

河床砂礫の浮上率

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男
京都大学 大学院 学生員 藤田 正治
京都大学 大学院 学生員 向井 健

1. まえがき 河床材料が混合砂の場合、河床条件(遮蔽効果)が時間的・場所的に変化するため、非平衡浮遊砂の問題が重要である。著者らはこのような問題に対して、確率過程論的な立場から、浮遊砂量の算定法を検討しているが、そのためには、河床条件に応じた河床砂礫の浮上率を明らかにする必要がある。本研究は、この点に鑑み、礫の間隙中の細砂の存在高さに応じて遮蔽効果を評価し、一様砂および混合砂の浮上率の算定式を検討するものである。

2. 理論的検討 以下の解析では、河床材料を図-1に示すような礫と細砂の二粒径混合砂とし、細砂の表面が礫の頂部から $d_r - \alpha$ の位置にあるものとする。

著者らの研究¹⁾によると、河床砂礫は揚圧力 F_{Lo} の作用で浮遊砂となる。 F_{Lo} の作用時間を t_* とし、河床砂礫が浮遊砂と交換される時間を $t_c = R_2 t_*$ とおくと、単位面積、単位時間当り河床から浮上する砂の量 q_{su} は次式で表示される。

$$q_{su} = P \cdot \frac{\pi}{6} \sigma d^3 \frac{R_1}{\pi d^2} \int_0^\infty \frac{1}{t_c} f_{F_{Lo}}(F_{Lo}) dF_{Lo} \dots (1)$$

ここに、 d, σ, G : 粒子の粒径、密度および水中重量、 P : 細砂面の露出割合、 $f_{F_{Lo}}$: F_{Lo} の確率分布、 R_1 : 河床粒子の中で浮上可能なものの全体に占める割合である。 $f_{F_{Lo}}$ は遮蔽効果を考慮して、平均 C 、標準偏差 $C R^2 U_*^2 d^2$ の正規分布とする。ここに、 C : 揚圧力係数、 R : 遮蔽係数である。 t_* は著者らの研究¹⁾ によると $t_* = \sqrt{(\pi/6)} \sigma d^3 / (F_{Lo} - G)$ と表わされるので、式(1)は次式のようになる。

$$\hat{q}_{su} = \frac{2}{3} P K \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{\sigma}{\rho} \hat{u}_* \int_0^\infty \sqrt{C R^2 \eta - \frac{\pi}{8} C_{00} \hat{\eta}_0^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2} \eta^2) d\eta \dots (2)$$

ここに、 $\hat{q}_{su} = q_{su} / \rho \sqrt{g d}$ 、 $K = R_1 / R_2$ 、 $\eta_0 = (\pi/8) \cdot C_{00} \hat{\eta}_0^2 / C R^2$ 、 $\hat{\eta}_0 = \hat{w}_0 / \hat{u}_*$ 、 $\hat{w}_0 = w_0 / \sqrt{g d}$ 、 $\hat{u}_* = U_* / \sqrt{g d}$ 、 $C_{00} = 2 + 24 \hat{U} / \hat{w}_0$ 、 $\hat{U} = U / \sqrt{d^3 g}$ で、 ρ : 流体密度、 w_0 : 粒子の沈降速度、 U : 動粘性係数である。

式(2)中の C および R は砂粒 L_1 のスズ数 $R_* = d_0 U_* / \nu$ および α / d_r の関数と考えられる。ここに、 $d_0 = d_r - \alpha$ である。理論

的にそれらの関係を求めることは困難であるので、浮遊限界に関する研究成果よりその関係を検討する。著者らの研究¹⁾ より、浮遊限界のときの無次元掃流力を τ_{*s} とすると、 $C R^2 = (\pi/6) / \alpha / \tau_{*s}$ ($\alpha = 3$) と表わされる。一様粒径 d の場合 ($R = 1$) の τ_{*s} の値²⁾ より C を求め、 C と $u_* d / \nu$ の関係を示したものが図-2である。また、 α / d_r に対する τ_{*s} の値¹⁾ ($\sigma / \rho =$

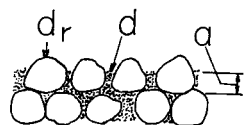


図-1 河床材料

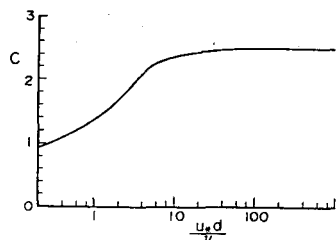


図-2 揚圧力係数

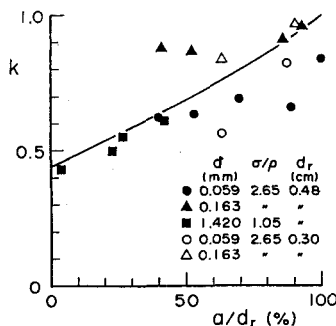


図-3 遮蔽係数

1.05 のデータは後述の実験による) と $d_0 u_{*1}/\omega$ に対する C の値から β を計算し、 β と α/d_r の関係を整理したものが図-3 である。以上より、図-2, 3 から $d_0 u_{*1}/\omega$, α/d_r の値に対する C および β の値が求められ、 β_0 , σ/p , α , K をパラメータとして式(2)から $\hat{q}_{su}$ が計算される。

3. 実験的検討 長さ 8 m, 幅 30 cm の水路に、図-4 に示すような円形断面(直径 4 cm)の給砂装置を上流から約 5 m の位置に取り付け、河床に一樣に敷かれた粒径 4.8 mm の礫の間隙から、粒径 1.4 mm, 比重 1.05 のポリスチレン粒子が供給できるようにした。実験方法は、流量と給砂量を一定とし、粒子の存在高さからその給砂量に見合っただ常になった時点で、水路横方向から河床を浮上する粒子の運動を高速ビデオ撮影した。流量および給砂量の条件を変えて同様の実験を行い、 β_0 , α/d_r に対する浮上率をビデオ解析から求めた。

図-5 は $\hat{q}_{su}$ の実験値と理論値を β_0 と α/d_r をパラメータとして示したものである。ただし、両者とも $p=1$ に換算して表示している。図中には参考のために、浮遊砂基準点濃度の推定式を導くときに、芦田・道上³⁾, 板倉・岸⁴⁾ が評価した $\hat{q}_{su}$ の理論式も描かれている。 K の値を 0.035 としたとき、理論値は実験値の傾向を大体表わしているが、次にこの K の値の物理的な意味について検討する。 β_0 は粒子が浮上可能な状態にある確率、すなわち隣接粒子との接線がすべて上に開くような状態にある確率 $(1/2)^n$ を表わす。ここに、 n : 隣接粒子個数である。ところで、球を充填したときの粒子の接触個数 n_0 と空隙率 λ の関係は図-6 のようになる⁵⁾。(実験値は W.O. Smith らによる) いま、 n と n_0 の比を接触粒子の中心が被接触粒子の上端から下端の高さの位置に存在する確率で表わせるものとするとな $n=n_0/2$ となり、 n と λ の関係が図-6 のようになる。 $\lambda=0.4$ のとき $n \approx 4.5$ であり、 $\beta_0=1$ とすると $K=0.044$ となる。この値は実験定数 $K=0.035$ と大体一致し、この事より以上の理論の妥当性が示唆される。なお、実際の河床で浮上可能な粒子数の割合を求めると $\beta_1=0.029 \sim 0.060$ となった。

4. あとがき 以上、粗面上の粒子が礫の遮蔽効果をうけるような場合でも、式(2)で河床からの浮上率が計算できることが明らかにされたが、実際の問題に適用するためには、連続的な粒度分布の混合砂に対して本理論をどのように応用するかについて検討する必要がある。

<参考文献> 1) 芦田; 粗面上の粒子の浮遊機構, 第28回水講, 1984 2) 芦田; 粒子の浮遊限界と浮遊砂量に関する研究, 京大防災研年報第25号, 昭57 3) 芦田; 浮遊砂量に関する研究(I), 京大防災研年報第10号, 昭42 4) Itakura and Kishi; Open Channel Flow with Suspended Sediment, Proc. ASCE, HY8, 1980 5) 久保; 粉体 理論と応用, 丸善

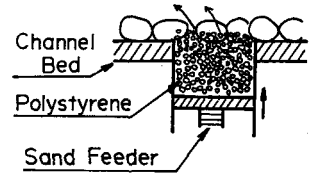


図-4 給砂装置

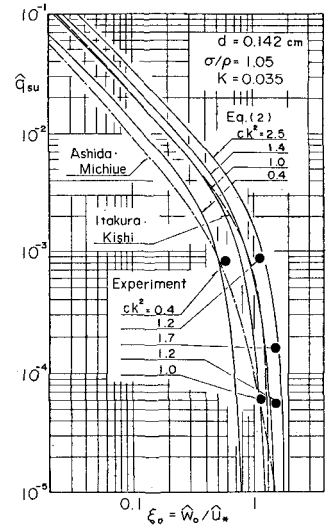


図-5 河床砂礫の浮上率

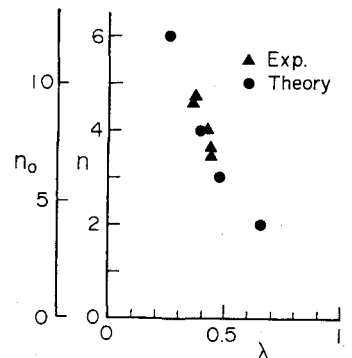


図-6 隣接粒子個数