

II-245

混合砂河床における河床波の変形と流砂の予測

舞鶴工業高等専門学校 正会員 三輪 浩*

立命館大学 理工学部 正会員 大同淳**

1. まえがき 混合砂河床における河床波は砂粒子の分級の影響によってそのスケールが一様砂河床の場合とは異なったものになり、移動床流れ場の取り扱いを困難にしている。本文では河床波のスケールを規定する代表粒径を導入して非定常流れ場における河床波の変形過程と水深および流砂量の予測を行っている。

2. 河床波を有する移動床流れ場の記述 河床波を有する移動床流れ場では河床波の変形に対する流れの応答が流れの変化に対する河床波の変形の応答に対して十分に早いと見なせるので、時々刻々の河床波形状に応じて種々の水理現象の時間的変化を算定することができる。流れ場を記述するための基礎式は抵抗則、流砂量式および波高、波長の変化速度式で、それぞれ次式^{1),2),3)}を用いる。

$$u_m/u_* = \left\{ 4/7 \cdot \Pi' (h_m/k_s)^{-1/4} + 1/2 \cdot C_D \Lambda \right\}^{-1/2} \cdots \cdots 1), \quad q_{B*} = q_B / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_m^3} = 8(\tau_*' - \tau_{*c})^{3/2} \cdots \cdots 2)$$

$$\left. \begin{aligned} dH/dt &= k_H / (1 - \rho_0) \cdot q_B / L \cdot (1 - H/H_e) \\ dL/dt &= k_L / (1 - \rho_0) \cdot q_B / H \cdot \{1 - (L - L_0)/(L_e - L_0)\} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots 3)$$

ただし、 $\Pi' = 0.0125B^{1/2}C^{1/4}$, $B' = (1 - \zeta/2)^{-1}\xi^{-1/8}(1 - n\lambda)^{3/8}(1 + \lambda^2)^{3/16}$, $C \approx 20.7 + 80\lambda/(F_r \cdot B)^2$, $B = (1 - \zeta/2)^{-1} \times \{\xi(1 - n\lambda)\}^{-1/2}$, $C_D = \{4(1 - 4\lambda)(2 + \zeta)\} / [(2 - \zeta)^2 \{2 + (1 - 8\lambda)\zeta\} [2(1 - 4\lambda)\zeta / \{2 + (1 - 8\lambda)\zeta\} + 0.13]]$, $\Lambda = \lambda / (1 + \zeta/2)$, $\zeta = H/h_m$, $\xi = L/h_m$, $\lambda = H/L$, $n = L_s/H$. ここに、 k_s は等価砂粗度、 F_r はFroude数、 L_s は剥離域の長さ、 τ_*' は無次元有効掃流力、 k_H , k_L は定数、 H_e , L_e は波高、波長の平衡値、 L_0 は初期波長(100 d_m)である。 τ_*' , H_e および L_e はそれぞれ次式から算定される^{4),5),6)}。

$$\tau_*' = 4/7 \cdot \Pi' (h_m/k_s)^{-1/4} u_m^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd_m\} \cdots \cdots 4)$$

$$\lambda_e = H_e/L_e = 0.0047(\tau_*'/\tau_{*c} - 1) \exp\{1 - 0.0047/\lambda_{\max} \cdot (\tau_*'/\tau_{*c} - 1)\} \cdots \cdots 5), \quad L_e = \alpha \cdot h_{me} \quad (\alpha \approx 5) \cdots \cdots 6)$$

ここに、 $\lambda_{\max}$ は最大波形勾配で、 $\lambda_{\max} = -0.058 + 0.02 \ln(h_m/d)$ for $h_m/d < 400$, $\lambda_{\max} = 0.062$ for $h_m/d \geq 400$ で与えられる。 h_{me} は平衡状態の平均水深である。

3. 実験概要 実験は長さ9m, 幅0.2mの亚克力製可変勾配水路を用いて行った。実験に用いた砂の粒度分布は図-1に示す混合砂と一様砂で、 d_m は平均粒径(cm), σ_g は幾何標準偏差を示す。実験は河床を平坦に敷き均した後、図-2に示す流量波形のもとで通水し、流量変化に伴う河床波の変形過程を追跡した。実験中は平均河床勾配(1/400)および等流状態が保たれるよう上流端で給砂を、下流端でゲートの調整を行った。河床面および水面の縦断形は超音波式測深器とサーボ式水位計を載せた台車を往復させて測定するとともに、水路下流端からの流出砂を適時採取して流砂量を測定した。河床波の波長と波高は河床の縦断記録から zero-up-cross 法によって求めた。なお、本実験は lower regime 領域を対象としており、全粒径階の砂粒子に対して transition 領域に入らないように条件が設定されている。

4. 波長、波高、水深および流砂量の実験結果と予測結果 計算に当たっては流量を1分毎の step 状で近似し、この間の流量に対する平衡河床形状を流量、勾配および代表粒径を与えて式(1), (5)および(6)から求め、これをこの流量区間の収束値として式(1)~(4)によって10秒毎の河床形

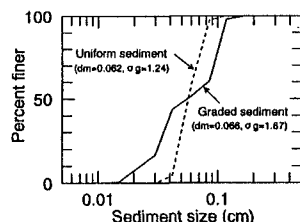


図-1 使用砂の粒度分布

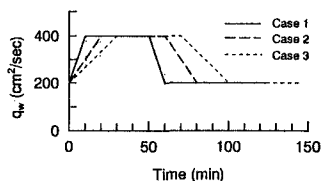


図-2 流量波形

混合砂, 河床波, 変形過程, 代表粒径, 抵抗予測

*〒625 京都府舞鶴市白屋 234 TEL 0773-62-5600 FAX 0773-62-5558

**〒525 滋賀県草津市野路町 1916 TEL 0775-66-1111 FAX 0775-61-2667

状、水深および流砂量（混合砂は粒径別）を求めた。なお、混合砂河床では平均粒径の2倍程度の粗砂が河床波のスケールに対して主要な役割を担っている⁷⁾が、減水期でも砂粒子が活発に移動している場合はこれを認め、流れ場における代表粒径 d_r は $2d_m$ とし、 $k_s = 2d_r$ とした。また、式(5)に対して d_r を用いると、図-3のように h/d の値が d_m を用いたときの半分となり、平衡波形勾配が適切に評価できる。式(3)の定数は増水期は $k_H = 0.36$ 、 $k_L = 0.24$ 、減水期は $k_H = 0.72$ ³⁾としたが、後述するように、減水期には波長の減少が見られたのでここでは便宜上増水期の $k_L = 0.24$ を用いた。

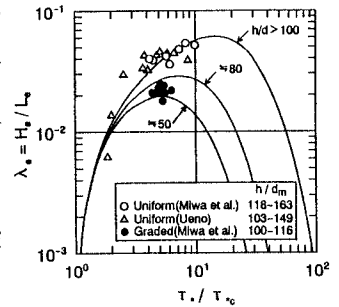


図-3 波形勾配の評価

図-4に波長、波高の変化過程の実験結果と計算結果を示す。波長に関しては一様砂と混合砂で実験値に顕著な差は認められず、両者とも同様の傾向を示していると見なせる。ただ、減水期では波長は漸減し、一定もしくは増加するとの従来の結果とは異なっている。一方、波高に関しては混合砂の場合は全通水区間を通じて一様砂よりも低く抑えられ、両者で顕著な差違が認められる。計算結果もこれを支持しており、粗砂の効果を考慮した代表粒径を用いることの有用性を示唆している。図-5に平均水深の時間的変化を、図-6に水路下流端流砂量の時間的変化を示す。流砂量の測定値はかなりばらついていますが、おおむね流量の増減に応じて変化している。計算結果もこの傾向を示しているが、減水期では精度が劣る。これは河床波の埋め戻し過程に対する平衡流砂量式の適用の可否の問題とも考えられ、再度検討を要する。図-7は波長-流量、波高-流量の関係を示したものである。これらは流量の増加→減少によってループを描くが、とくに波高に対しては混合砂の場合はループの幅が小さくなり、波高の抑制の影響が現れている。図-8は流量の変化速度に対する波長、波高の変化速度の平均値を示したものである。流量の変化速度が大きくなるにつれて大きくなるが、とくに、増水過程では波長に対しては混合砂の方が、波高に対しては一様砂の方が変化速度が大きいことがわかる。

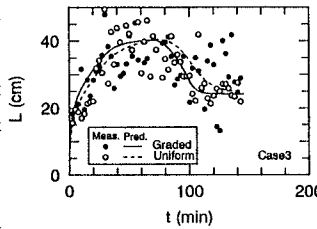


図-4 波長、波高の時間的変化

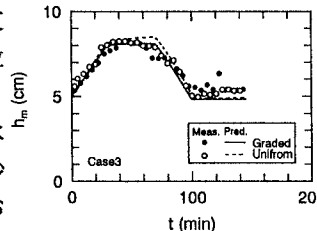
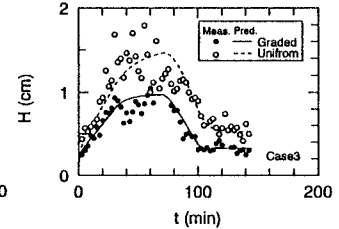


図-5 平均水深の時間的変化

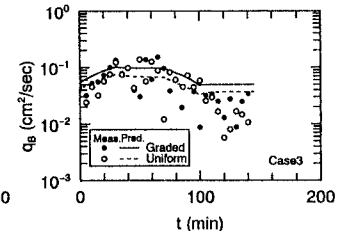


図-6 下流端流砂量の時間的変化

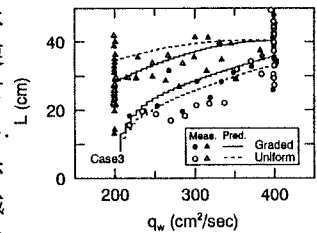


図-7 流量変化に対する波長、波高の応答

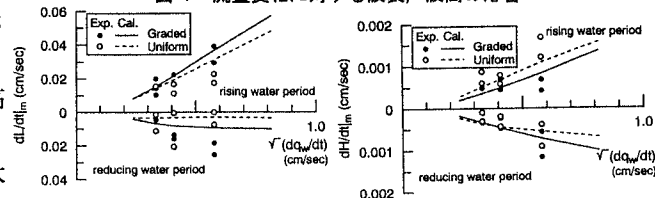
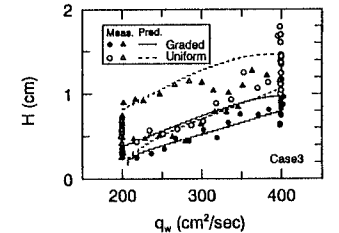


図-8 流量の変化速度に対する波長、波高の変化速度

5. あとがき 混合砂河床に対して代表粒径を用いることの有用性は示されたが、河床波の減衰過程に対しては未だ不十分な点も多い。今後より詳細に検討する予定である。最後に、本研究は平成8年文部省科学研究費奨励研究(A)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) 大同、三輪、矢野：第50回土木学会年講，1995。 2) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: *Proc. 2nd Congress of IAHR*, 1948. 3) 中川，辻本：第27回水理講演会論文集，1983。 4) 三輪，大同：水工学論文集，第36巻，1992。 5) Yalin M. S. and Karahan, E.: *Proc. ASCE*, Vol.105, 1979。 6) Yalin, M. S.: *Proc. ASCE*, Vol.90, 1964。 7) Miwa, H. and Daido, A.: *Jour. HHE*, Vol.10, 1992。