

II-58

河床波上の混合粒径粒子の離脱率の評価

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 河床波上では流れの再付着点付近で流速変動が極大となり、これが流下方向に変化する。それゆえ、粒子に作用する流体力が場所的に異なり、流砂運動に副次的に影響を及ぼしていると考えられる。これまでに、著者らは河床波上での流速変動の場所的变化を考慮した均一粒子のpick-up rateの推定法を提案した¹⁾。本文ではこの推定法をもとに、流速変動の場所的变化がpick-up rateに及ぼす効果を検討する。さらに、混合粒径砂に対する粒径別pick-up rateの評価をおこなう。

2. 実験概要 実験は長さ14m、幅20cmの鋼製可変勾配水路を使用し、水路床に波長40cm、波高2cm、前面の傾きが45°の粗面仕上げの河床波模型を17波敷き詰めて固定床とした。ただし、下流より10波目の河床波模型は、背面上の任意の位置を10cm

表-1 実験条件

Run No.	q_w (cm^3/sec)	h_m (cm)	Fr	Ie	U_{*1} (cm/sec)	Sand
K-1	400	9.90	0.41	1/400	3.5	Uniform
K-2	350	8.98	0.42	1/404	3.4	Uniform
K-3	250	7.12	0.42	1/380	3.3	Uniform
K-4	350	8.98	0.42	1/404	3.4	Graded

(横断方向)×3cm(縦断方向)の範囲を1つの単位として局所的に移動床とすることができるようになっている。実験に用いた砂は平均粒径 $d_m=0.057\text{cm}$ のほぼ均一な砂および $d_m=0.061\text{cm}$ 、幾何標準偏差 $s_d=\sqrt{(d_{s4}/d_{s5})}=1.7$ の混合砂である。粒子のpick-up rateは、着目位置の1ブロックのみを移動床とし、そこからpick-upされた砂の量を測定することによって求められた。なお、表-1は実験条件である。

3. 河床波上の粒子のpick-up rateに及ぼす流速変動の場所的变化

河床からの粒子の離脱を、図-1に示すように完全転動と仮定し、流下方向および鉛直方向の流速変動の場所的变化を考慮すると、河床粒子のpick-up rateは次式で表される¹⁾。

$$p_{*x} = p_* \sqrt{(d/(\sigma/\rho - 1)g)} \\ = K_0 p_* \tau_*^{1/2} \{ (1 + \eta \phi(r_c)/p)^2 + \eta^2 - \tau_{*c}/\tau_* \}^{1/2} \quad (1)$$

ただし、 $K_0 = K[A_X^2 B_X C_X \{(k \sin \theta' + \cos \theta')/\theta_0\}]^{1/2}$ 、 $K = 1.5 \times 10^{-3}$ 、 $A_X = 8.44$ 、 $B_X = 0.113$ 、 $C_X = 0.15$ 、 $k \sin \theta' + \cos \theta' = 1.164$ 、 $\theta_0 = \pi/4$ 。ここに、 p は粒子に作用する流速 $V(\sqrt{(u+u')^2 + v'^2})$ が粒子の移動限界流速 V_c を越える確率、 η は V の変動係数(相対乱れ強度)、 $\phi(\cdot)$ は V に関する正規確率密度関数である。なお、図-2は河床波上の流下方向および鉛直方向の流速変動の実験結果^{2), 3)}から導かれた η の場所的变化を示している。一方、河床波上のせん断応力分布は再付着点からの距離を x' として、次式で表される¹⁾。

$$\frac{\tau}{\rho u_m^2} = \Pi \left(\frac{k_s}{h_m} \right) \left(\frac{x'}{k_s} \right)^{3/4} \quad (2)$$

ただし、 $\Pi = (B/A)^2 C^{1/4}$ 、 $A = 8.94$ 、 $B = \{2/(2-L/h_m \cdot \lambda)\} \{L/h_m(1-5.1\lambda)\}^{-1/2}$ 、 $C \approx A^2 \{0.26 + \lambda/(Fr \cdot B)\}$ 、ここに、 L は波長、 h_m は平均水深、 λ は波形勾配である。式(1)および式(2)より、河床波上の粒子のpick-up rateを計算すると、図-3のように実験結果と比較的良好一致を示す。

図-4はpick-up rateに及ぼす流速変動の場所的变化の効果を示したもので、クレストにおける流速変動係数を用いたpick-up rate(p_{*x0})を基準にして図示されている。同図から、流速変動に場所的变化のある河床波上では、pick-up

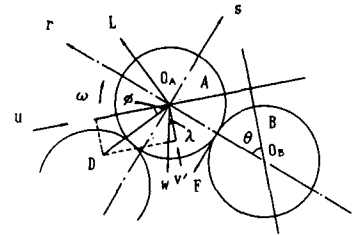


図-1 河床波上の粒子の離脱モデル

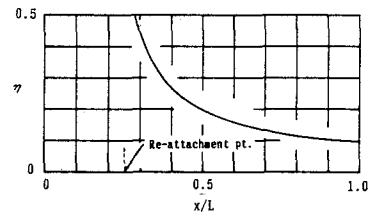


図-2 河床波上の流速変動係数

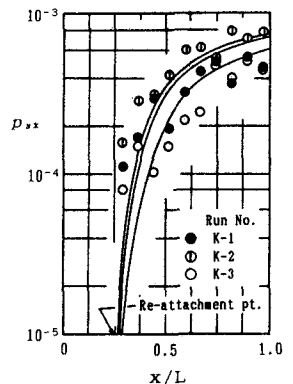


図-3 河床波上の粒子の pick-up rateの推定結果

rateは再付着点から河床波の中央部において大きくなることがわかる。また、pick-up rateが増加する限界の τ_{*k} は0.08程度であり、これはpick-up rateの推定に中川・辻本式⁴⁾を用いた場合に、実験値がこの式による推定値からはずれる τ_{*k} の上限の値にはほぼ等しい。

さて、式(1)は河床波上の位置によって流速の変動係数が変化する誤差関数を含む複雑な形となっているので、現象の特性を失わない範囲で式(1)の近似を行う。式(1)において $p\{(1+\eta\phi(r_c)/p)^2+\eta^2-\tau_{*c}/\tau_{*k}\}^{1/2}$ は河床波上での流速変動の場所的変化の影響を受ける部分であるが、近似式ではこれを粒子の限界掃流力に含めて、次式によって近似する。

$$p_{*k} = K_0 \tau_{*k}^{1/2} (1 - K_2 \tau_{*c}/\tau_{*k})^3 \quad (3)$$

ここに、 $K_0 = 2.01 \times 10^{-3}$ 。また、 $K_2 \tau_{*c}$ は式(1)において $V > V_c$ となる確率 p が0.01となるときの τ_{*k} で与えることにすると、0.014となる。河床波実験によく用いられる細砂の場合、 K_2 の値は0.4である。

図-5は実験結果に対して式(1)と式(3)を比較したものであり、両者は τ_{*k} の広い範囲で比較よく一致している。

4. 粒径別pick-up rateの推定式 混合砂に対する粒径別のpick-up rateは、均一砂に対して導かれた式(3)において、限界掃流力の部分を粒径別に与えることによって推定できると考えられる。そして、式(3)は次のように書き換えられる。

$$p_{*ki} = K_0 \tau_{*ki}^{1/2} (1 - K_2 \tau_{*ci}/\tau_{*ki})^3 \quad (4)$$

また、粒径別限界掃流力は辻本⁵⁾による次式で算定する。

$$\tau_{*ci}/\tau_{*cm} = (d_i/d_m)^{-1} \quad (5)$$

図-6および図-7は式(4)と実験結果を比較したものである。図-6は無次元せん断応力に対する粒径別pick-up rateであり、図-7は河床波上の位置による粒径別pick-up rateを示している。平均粒径程度の粒径階の粒子に対してはほぼ適切に評価されているといえるが、最大粒径階および最小粒径階に対してはデータのばらつきが大きい。しかし、現象の複雑さやこの種の実験の精度を考慮するとほぼ妥当な結果であると考えられる。

5. あとがき 本文では、河床波上の流速変動の場所的変化がpick-up rateに及ぼす効果を検討した。その結果、河床波上では流れの再付着点から河床波の中央部においてpick-up rateの増加が顕著で、この限界の τ_{*k} は0.08程度であることがわかった。そして、均一砂に対するpick-up rate推定の近似式を提案し、これを混合砂に対する粒径別pick-up rateの推定に拡張して、その推定結果がほぼ妥当なものであることを示した。最後に、本研究は平成3年度文部省科学研究費奨励研究(A)および(財)日本科学協会笹川科学研究助成の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献 1)三輪・大同：水工学論文集、第36巻、1992。 2)中川・辻本・村上・水橋：第28回水講論文集、1984。 3)板倉・森・岸：第35回年講概要集、1980。 4)中川・辻本：土木学会論文報告集、第244号、1975。 5)辻本：土木学会論文集、第411号、1989。

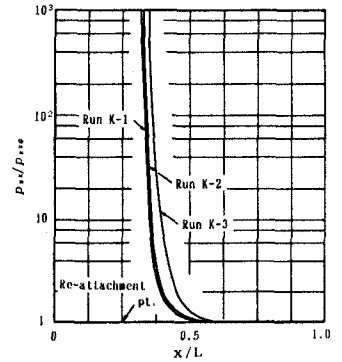


図-4 pick-up rateに及ぼす流体力の場所的変化の効果

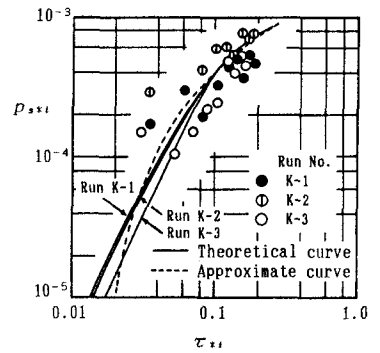


図-5 pick-up rate推定式の比較

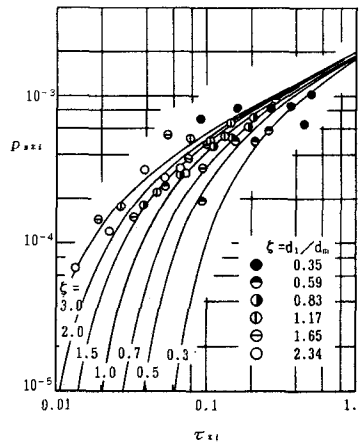


図-6 粒径別pick-up rate

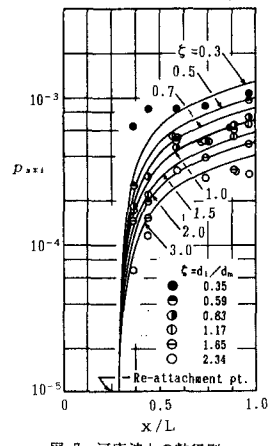


図-7 河床波上の粒径別pick-up rateの推定結果