

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 移動床流れ場で起こる水理現象を合理的かつ体系的に評価することは非常に重要であるが、とくに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は一樣砂河床の場合とは異なったものになり、取り扱いを困難にしている。本文では混合砂河床での河床波に関する代表粒径を用いることによって波形勾配が適切に評価できることを示すとともに、波長、波高、水深および流砂量の予測を行う。

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。本研究は混合砂河床を対象としているが、比較のためほぼ同一の平均粒径を有する様に近い砂を用いた実験も行った。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、通水と給砂を開始して河床波を発達させ、適当な時間間隔でサーボ式水位計と超音波測深器を載せた台車を往復させて水位と河床位を測定するとともに、水路下流端において流出砂を適時採取して流砂量を測定した。波長と波高は測定された河床

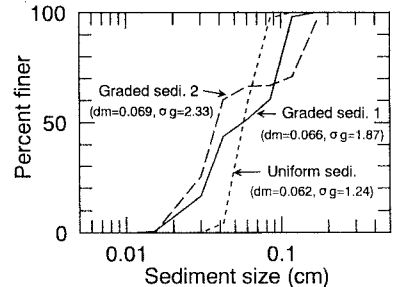


図-1 使用砂の粒度分布

表-1 実験条件

Run No.	sand	hm (cm)	hm/dm	le ($\times 10^{-3}$)	Fr	u* (cm/sec)	Re*	τ^*
U101	uniform	8.42	136	2.53	0.52	4.57	28.3	0.208
U102		8.41	136	2.36	0.53	4.41	27.3	0.194
M101	graded 1	7.68	116	2.57	0.60	4.40	29.0	0.181
M102		7.67	116	2.59	0.60	4.41	29.1	0.182
M201	graded 2	7.81	113	2.36	0.59	4.25	29.3	0.162
M202		7.53	109	2.61	0.62	4.39	30.3	0.173

の縦断記録から zero-up-cross 法によって求めた。表-1 に実験条件を示す。表中、 h_m は平均水深、 I_e は energy 勾配、 Fr は Froude 数、 u^* は摩擦速度、 Re^* は砂粒 Reynolds 数、 τ^* は無次元掃流力である。なお、本実験は lower regime 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. 河床波の発達性状と平衡波形勾配の評価 図-2、図-3 は平均波長と平均波高の時間的変化を示したもので、いずれも実験中の平均水深で基準化されている。データはかなりばらついてはいるが、波長に関しては U101 と M101 はほぼ同様の变化傾向を示し、平衡状態では平均水深の 4～6 倍程度で両者に顕著な差異は認められない。しかし、M201 では若干小さい値を示している。一方、波高は混合砂の場合は一樣砂に比べて短時間で一定に達し、その後増加せず、一樣砂よりもかなり小さく抑えられていることがわかる。このような混合砂と一樣砂における河床波形状の相違は、混合砂河床における河床波の発達過程では砂粒子の分級によって相対的に露出した粗砂が主要な役割を担い、河床波の幾何学的スケールを規定する代表粒径となっていることに起因している¹⁾。

図-4 は Yalin ら²⁾ による波形勾配の算定式を実験結果とともに示したものである。同図より、一樣砂の場合は Yalin らの式でほぼ適切に評価できるが、混合砂の場合は $h_m/d_m > 100$ にもかかわらず波形勾配は一樣砂よりも小さくなっており、 $h/d \approx 50$ の線より若干大きいところに分布している。これは平均粒径の代わりに先の代表粒径を用いる必要があることを示唆している。すなわち、著者ら¹⁾の示した平均粒径の 2 倍程度の粗砂

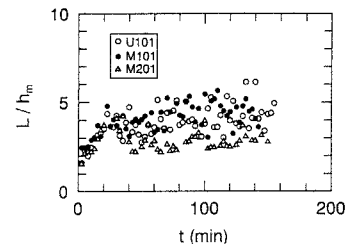


図-2 波長の時間的変化

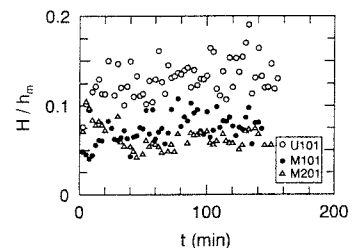


図-3 波高の時間的変化

を代表粒径として用いると h/d は約半分になり、図の結果を説明することができる。

4. 河床波の発達過程における河床形状と水深、流砂量の予測

混合砂河床においても代表粒径を用いることによって波形勾配が適切に評価できることが示されたので、この結果を用いて波長、波高、水深および流砂量の予測を行う。計算に用いる諸式は以下の抵抗則³⁾、波形勾配の式²⁾、波長の式⁴⁾、流砂量式⁵⁾および波長、波高の変化速度式⁶⁾である。

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

ただし、 $k_s = 2d_r$ (d_r は代表粒径)。

$$\lambda_e = H_e/L_e = 0.0047(\tau_*'/\tau_{*c} - 1) \exp\{1 - 0.0047/\lambda_{\max}(\tau_*'/\tau_{*c} - 1)\} \quad (2)$$

ここに、 $\lambda_{\max}$ は最大波形勾配で、 h_m/d_m の関数で与えられる。

$$L_e = \alpha \cdot h_{me} \quad (3)$$

式(3)中の 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-5をもとに R_{e*} と h/d の関数として与えられる。

$$q_{B*} = q_B / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_m^3} = 8(\tau_*' - \tau_{*c})^{3/2} \quad (4)$$

ここに、 τ_*' は無次元有効掃流力¹⁾である。

$$\left. \begin{aligned} dH/dt &= k_H / (1 - \rho_0) \cdot q_B / L \cdot (1 - H/H_e) \\ dL/dt &= k_L / (1 - \rho_0) \cdot q_B / H \cdot \{1 - (L - L_0)/(L_e - L_0)\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 $k_H = 4.5$ 、 $k_L = 3.0$ 、 $L_0 = 100 d_m$ 。

計算に当たっては平衡河床形状の推定に代表粒径 $d_r = 2d_m$ を考慮し、流量、勾配および粒径を与えた。図-6～図-9 はそれぞれ波長、波高、水深および流砂量の予測結果である。波長、波高については M201 の精度が劣るものの他の 2 ケースについては測定データの平均的な値を予測しており、妥当な結果であるといえる。水深に関してはいずれのケースも良好な結果が得られている。また、流砂量については測定精度の問題もあるが、若干大きく予測されており、とくに通水初期において誤差が大きくなっている。流砂量に関しては平衡流砂量式の適否も含め今後検討する必要がある。また、結果の良くなかった M201 の特性についても検討を要する。

5. あとがき 移動床流れ場を体系的に記述するために河床波の変形過程を対象として連続流量変化の下での流れ場の予測を行っている。これについては稿を改めて発表したい。最後に、本研究は平成 8 年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)の補助のもとに行われた。記して謝意を表す。

参考文献 1) Miwa, H. and Daido, A.: Jour. HHE, Vol.10, No.2, 1992. 2) Yalin, M. S. and Karahan, E.: Proc. ASCE, Vol.105, HY4, 1979. 3) 大同, 三輪, 矢野: 第 50 回土木学会年講, 1995. 4) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport, Pentagon Press, 1972. 5) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: Proc. 2nd Congress of IAHR, 1978. 6) 中川, 辻本: 第 27 回水理講演会論文

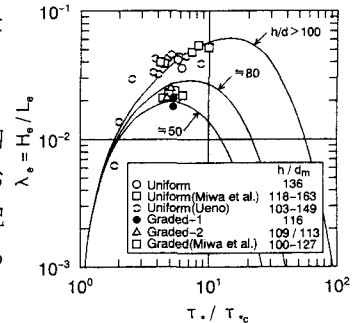


図-4 波形勾配の評価

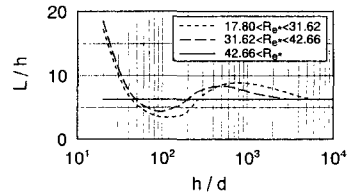


図-5 波長と水理量の関係

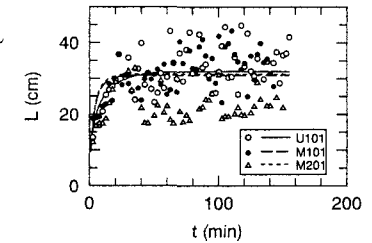


図-6 波長の時間的変化の予測

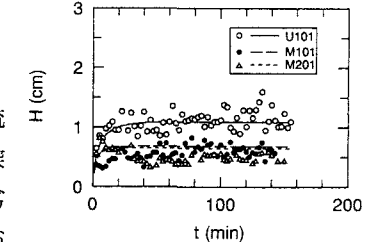


図-7 波高の時間的変化の予測

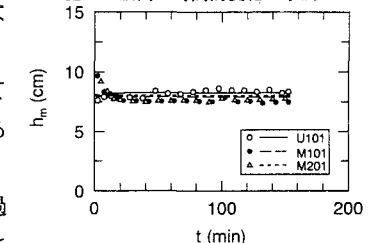


図-8 水深の時間的変化の予測

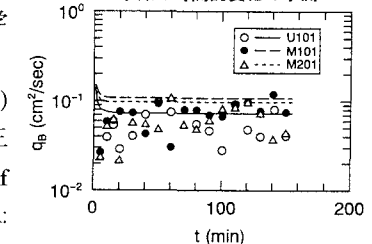


図-9 流砂量の時間的変化の予測