

河床波前縁部での流砂の挙動に関する検討

舞鶴工業高等専門学校 正員○三輪 浩
立命館大学 理工学部 正員 大同淳之

1. まえがき 砂堆などの河床波形成河道における流砂運動は、クレスト前面に形成される剥離渦の存在によって、平坦床とは異なった状況を呈する。従来はクレスト背面を流下してきた粒子は全てクレストの前面に堆積するとの前提にたって議論される場合が多く、河床波の移動速度等の算定にも適用されてきた。しかし、この仮定は河床が混合砂からなる場合やクレスト下流部での粒子の移動形態が異なるとき、また、河床形態の遷移過程では必ずしも成り立つとは限らないと考えられる。本研究ではこの点に着目し、河床波前縁部での流砂の挙動を評価するため、クレスト前面での粒子の堆積率について検討する。そしてこの堆積率を河床波の移動速度の算定に適用し、その適合性について考察する。

表-1 河床波模型の形状

No.	wave length L (cm)	wave height Δ (cm)	surface
1	40	1	rough
2	40	3	

2. 実験の概要 実験には、長さ6.5m、幅20cmの亚克力製可変勾配水路を用いた。まず、河床に表-1に示すような寸法をもつ前面の傾きが45°の三角形の河床波模型を敷き詰め、固定床とした。実験はほぼ均一な3種類の砂(A砂:dm=0.023cm、B砂:0.042cm、C砂:0.059cm)を用いて、それを模型の背面に敷き、各流量に対するクレスト前面での粒子の堆積量を測定することにより、堆積率Pd(堆積量/クレスト頂部の通過量)を算定した。つぎに、均一砂と混合砂の2種類の砂に対して河床波の移動速度に着目した移動床実験を行った。なお、混合砂に対しては最大粒径が移動するように条件を設定し、流砂量は水路下流端で測定した。

3. クレスト前面での粒子の堆積率 河床波前縁部での粒子の挙動は、粒子の特性とそこでの局所的な掃流力、そして剥離渦を形成する河床条件によって規定されると考えられる。粒子の特性として沈降速度を用い、局所的な掃流力は河床波の形状抵抗の影響を考慮したクレスト頂部の摩擦速度によって評価することにする。

クレスト頂部の摩擦速度は、河床波形状に見合った曲率半径による遠心力の影響を考慮した式(1)の流速分布式が、測定された流速分布と適合するような値として求めた。

$$\tilde{u} = \exp(\tilde{r} \cdot (1-\tilde{y})^2) \left[1 - 2\tilde{u}_* \int_0^{1-\tilde{y}} \frac{d\tilde{z}}{(1-\tilde{z}) \cdot \exp(\tilde{r} \cdot \tilde{z}^2)} - 2\tilde{u}_*^2 \int_0^{1-\tilde{y}} \frac{\ln(1-\tilde{z})}{(1-\tilde{z}) \cdot \exp(\tilde{r} \cdot \tilde{z}^2)} d\tilde{z} \right] \quad (1)$$

$$\tilde{u} = \left(\frac{u}{u_s} \right)^2, \quad \tilde{u}_* = \frac{\hat{u}_*}{\kappa \cdot u_s}, \quad \tilde{r} = \frac{h}{r_c}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{h}, \quad \tilde{z} = 1 - \tilde{y}$$

ここに、 u_s は表面流速、 $\hat{u}_*$ はクレスト頂部の摩擦速度、 κ はカルマン定数、 r_c は前縁部の局率半径である。

図-1はこのようにして計算された流速分布である。底面付近での流速の増加が表現され、実測値の傾向とも比較的良く一致している。このことから、本手法によって得た摩擦速度は有効であると考えられる。

さて、先の定義によって求めたクレスト前面での粒子の堆積率をクレスト頂部の摩擦速度と粒子の沈降速度との比 $\hat{u}_*/w_0$ で整理した結果を図-2に示す。このように整理すると、河床波形状の違いは $\hat{u}_*$ に陰に含まれるため、堆積率は $\hat{u}_*/w_0$ のみの関数として表すことができる。

堆積率は図-2より実験結果を示す指数式を用いて次式のように表す。

$$P_d = \sum_{i=1}^n f_{oi}(d_i) P_{d1} = \sum_{i=1}^n f_{oi}(d_i) \left[\frac{k}{\hat{u}_*/w_{oi}} \right]^{3/2} \quad (2)$$

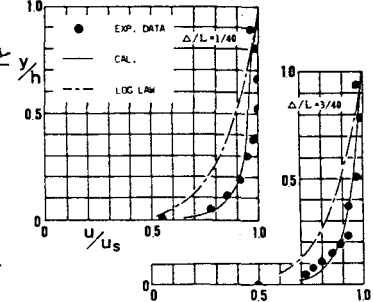


図-1 クレスト頂部の流速分布

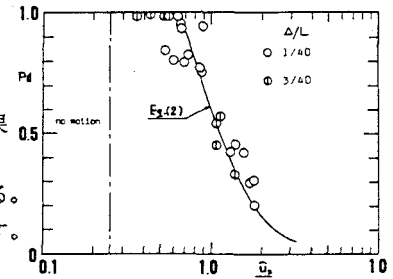


図-2 クレスト前面での堆積率

ここに、 f_0 は粒径 d_i の粒子が河床に占める割合、 k は粒子が活発に運動する条件($\tau_* = 0.1$)から本実験での最小粒径砂(0.023cm)に対して求められた値で0.65とし、 $\hat{u}_*/w_0$ がこれ以下の値を取る場合は $Pd=1$ と考える。

さて、移動床では流速分布を測定することが困難なため、 $\hat{u}_*$ を計算することは容易でない。そこで、Engelund¹⁾による抵抗分割の方法によって河床波形状から形状抵抗を求め、それを全抵抗から除外して求めた摩擦抵抗 u_*' と式(1)から求めた $\hat{u}_*$ との関係を図-3に示した。多少のばらつきはあるものの、両者はほぼ次式の関係を満たしているといえる。移動床実験での堆積率の計算にはこの関係を用いることにする。

$$\hat{u}_* = 1.2 u_*' \quad (3)$$

4. 河床波の移動速度への適用 河床波の移動はクレストの頂部を通過した粒子が同じクレストの前面に堆積することによって行われる。すなわち、クレストの前面に堆積しない粒子は河床波の移動には寄与しないと考えると、粒子の堆積率 Pd を用いて移動速度は次式で与えられる。

$$V_B = \frac{P_d \cdot q_{BC}}{(1 - \lambda) \cdot \Delta} \quad (4)$$

ここに、 λ は空隙率、 Δ は波高、 q_{BC} はクレスト頂部を通過する流砂量で、平均流砂量を q_B として $q_{BC} = \alpha \cdot q_B$ とする。式(4)で移動速度を求めるには平均流砂量を知る必要がある。図-4は平均流砂量を平均摩擦速度と平均粒径粒子の沈降速度の比 u_*/w_0 で整理したものである。同図は混合砂に対しても平均粒径に関して整理されているが、粒径別に評価することが現時点では困難であり、またモデルの仮定から総量としての評価ができれば現象をある程度は説明できると考えた。そこで、流砂量は次式の Brown 型の流砂量式で表すことにする。

$$q_B = \frac{q_B}{u_* \cdot d_m} = 5 \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^5 \quad (5)$$

図中には他の研究者による実験結果^{2) 3)}も示されており、式(5)がほぼ妥当な値を与えることがわかる。

さて、これまでの議論から河床波の移動速度は次式で表される。

$$\frac{V_B}{u_*} = \frac{5\alpha}{1-\lambda} \left[\sum_{i=1}^n f_0(d_i) \left(\frac{k}{\hat{u}_*/w_{0i}} \right)^{3/2} \right] \left(\frac{u_*}{w_{0i}} \right)^5 \left(\frac{\Delta}{d_m} \right)^{-1} \quad (6)$$

式(6)中の α はクレスト頂部を通過する流砂量と平均流砂量との比で、従来の研究⁴⁾から $\alpha=2$ とする。図-5は式(6)による計算結果と実験値を比較したものである。式(6)中の[]内は粒子の混合割合によるクレスト前面での堆積率を表しており、均一砂、混合砂とも実験値と比較的に良く適合している。また、このように固定河床波上で得られた Pd の算定法が移動床においても適用可能であることが示された。

5. あとがき 河床波前縁部に着目して粒子の挙動を局所的な水理条件とクレスト前面での堆積率との関係から評価した。また、その結果を河床波の移動速度の算定に適用し、妥当な結果を得ることができた。しかし、流砂量の算定法の適否が結果に大きく影響することから今後この点について検討する必要があると考える。なお、本研究は昭和63年度文部省科学研究費奨励研究(A)の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献 1) Engelund, F.: HYDRAULIC RESISTANCE OF ALLUVIAL STREAMS, Proc. ASCE, Vol. 92, No. HY2, pp. 315-326, 1966. 2) 上野鉄男、宇民 正: 砂澱と砂堆の発達過程に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第318号、pp. 75-84, 1982. 3) 中川博次、辻本哲郎: 河床形状と流砂の相互作用と河床波の発達過程について、京大防災研年報、第21号B-2、pp. 385-405, 1978. 4) Holtorff, G.: RESISTANCE TO FLOW IN ALLUVIAL CHANNELS, Proc. ASCE, Vol. 108, No. HY8, pp. 1010-1028, 1982.

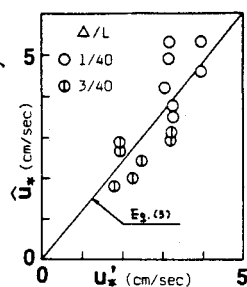


図-3 u_*' と $\hat{u}_*$ の関係

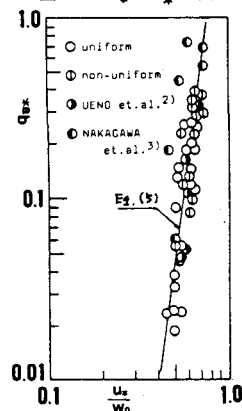


図-4 流砂量の評価

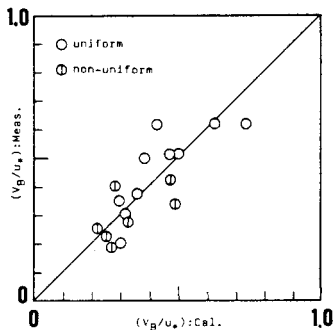


図-5 移動速度の評価