

河床波上の流れ・流砂特性が河床波の形状決定に与える効果

京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 辻本 祐郎
 京都大学大学院 学生員 ○水橋 雄太郎

1. まえがき 河床波の存在する移動床の諸現象は個々の河床波をモデル作成の最小単位としてその挙動を調べるのが有効であるが、一定流量のもとで個々の河床波が形を変えずに進行する仕組や、流量変化に対応して波形勾配を変化させる（流量減少時の崩壊や、流量増加によるフラッシュも含めて）仕組を検討するなど、河床波の形の形成を論じる上で、河床波一波長上での流れ、流砂の機構を明らかにすることが必要と考えられる。そこで本研究では波長40cm、波高2cmの三角形河床波模型を用いて河床波に沿う流速分布、流砂特性の変化を実験的に調べるとともに若干の理論的検討を行った。

2. 実験 実験は長さ9m、幅30cmの勾配可変水路に既述の模型河床波15波を並べ、その中央の一波長について流速分布（流速変動も含めて）、砂粒の $\rho_{\text{ps}} = 40 \text{ ps}$ 、局所流砂量 ρ_b の場所的变化を調べた。 ρ_b は河床波上流砂面に設けられた長さ4cm、幅20cmの移動床部からの砂粒の離脱体積より、 ρ_b は幅20cmの移動床部をトラフ部から逐次長くして移動床下流端の採砂箱1の堆砂量より求めた。なお、流砂特性についての実験は中央粒径 $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$ の砂を用いて行い、各河床波の表面は同じ砂で粗面に仕上げられている。実験条件は表-1に示される。RUN G~I は流れ、M, N は流砂について

表-1 実験条件

RUN	I	U(cm/s)	h(cm)
G-1 M-1	1/500	22.2	4.7
G-2 M-2		26.8	7.8
G-3 M-3		41.1	11.6
G-4 M-4		43.9	13.3
H-1 N-1	1/300	26.3	4.4
H-2 N-2		36.2	6.3
H-3 N-3		42.7	8.4
H-4 N-4		48.5	12.2
I-1	1/150	49.6	8.6

の実験である。以下実験結果の一例を示す。まず、図-1は河床波上での流砂挙動に密接に関係すると思われる底面近傍の流速及びその変動特性を示したもので、 α_{max} ：流速変動係数の最大値、 $U[\alpha_{\text{max}}]$ ：その位置での平均流速、 U_b ：底面（底から3mm）流速、 α_b ：その変動係数、 $\sigma = \alpha_b U_b$ である。 L_s は再付着点の位置（底面1の染料注入で調べた）で、この付近で流速変動が相当小さくなっていること、その影響が $x \geq 2L_s$ 程度以上に亘っていることがわかる。また図-2, 3は、流速分布を両対数表して変曲点より推定した境界層厚 δ と境界層外縁流速

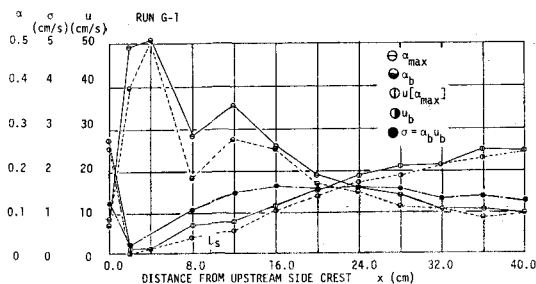


図-1 底面近傍の流速とその変動特性

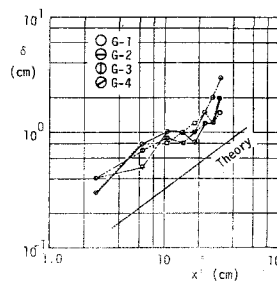
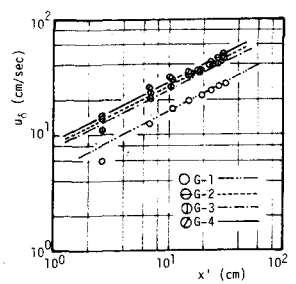
図-2 境界層厚 δ 

図-3 境界層外縁流速

U_b の流下方向の変化(图中的プロット)であり、これが河床面上側斜面での底面せん断応力分布を支配していると考えられる。なお、このようにして推定された境界層内の流速分布は $1/6 \sim 1/8$ 乗則に従っているとみなされた。一方、流砂特性についての実験結果は図-4,5に示される。河床面上では流砂は非平衡状態にあり、*pick-up rate* と流砂量の関係は平衡状態のように平均 *step-length* では結びつかないし、また *step-length* がクレストまで延びるとした仮定も適切でないことがわかった。

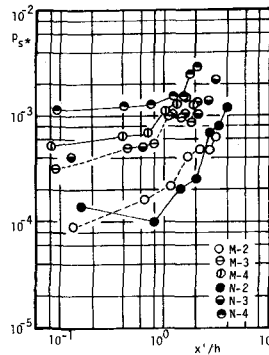


図-4 *pick-up rate*

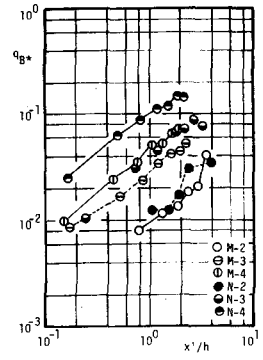


図-5 局所流砂量

なお図2~5における x' は再付着点からの流下方向距離で $x'=x-L_s$ である(L_s は坂高の4~5倍)。

3. 河床面上の流れに関する考察

河床面上の流砂特性は再付着点からの副次的な境界層の発達と密接に結びついていると考え、*von Kármán*型の運動量積分式に基づいた解析を行った。境界層内流速分布が $U/U_b = (y/\delta)^{1/n}$ と表わされること、また境界層において *strickler* 型抵抗則 $U_b/U_* = A(\delta/\delta_s)^{1/m}$ ($A=9.1, \delta_s=d$) が成立するとすれば、 $m=n$ のとき運動量積分式は次式のように書き直せる。

$$\frac{d\delta}{dx} + \left\{ \frac{3n+2}{n} \right\} \left(\frac{\delta}{U_b} \right) \left(\frac{dU_b}{dx} \right) = \left\{ \frac{n+1}{n} \right\} \left(\frac{\delta}{\delta_s} \right)^{-1/2n} \quad (1)$$

図-3を参考に $U_b = Cx^S$ --- (2) とすると式(1)

から $\delta(x) = \left[\frac{(n+1)(n+2)^2}{A^2} \left\{ \frac{n+2}{(3n+2)S+A^2} \right\}^{-1/(n+2)} \delta_s^{2/(n+2)} x^{n/(n+2)} \right]^{1/2} \delta_s^{1/(n+2)} x^{n/(n+2)}$ --- (3) が得られ、結局、

$\tau_0(x)/P = (2/A^2) \left[\frac{(n+2)(3n+2)+n^2}{(n+1)(n+2)^2} A^2 (\delta_s/2) \right]^{1/(n+2)} C^2 x^{2S} \dots$ (4) が得られる。

ここで τ_0 : 底面せん断応力、 P : 水の密度であり、式(1)~(4)では x' の代りに x と書いている。クレスト上では流速分布が一様化しているからクレストの位置では断面平均流速を U_b とする。一方、図-3より $S=1/2$ であり、このとき C の値が決定できる。また $n=6$ として計算を行った。その結果を図-2,3及び図-6に示す。図-6中では無次元表示($\tau_0 \equiv \tau_0/(P-P_0)$)がされている。

4. 河床面上の流砂特性

河床面上の流砂は非平衡状態にあるので、次のように、砂粒の *pick-up rate*, *step-length* を用いてモデル化した。

いま、簡単のため Δx の区間に分け離散的に考え前章のモデルで推定された底面せん断応力分布を与える。*pick-up rate*, *step-length* の分布がいずれも τ_0 の関数として与えられ、局所的な *step-length* の効果が隣りの区間までと限定すると Euler 的な *stochastic model* で流砂特性ならびに河床流の变形が計算される。計算の詳細な方法は講演時に説明する。図-6には計算結果の一部(無次元掃流力, *pick-up rate* Ru' g/ft)を示した。

今後モデルの改良(強い速度変動の効果、河床流形の变形解析の検討)を行ってゆく予定がある。

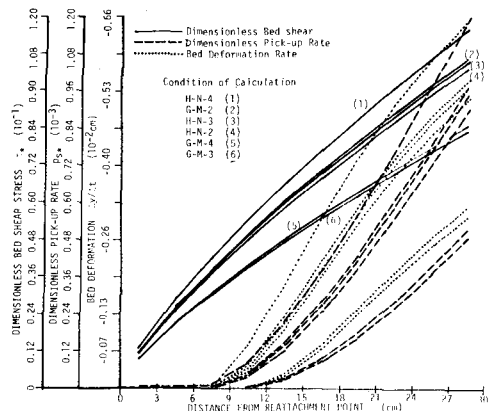


図-6 τ_0, P_s 及び河床変化率の計算結果