

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 大同淳之

1. まえがき 混合砂河床における河床波は同一の通水条件であってもそのスケールは一様砂河床とは異なったものとなり、これは流量変化に対する変形状にも影響を及ぼす。本文では混合砂と一様砂に対して正弦波状に変化する流量条件の下での河床波の応答性状と水深および流砂量の予測に関する検討を行っている。

2. 実験概要 実験は長さ 9m, 幅 0.2m のアクリル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を図-1 に示す。図中、 d_m は平均粒径 (cm), σ_g は幾何標準偏差である。実験は河床を平坦に敷き均した後、次式に示すような正弦波状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。

$$q_w = q_1 + q_2 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T_f} - \frac{1}{4} \right) \right] \quad (1)$$

ただし、 $q_1 = (q_{\max} + q_{\min})/2$, $q_2 = (q_{\max} - q_{\min})/2$ 。ここに、 $q_{\max}$, $q_{\min}$ は最大および最小流量で、それぞれ 400, 200 (cm²/sec) とした。また、 T_f は流量の変化周期で、20, 40, 60 分の 3 ケースとし、それぞれ 3 周期通水することとした。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に上流端で給砂を、下流端でゲートの調節を行った。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。

3. 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応答に比べ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抵抗則と流砂量式を適用して水深と流砂量の時間的変化を算定しても移動床系のバランスは保たれる。本文で用いる流れ場を記述するための基礎式は、次の抵抗則式¹⁾、流砂量式²⁾および河床波の波高、波長の変化速度式³⁾である。

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

$$q_{Bi}/p_i \sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d_i^3} = 8(\tau_{*i}' - \tau_{*ci})^{3/2}, q_B = \sum_{i=1}^k q_{Bi} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} dH/dt &= k_H / \{(1 - \rho_0) \cdot q_B / L \cdot (1 - H/H_e)\} \\ dL/dt &= k_L / \{(1 - \rho_0) \cdot q_B / H \cdot \{1 - (L - L_0)/(L_e - L_0)\}\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし、 $\Pi' = (B'/A)^2 C^{1/4}$, $A = 8.94$, $B' = (1 - \zeta/2)^{-1} \xi^{-1/8} (1 - n\lambda)^{3/8} (1 + \lambda^2)^{3/16}$, $C = A^2 \{0.26 + \lambda / (F_r \cdot B)^2\}$, $B = (1 - \zeta/2)^{-1} \{\xi(1 - n\lambda)\}^{-1/2}$, $C_D = \{4(1 - 4\lambda)(2 + \zeta)\} / \{(2 - \zeta)^2 \{2 + (1 - 8\lambda)\zeta\}\} \cdot [2(1 - 4\lambda)\zeta / \{2 + (1 - 8\lambda)\zeta\} + 0.13]$, $\Lambda = \lambda / (1 + \zeta/2)$, $\zeta = H/h_m$, $\xi = L/h_m$, $\lambda = H/L$, $n = L_s/H$ 。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_{*i}' 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_{*c} , H_e および L_e はそれぞれ次式から算定される^{1), 4), 5)}。

$$\tau_{*c}' = 4/7 \cdot \Pi' (h_m/k_s)^{-1/4} u_m' / \{(\sigma/\rho - 1) g d_m\} \quad (5)$$

$$\lambda_e = H_e/L_e = 0.0047(\tau_{*c}/\tau_{*c}') \exp \{1 - 0.0047/\lambda_{\max} \cdot (\tau_{*c}/\tau_{*c}') - 1\} \quad (6), \quad L_e = \alpha \cdot h_{me} \quad (7)$$

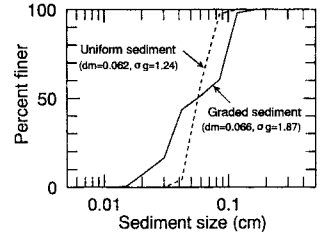


図-1 使用砂の粒度分布

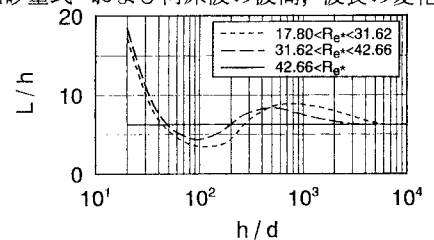


図-2 波長と水理量の関係

ここに、 $\lambda_{\max}$ は最大波形勾配で、 $\lambda_{\max} = -0.058 + 0.02 \ln(h_m/d_r)$ for $h_m/d_r < 400$, $\lambda_{\max} = 0.062$ for $h_m/d_r \geq 400$ で与えられる。 d_r は代表粒径、 h_m は平衡状態の平均水深、 α は Yalin による波長と水理量の関係図を再整理して得られた図-2 をもとに R_{*} と h/d の関数として与えられる。

4. 周期的流量変化に伴う河床波の応答とその予測 流れ場における代表粒径 d_r は既報⁶⁾で示したように、混合砂に対して $2d_m$ 、一様砂に対して d_m とし、等価砂粗度を $k_s = 2d_r$ で与えた。また、式(4)中の定数は増水期では $k_H = 0.36$, $k_L = 0.24$, 減水期では $k_H = 0.72$, $k_L = 0.24$ とした。計算に当たっては、ハイドログラフを刻み幅 Δt で step 状に近似し、この間の流量に対する平衡河床波形状を流量、勾配および粒径を与えて式(2), (6)および(7)から求め、これをこの流量区間の収束値として式(2)~(5)によって δt ごとの河床波形状、水深および流砂量（混合砂は粒径別）を求めた。なお、 $T_f = 20$ 分に関しては $\Delta t = 12$ 秒, $\delta t = 2$ 秒, $T_f = 40, 60$ 分に関しては $\Delta t = 60$ 秒, $\delta t = 10$ 秒とした。

図-3 に $T_f = 40$ 分の場合の波長および波高の変化過程の実験結果と計算結果を示す。波長に関しては混合砂と一様砂で顕著な差異は認められず、両者とも流量の増減に伴って同様の变化傾向を示している。計算結果もおおむね良好であると見なせる。ただ、減水期では波長は一定もしくは増加するという従来の結果とは合致していない。減水期の波長の通減は増水期で発達した残存河床波の埋め戻しと新たに発達した河床波の共存によるものであると推察される。一方、波高に関しては全通水期間を通じて混合砂の方が一様砂よりも小さく抑えられ、両者で顕著な差異が認められる。これは計算結果で2も示されているが、増水期における波高変化の部分で実験値との位相のずれがある。また、図-4 に平均水深の時間的変化を、図-5 に水路下流端流砂量の時間的変化を示す。水深については良好な結果が得られていると見なせる。一方、流砂量の測定

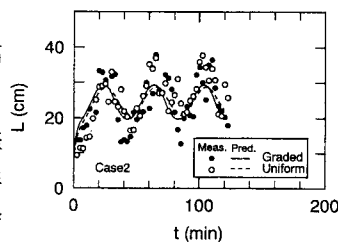


図-3 波長、波高の時間的変化

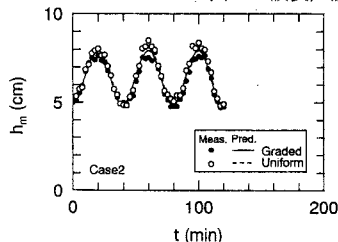


図-4 平均水深の時間的変化

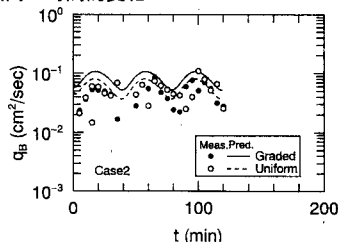


図-5 下流端流砂量の時間的変化

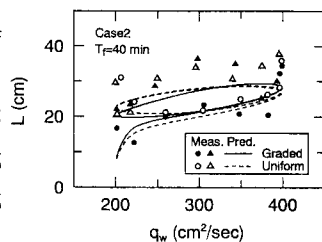
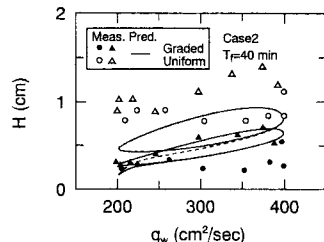


図-6 流量変化に対する波長および波高の応答（第3周期）



値はかなりばらついてはいるが、おおむね流量の増減に応じて変化しており、計算結果もこの傾向を支持している。ただ、非定常な場での式(3)のような平衡流砂量式の適用の可否については今後さらに検討する必要がある。図-6 は流量と波長および波高の関係を示したものである。ただし、実験値については第3周期のみを描点した。ここに形成されるループの幅は流量変化に対する応答遅れの程度を表すが、波長については混合砂と一様砂で顕著な差異はない。波高に関しては混合砂の方が実験値、計算値ともループの幅が若干小さくなっており、一様砂に比べて流量変化に追従しやすいことを示している。

5. あとがき 今後さらに広範囲な条件で実験を行ってデータを蓄積するとともに、流量変化に対する応答遅れの定量的評価法について検討する必要があると考えている。

参考文献 1)三輪, 大同, 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, 竹東: 第27回水理講演会論文集, 1983. 4)Yalin, M. S., Karahan, E.: Jour. Hydraulics Division, ASCE, Vol.105, 1979. 5)Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport, Pentagon Press, 1972. 6)三輪, 大同: 水工学論文集, 第42巻, 1998.