

II-120

河床波前縁での分級効果の評価と移動速度への適用

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 砂澁や砂堆などの河床波の特徴はクレストの形成とそれにとまう剥離域の存在である。このために粒子は平坦床とは異なった条件に支配される。さらに、河床が混合砂からなる場合や河床形態の遷移過程では剥離域での流砂の挙動は均一粒径や平衡状態の場合とも異なると考えられる。すなわち、混合砂の場合には河床波の形成条件に適合しない粒子が存在するであろうし、また、遷移過程では河床は非平衡な状況を呈するようになる。したがって、例えば、河床波の移動機構についても剥離域での流砂の挙動を考慮する必要があると考える。こうした観点から、本文では、まず河床波前面での粒子の堆積率とその支配パラメータについて実験的に検討する。さらに、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。

2. 実験概要 実験には、長さ6.5m、幅20cmの亚克力製可変勾配水路を用

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	

いた。まず、河床波前面での堆積率に関する実験は、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、ほぼ均一な3種類の砂(A砂: $d_m=0.021\text{cm}$ 、B砂: 0.042cm 、C砂: 0.057cm)を用いて、それを模型の背面に敷き、各流量に対する河床波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/河床波頂部の通過量)を算定した。つぎに、図-1に示すような均一砂と混合砂の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、流砂量を水路下流端で測定した。

3. 河床波前面での粒子の堆積率 河床波頂部付近での粒子の挙動は、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河床波頂部の摩擦速度によって評価することにする。

河床波頂部の摩擦速度は、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に適合するような値として求めた。

$$\tilde{u} = \exp(\tilde{r}_0 \cdot (1-\tilde{y})^2) \left[1 - 2\tilde{u}_* \int_0^{1-\tilde{y}} \frac{d\tilde{z}}{(1-\tilde{z}) \cdot \exp(\tilde{r}_0 \cdot \tilde{z}^2)} - 2\tilde{u}_* \int_0^{1-\tilde{y}} \frac{\ln(1-\tilde{z})}{(1-\tilde{z}) \cdot \exp(\tilde{r}_0 \cdot \tilde{z}^2)} d\tilde{z} \right]$$

$$\tilde{u} = \left[\frac{u}{u_*} \right]^2, \tilde{u}_* = \frac{\hat{u}_*}{\kappa \cdot u_*}, \tilde{r}_0 = \frac{h}{r_0}, \tilde{y} = \frac{y}{h}, \tilde{z} = 1 - \tilde{y} \quad (1)$$

ここに、 u_s は表面流速、 $\hat{u}_*$ は河床波頂部の摩擦速度、 κ はカルマン定数、 r_0 は前縁部の局率半径である。図-2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好一致している。このことから、本手法によって得られた摩擦速度は有効であると考えられる。

さて、先の定義に基づいて求めた河床波前面での粒子の堆積率を、河床波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-3に示す。このように整理すると、河床波形状の影響は陰に $\hat{u}_*$ に含まれるため、堆積率はみかけ上 $\hat{u}_*/w_0$ のみの関数として表すことができる。そこで、実験結果をもとに堆積率を次式で表す。

$$P_{d1} = \left[\frac{k}{\hat{u}_*/w_0} \right]^{3/2} \quad (2)$$

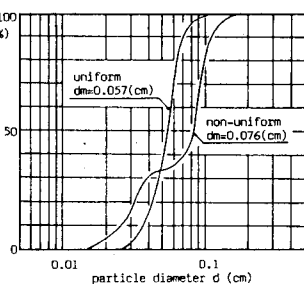


図-1 粒径加積曲線

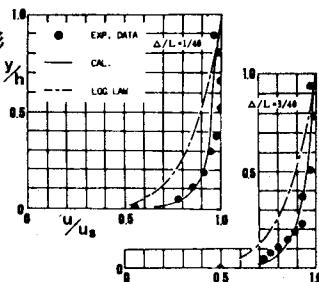


図-2 河床波頂部の流速分布

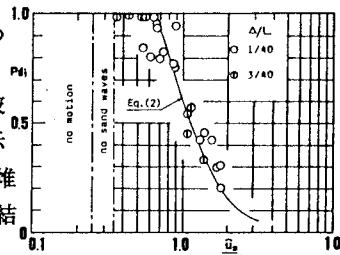


図-3 河床波前面での粒子の堆積率

ここに、 k は全粒子が河床波の前面に堆積する限界の条件に相当する値であり、0.60とする。 $\hat{u}_*/w_{0i}$ がこれ以下の値を取る場合は全粒子が河床波前面に堆積する($P_{di}=1$)と考える。図-4は混合砂を用いた移動床実験より得られた河床波前面の粒度分布と式(2)を用いた計算結果を示している。河床波前面は粗粒化しており、計算結果もこの傾向をよく表しているといえる。

ところで、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-5に示した。多少のばらつきはあるものの、両者はほぼ $\hat{u}_* = 1.2 u_*'$ (3) の関係にあるといえる。そこで、移動床実験に関してはこの関係を用いて河床波頂部の摩擦速度を求めることにする。

4. 河床波の移動速度への適用 河床波の移動は河床波の頂部を通過した粒子が同じ河床波の前面に堆積することによって行われる。すなわち、河床波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 P_{di} を用いて移動速度は次式で与えられる。

$$V_b = \frac{\sum P_{di} \cdot q_{BCi}}{(1-\lambda) \cdot \Delta} \quad (4)$$

ここに、 λ は空隙率、 Δ は波高、 q_{BCi} は河床波頂部を通過する粒径 d_i の粒子の流砂量で、河道の平均を q_{Bi} として $q_{BCi} = 2 \cdot q_{Bi}$ である⁴⁾。移動速度は、各粒径階に対して、粒径別の流砂量から河床波前面での堆積率を求めることによって得られる。粒径別の流砂量に関しては平均摩擦速度と粒子の沈降速度の比 u_*/w_{0i} で整理したものを図-6(a)、(b)に示す。図中の曲線は次式の Brown 型の流砂量式である。

$$q_{BCi} = \frac{q_{Bi}}{f_o(d_i) \cdot u_* \cdot d_i} = 10 \left\{ \frac{u_*}{w_{0i}} - \left[\frac{u_*}{w_{0i}} \right]_{ci} \right\}^{5/2} \quad (5)$$

ここに、 $(u_*/w_{0i})_{ci}$ は河床波の発生限界の掃流力⁵⁾に相当する値で、均一砂の場合0.35である。また、混合砂の場合には修正 Egiazaroff 式から得られる。混合砂に対してはデータが少ないが、全体として式(5)は妥当な値を与えることがわかる。

以上より、河床波の移動速度は次式で表される。

$$\frac{V_b}{u_*} = \frac{7}{1-\lambda} \left[\sum_{i=1}^n f_o(d_i) \cdot P_{di} \cdot \left\{ \frac{u_*}{w_{0i}} - \left[\frac{u_*}{w_{0i}} \right]_{ci} \right\}^{5/2} \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \right] \left(\frac{\Delta}{d_m} \right)^{-1} \quad (6)$$

ただし、 $w_{0i}/u_* \geq 2$ については $P_{di}=1$ 、 $w_{0i}/u_* < 2$ については $P_{di}=(w_{0i}/u_*)^{3/2}$

図-7は式(6)による計算結果と実験値を比較したものである。両者は比較的良く適合しており本文での考え方の妥当性が示される。また、固定河床波上で得られた河床波前面での堆積率の算定法が移動床においても適用可能であることも示された。

5. あとがき 河床波前面での粒子の堆積率は、河床波頂部の摩擦速度と沈降速度の比によって統一的に表されることを示し、前縁部の粒度分布の算定に適用した。さらに、この結果をもとに粒子レベルでの河床波の移動速度の算定式を提案した。今後は粒度分布の変化特性等を考慮したより詳細な検討が必要であると考えている。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.: Proc. ASCE, Vol. 92, HY2, 1966. 2) 上野鉄男、宇民 正：土木学会論文報告集、第318号、1982. 3) 中川博次、辻本哲郎：京大防災研年報、第21号B-2、1978. 4) Holtorff, G.: Proc. ASCE, Vol. 108, No. HY8, 1982. 5) 上野鉄男：第25回水理講演会論文集、1981.

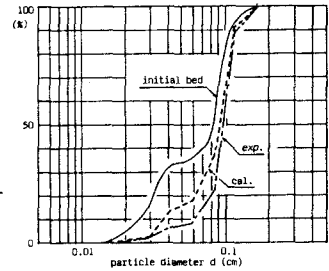


図-4 河床波前面の粒度分布

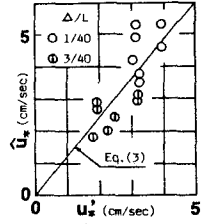


図-5 $\hat{u}_*$ と u_*' の関係

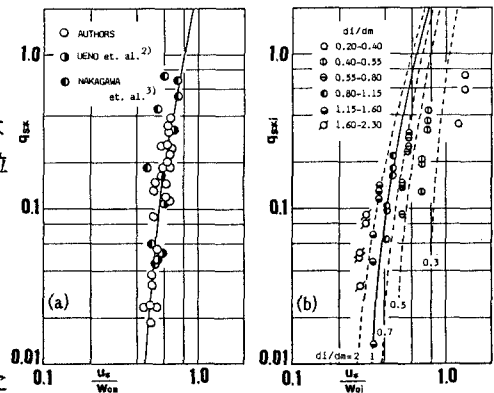


図-6 流砂量の評価 (a: uniform, b: non-uniform)

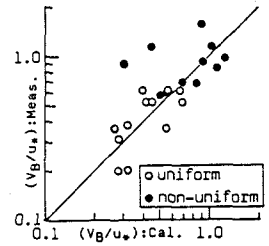


図-7 移動速度の評価