー的に $v_0=10^{-1}$ cm/sec程度の流出入流速が、浸透流のモデリング³⁾から算定されるため、この程度の流出入流速 v_0 を与えた移動床区間を真上よりビデオ撮影して、画面より単位時間単位面積当りの砂粒の飛び出し個数を測定した。さて、流出入流速 v_0 による抗力を考慮したpick-up rateは式(3)で表現される⁴⁾。ここに、 ϕ_0 は砂粒にかかる流体力の比、 ϕ_1 は v_0 による流体力の効果を表し、 Ω は不透水性河床と透水性河床の抵抗係数 f_n, f を示す指標（ $\Omega^2=f/f_n$ ）である。 Ω は粗面における対数二乗則から誘導される式(4)に v_0 を与えることにより評価され、図-6の実線に示すように流出入が吸い込みか吹き出しかによって透水性河床と不透水性河床の抵抗係数の大小関係が変わることを示している。他方、横流入のある場合と同様の取り扱いにより導いた水面方程式に基づいてエネルギー勾配 I_e を求め、移動床区間の平均水深 h_0 を用いて摩擦速度 $u_*=(\sqrt{gh_0 I_e})$ から Ω を算定したものを同図に示した。概ね良好な一致を示し、摩擦速度 u_* の評価法が妥当なものであるといえる。図-7は実験で得られた無次元pick-up rate ps_* と、その実験条件に対する式(3)の理論値との対応を示したものである。また、こうした直接測定に対して図-8は井戸⁵⁾による透水性河床上での実測の流砂量と、Stochastic modelより得られる流砂量式 $q_{B*}=A_3/A_2 \cdot ps_* \cdot \lambda$ （ λ :無次元平均step length）とを用いて間接的に得られる ps_* と、その水理条件に対する式(3)の理論値との対応を示したものである。流砂量式の適用に際しては、不透水性河床での流砂量が実験値と計算値でほぼ一致するように無次元平均step lengthを150とした。図-7及び図-8の結果より流出入流速がある場合のpick-up rateの推定式として、式(3)が妥当なものであると考えられる。

本研究の実験を進めるに当たって、京都大学大学院生香西稔君と学部生石橋勝彦君の協力を得たことを記して謝意を表します。参考文献 1)Ward:Proc. ASCE, vol. 90 HY5, 1964 4)中川・辻本・村上:第30回水理講演会論文集, 1988
2)Chu and Gelhar:MIT Report No. 148, 1972 5)井戸清雄:京都大学卒業論文, 1978
3)辻本・中川:第29回水理講演会論文集, 1985

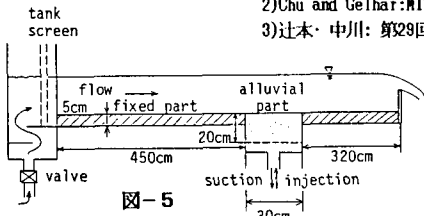


図-5

表-1 実験条件

Run	s_*	h (cm)	U (cm/s)	Fr	Re	v_0 (cm/s)	i_w	I_e	u_* (cm/s)	v_0^*
1	1/500	7.79	36.2	0.414	28200	0	1.00×10^{-3}	1.171×10^{-3}	2.990	0
2	1/500	6.05	41.1	0.502	28153	-0.250	-2.33×10^{-3}	1.827×10^{-3}	3.502	-0.0714
3	1/500	6.75	41.8	0.514	28215	-0.497	-5.33×10^{-3}	2.899×10^{-3}	4.372	-0.1137
4	1/500	7.53	37.4	0.435	20162	0.384	5.50×10^{-3}	9.520×10^{-4}	2.651	0.1449
5	1/500	7.28	38.7	0.450	20173	0.552	8.25×10^{-3}	9.550×10^{-4}	2.605	0.2199
6	1/300	5.22	38.3	0.535	19993	0	1.50×10^{-3}	2.025×10^{-3}	3.218	0
7	1/300	5.01	39.9	0.569	19990	-0.337	-6.50×10^{-3}	2.802×10^{-3}	3.701	-0.0930
8	1/300	5.11	39.1	0.553	19980	-0.346	-5.33×10^{-3}	2.731×10^{-3}	3.698	-0.0936
9	1/300	5.35	37.3	0.515	19956	0.384	8.33×10^{-3}	1.546×10^{-3}	2.847	0.1349
10	1/300	5.53	36.1	0.490	19963	0.552	1.05×10^{-2}	1.436×10^{-3}	2.789	0.1978

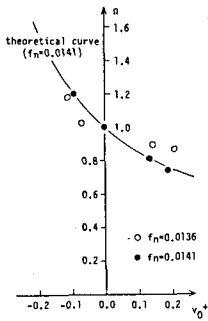


図-6

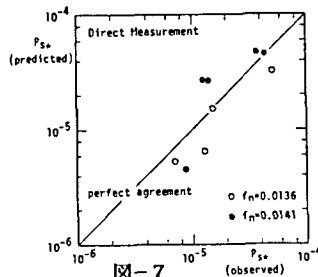


図-7

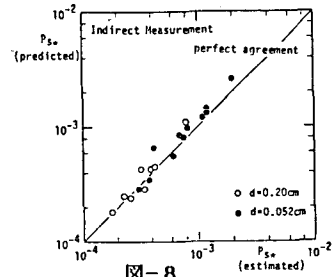


図-8

$$ps_* = (F_0/\Psi) \cdot [1 - (k_2 \Psi \tau_{oc}/\tau_*)]^n \quad (3)$$

$$\Psi = (1 + k_L \mu_f) / [\phi_0^2 \{1 + (k_L + \phi_1) \mu_f\}]$$

$$\phi_0 = (U_*^2/U_{*c}^2) \sqrt{d}$$

$$\phi_1 = (e_0 C_B^2 / e_0 C_D) \cdot |v_0^*| v_0^* / U_*^2$$

$$\sqrt{\frac{2}{f_n}} \left[\frac{1}{4} - \sqrt{d + \lambda_1 \lambda_2} - \frac{\lambda_1}{2k_0} \ln d \right] = \frac{\lambda_1}{4} \left[\frac{2}{f_n} + \frac{1}{k_0} \{(\ln d)^2 + 1\} + \frac{\ln d}{k_0} \sqrt{d + \lambda_1 \lambda_2} + \lambda_2 \right] \quad (4)$$