

II-245

河床波の平衡波高

立命館大学理工学部 正員 大同淳之 舞鶴工業高等専門学校 正員 三輪 浩

立命館大学理工学研究科 学生員 矢野定男

1. はしがき 河床波の平衡波高は、その発達に寄与する河床波背面のせん断力とその発達を止める力を評価する必要がある。本文は背面せん断力として、著者らの方法を用い、止める力として、河床波区分図の遷移領域の下限を用い、 $s=1.65$ およびそれ以下の軽量砂の波高の実測値の説明を試みる。

2. 波高の算定式

2-1. 小規模河床波上の流れの抵抗則 著者ら¹⁾は、小規模河床波の発達している河道での抵抗 τ を摩擦抵抗 τ' と河床波の形状抵抗 τ'' で表し、 τ' については、背面上の境界層の運動量積分方程式に、境界層内の流速分布にはべき乗則、局所的な底面摩擦係数には Manning-Strickler 型の式を用いて求めたもので境界層厚 $\delta(x)$ および $\tau'(x)$ は次のように表わせる。

$$\delta(x) = C^{-3/4} k_s^{1/4} x^{3/4} \quad (1) \quad \tau'(x) / \rho u_m^2 = \Pi (k_s / h_m) (x / k_s)^{3/4} \quad (2)$$

ここに、 k_s は相当粗度、 h_m は平均水深、 $C \doteq A^2 \{0.26 + \lambda / (Fr \cdot B)^2\}$ 、 $\Pi = (B/A)^2 C^{1/4}$ 、 A は抵抗則の係数で 8.94、 $\lambda = \Delta / L$ 、 x は再付着点からの距離、 $B = \{1 - (L/2h_m)\lambda\}^{-1} (L/h_m)^{-1/2} (1 - m\lambda)^{-1/2}$ 、 $m = L_s / \Delta$ 、 L_s は流れの剥離長である。

式(2)のせん断応力分布を河床波1波長にわたって積分し、1波長平均の摩擦抵抗を次のように表す。

$$\overline{\tau'} = \rho u_*^2 - \frac{\rho \cos \alpha}{L} \left\{ \int_0^{L-L_s} u_*^2 dx \right\} = \frac{4}{7} \Pi' (h_m / k_s)^{1/4} \rho u_m^2 \quad (3)$$

ただし、 $\Pi' = (B'/A)^2 C^{1/4}$ 、 $B' = \{1 - (L/2h_m)\lambda\}^{-1} (L/h_m)^{1/8} (1 - m\lambda)^{3/8} (1 + \lambda^2)^{3/16}$ 、 α は平均河床面に対する河床波背面の仰角である。形状抵抗 τ'' は石川²⁾の式を用いて、次式で表す。

$$\overline{\tau''} = (1/2) C_D A \rho u_m^2 \quad (4)$$

$$\text{ここに } C_D = \frac{4(1-4\lambda)(2+\zeta)}{(2-\lambda)^2 \{2+(1-8\lambda)\zeta\}} \left\{ \frac{2(1-4\lambda)\zeta}{2+(1-8\lambda)\zeta} + 0.13 \right\}, \quad A = \frac{\lambda}{1+\zeta/2}, \quad \zeta = \frac{\Delta}{h_m}$$

である。式(3)と式(4)を合計し、河床波を伴う流れの抵抗則式として次式が得た。

$$u_m / u_* = \{(4/7) \Pi' (h_m / k_s)^{-1/4} + (1/2) C_D A\}^{-1/2} \quad (5)$$

2-2. 平衡波高 (2)式の x に $L - L_s$ (L_s : クレストから流れの再付着点までの距離) を入れると、クレスト頂部のせん断力 $\tau_{\max}$ は、

$$\tau_{\max} / \rho u_m^2 = (4/7) \Pi (h_m / k_s)^{-1} (L / k_s)^{3/4} (1 - m\lambda)^{7/4} (1 + \lambda^2)^{3/8} \quad (6)$$

Lower regimeでは、流れの規模が大きくなると、遷移領域に入る。石川²⁾にならって遷移領域の下限の τ_{*k} が、波高を最大にする水理条件とする。Garde-Rajuのグラフによる遷移領域の下限、

$$L/s = 0.0147(R/d)^{-0.465} \quad \text{を書き直して、} \quad \tau_{*k} = 0.0147(h/d)^{0.535} \quad (7)$$

と表わす。(7)式の τ_{*k} は流路のせん断力の長さ方向の平均値である。(5)式より平均の $\overline{\tau}$ と τ' 、 τ'' との関係は、次のようになる。

$$\overline{\tau'} = [\{1 + (7/8)(C_D A / \Pi') (h_m / k_s)^{1/4}\}]^{-1} \overline{\tau} \quad (8)$$

(8)式の $\overline{\tau'}$ は、与えられた $\overline{\tau}$ のうち、摩擦に費やされる1波長平均のせん断力である。

平均せん断力は、図1の分布の平均であるから、 $\overline{\tau'}$ $x^{3/4}$ から $(L - L_s)$ の部分についてのみ考えると $L - L_s$ の点の局所のせん断応力 τ は、 $\overline{\tau'}$ の $(7/4)\{1 - M(\Delta/L)\}^{-1}$ 倍に相当する。

(6)式と(7)式を等置すると、

$$\frac{4}{7} \Pi \left(\frac{h_m}{k_s} \right)^{-1} \left(\frac{L}{k_s} \right)^{3/4} \left(1 - m \frac{\Delta}{L} \right)^{7/4} \left[1 + \left(\frac{\Delta}{L} \right)^2 \right]^{3/8} = 0.0147 \left(\frac{h_m}{d} \right)^{0.535} \left(\frac{sgd}{u_m^2} \right) \left[1 + \frac{7}{8} \frac{C_D \Delta}{\Pi'} \left(\frac{h_m}{k_s} \right)^{1/4} \right]^{-1} \quad (9)$$

となる。式(9)に水深、平均流速、波長、粒径および砂の比重を与えると平衡波高が計算出来る。

2-3. 適用例 式(9)の適用にあたっては、式(5)の抵抗則、ひいては Π , B' および C' が実測値を満足している必要がある。図2-a, b, c に示すように、これらの実測値を説明出来ている斐伊川のデータについて、(3)式および(4)式で示される τ' , τ'' およびそれらの和 $\bar{\tau}$ と実測値の $\bar{\tau}$ との比を図3に示す。(6)式で予測した値と(8)式で求めた平均せん断力 τ' の $(7/4)\{1-m(\Delta/L)\}^{-1}$ 倍との比較を図4に示す。図6は(9)式の計算結果を示す。比重が砂のときは、限界値は(7)式でほぼ説明できる事を示しているが、比重が軽い材料については、図5に示すように限界線が上方に移行する。それぞれの材料について適切な限界線を用いたとき、図6に示すように波高の計算値は実測値に一致する。

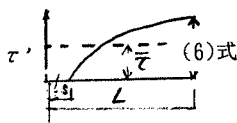


図1 $\bar{\tau}$ と τ_{max} の比

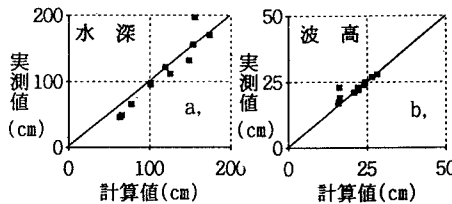


図2 斐伊川の実測値への適用例

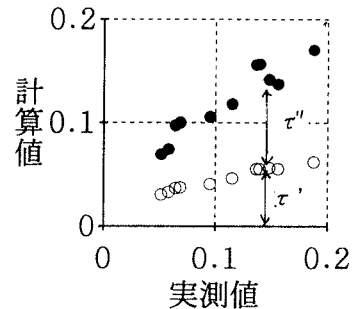


図3 せん断力中の割合

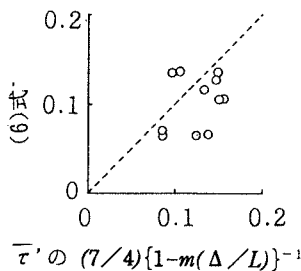


図4

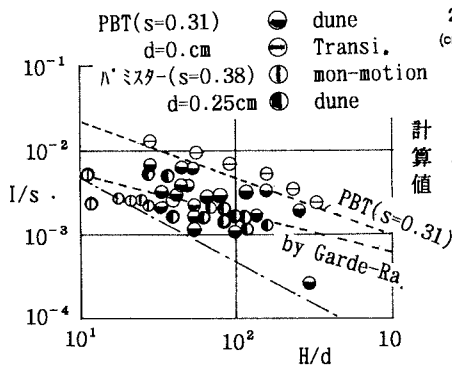


図5 軽量材の領域区分

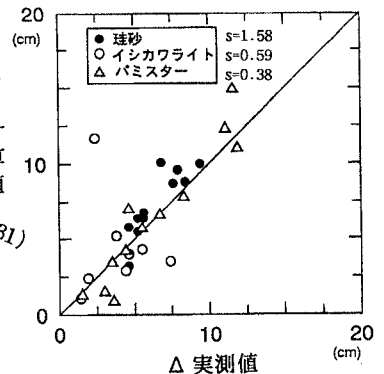


図6 式(9)の適用例

3. むすび Lower regimeの河床波の平衡高さを求めるにおいて、発達限界に遷移領域の下限値を用いて実測値との比較を試みた。ここで用いた方法では、比重が小さい材料についても、それぞれの限界線を用いると波高が予測できる。

1)三輪 浩、大同淳之：河床波による流水抵抗と流砂量，第36回水工学論文集，PP. 123-130，1992。

2)石川忠晴：河川の流砂に関する基礎的研究，東工大土木研究報告，No. 25，1979。

3)山本晃一：相似率の観点から見た移動床流れの水理（Ⅲ），土木研究所資料，1059号，昭50。

4)山本晃一，林 正男：河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性、土木研究所資料，2905号，1990。 5)山本晃一，佐々木克也：同上（Ⅱ），土木研究所資料，3111号，1992。