

微細砂の浮遊限界と流砂量に関する研究

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

徳島大学工学部 正員 岡部 健士

京都大学大学院 学生員 藤田 正治

1. まえがき 流水中の微細砂の挙動を明確にすることは、流砂量やそれに関連する諸現象を評価するうえで重要である。本研究はこれらに対する基礎的な知見を得ることを目的とし、これまで比較的資料の少ない微細砂の浮遊限界と浮遊砂底面濃度式に関して、実験的、理論的検討を行ったものである。ここで、対象としている微細砂は、掃流限界と浮遊限界 $U_{fs} = u_s$ (u_s : 粒子沈降速度) が計算上等しくなる粒径 d_c ($\approx 100\mu$) の前後の粒子である。

2. 浮遊限界に関する実験的検討 幅30cm, 長さ8mの木路に微細砂を一様に敷き、流量を段階的に増加させて、粒子の挙動を観察するとともに、掃流砂・浮遊砂を図1に示すSamplerで採集した。掃流砂は河床波として流送される粒子が採集されたものである。実験条件は表1に示すとおりで、粒子の粒径は $44\mu \sim 420\mu$ を6つの階級に分類されている。また砂粒レイノルズ数 Re の値より、Exp. F以外の河床条件は滑面である。実験で得られた掃流砂量(q_b)と浮遊砂量(q_s)より、 $q_s/(q_b+q_s)$ が0および4%のときの摩擦速度を、 U_{asm} , U_{ast} とし、また掃流限界(U_{sc})を粒子が時々こころがる状態と河床波が形成される状態の中間的な状態とする。図2はそれらの結果をまとめたものである。従来、浮遊砂がある程度発生し始める限界は、 $U_{fs} = u_s$ とされているが、ここでは U_{ast} がこの U_{fs} に相当する。図2の結果より、 $U_{ast} \approx u_s$ の条件は、 $d > d_c$ の粒子に対して妥当であるが、本実験のような滑面の場合には $d < d_c$ では適当でなく、 $d < d_c$ で $U_{fs} \approx u_s$ より推算されるこころの静止→浮遊という遷移は生じず、静止→掃流→浮遊のように遷移することがわかる。また、 U_{asm} , U_{sc} , u_s との間には、 $d > d_c$ で $U_{sc} < U_{asm} < u_s$, $d < d_c$ で $U_{asm} > U_{sc} > u_s$ という関係があることがわかる。

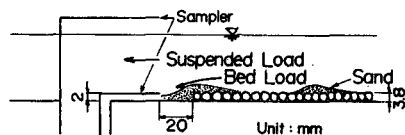
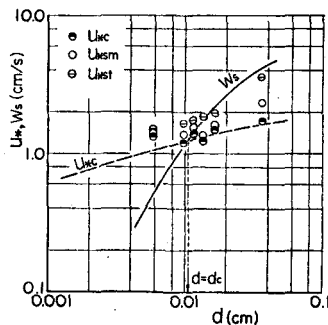


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Exp.	d (μ)	u_s (cm/s)	slope (1/3)	u_s (cm/s)	Fr	Re	R_{*b}	v (cm ³ /s)
A	44-74	0.504	1/685	0.20	0.45	2700	0.63	0.014
			1/695	-2.65	-2.13	-35000	-1.26	
B	88-105	1.018	1/695	0.25	0.48	3300	1.05	0.013
				-2.90	-2.29	-35700	-2.21	
C	105-125	1.422	1/685	0.32	0.45	4300	1.43	0.013
			1/436	-2.61	-2.50	-35000	-2.08	
D	125-149	1.680	1/436	0.30	0.62	2650	1.33	0.014
				-2.68	-2.57	-35700	-3.52	
E	149-177	2.155	1/436	0.26	0.60	3300	1.97	0.013
				-2.02	-2.69	-40400	-4.38	
F	297-420	4.200	1/185	0.22	0.67	2900	6.23	0.015
				-2.40	-3.49	-32000	-12.6	

図-2 U_{sc} , U_{asm} , U_{ast}
(図中の曲線は実験値の内插曲線)

3. 浮遊限界に関する理論的検討 2で述べたように、 $U_{ast} = u_s$ の条件では浮遊限界を統一的に説明できない。したがって、 U_{ast} あるいは U_{asm} に関する再検討が必要であって、ここでは浮遊限界 U_{asm} を対象として検討しよう。さて、上の考察より、粒子は掃流状態になれば浮遊しないことが明らかである。そこで、掃流→浮遊の遷移機構について、圧力変動に起因する揚力により、粒子は掃流運動の離脱高さ $h = 4\phi$ まで離脱し、その位置での鉛直方向の最大変

Kazuo ASHIDA, Takeshi OKABE, Masaharu FUJITA

動速度 U_{max} と u_s の関係が, $U_{max} < u_s$ のとき再着床, $U_{max} > u_s$ のとき浮遊するものとする。すなわち, 浮遊条件式を次式で与える。

$$U_{max} = u_s \quad \dots\dots (1)$$

粒子の離脱高さ y_0 は, 本実験のような滑面では buffer 層以下において, 離脱速度 V_0 のみによって規定されるものとし, また, 揚力 F_L は粘性底層外の変動速度 v と関連づけて, (3) 式のように表わされると仮定する。(2)~(4) 式および $\Delta t = d/u_s$ の関係を用いて V_0 を求め, その結果と粒子の運動方程式より, y_0 は(5) 式のように求められる。

$$(F_L - G) \cdot \Delta t = \rho_s \frac{\pi}{6} d^3 V_0 \quad (F_L: \text{揚力}, G: \text{水中重量}) \quad \dots\dots (2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 \frac{\pi}{4} d^2 \quad \dots\dots (3) \quad G = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \quad \dots\dots (4)$$

$$y_0 = \frac{S_1 S_2 g d^4}{18^2 v^2} \left[18 \frac{\mu K v}{\rho d} \frac{u_s - u_{sc}}{u_s} - \ln \left\{ 18 \frac{\mu K v}{\rho d} \frac{u_s - u_{sc}}{u_s} + 1 \right\} \right] + d \quad \dots\dots (5)$$

ここで, $\tau = v/u_s$, $S_1 = \rho_s/\rho + \frac{1}{2}$, $S_2 = \rho_s/\rho - 1$, $K_v = \frac{3}{4} C_L \frac{\rho}{\rho_s} \tau^2$, ρ_s : 粒子密度, μ : 粘性係数, ρ : 流体密度, C_L , τ : 係数である。つぎに, $y = y_0$ における U_{max} は, 従来の研究成果を参考にいて,

$$U_{max} = 3v' \quad \dots\dots (6) \quad \frac{v'}{u_s} = \begin{cases} 1 & y_0^+ > 50 \\ -\frac{1}{2500} (y_0^+ - 50)^2 + 1 & y_0^+ \leq 50 \end{cases} \quad \dots\dots (7)$$

のように近似する。ここに, $y_0^+ = \frac{u_s y_0}{\nu}$, ν は鉛直方向の乱れ強度である。以上より, 無次元限界掃流力 u_{sc} , u_s および K_v が与えられれば, (1)(5)(6)(7) 式より U_{scsm} が算定される。図-3 は, 計算値と実験値を比較したものであって, 図示のように $K_v = 40$ のとき両者はよく一致する。 K_v は底面付近の圧力変動に起因する係数であって, 壁面での圧力変動に関する研究より K_v の値を評価すると 25~50 程度になる。

4. 浮遊砂底面濃度 上述の y_0 を基準面の位置とし, また v の確率分布として, その上・下限界が $\pm U_{max}$ の正規分布で近似できるものとする。ついで, 道土³⁾と同様の解析を行うと, 底面濃度に関する次式を得る。

$$C_b = \frac{2}{3} K (A/\xi_0 - B) \quad \dots\dots (8) \quad \text{ここに, } A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (e^{-\frac{\xi_1^2}{2}} - e^{-\frac{\xi_2^2}{2}}), \\ B = \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi, \quad \xi_1 = v/v', \quad \xi_0 = u_s/v', \quad \xi_2 = 3, \quad K \text{ は係数である。}$$

$d = 59, 163 \mu$ の場合について, $K = 0.01$ として (8) 式と実験値 (浮遊砂量から計算) とを比較したのが図-4 である。かなり大きさの異なる粒子に対して両者の適合性はよく, この理論の妥当性が示唆される。

5. あとがき 以上のように, 本研究の理論は実験値を十分説明しうるものと思われるが, 浮遊機構についての詳細な検討や粗面上の微細砂の浮遊限界についても検討する必要がある。

<参考文献> 1), 2) 福津; 開水路流の乱流構造に関する基礎的研究, 京大学位論文, S. 52

3) 道土; 流砂と河床変動に関する基礎的研究, 京大学位論文, S. 47

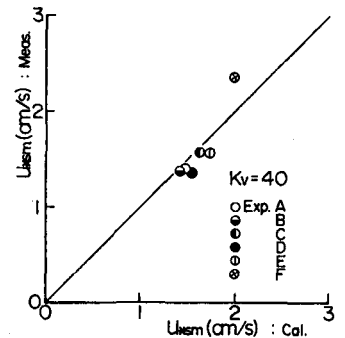


図-3 U_{scsm} の実験値と理論値の比較

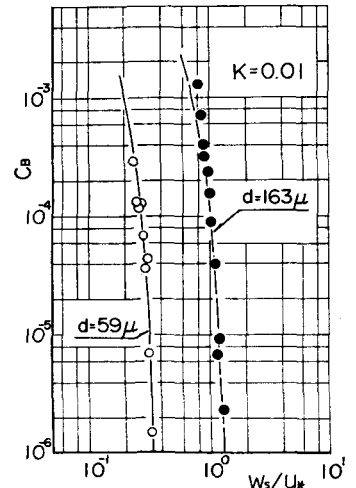


図-4 C_b の実験値と理論値の比較