

円形水路の河床波について

京都大学 防災研究所 正員 村本嘉雄
京都大学 大学院 学生員 山崎 隆

円水路弯曲部における内岸の堆積と外岸の洗掘に対しては、二次流による横断河床形状以外に河床波の影響が大きいことが指摘されている¹⁾。本報告では、Engelund²⁾と同様な円形水路を用いて実験を行い、河床形態の形成条件、河床波の特性および河床変動の線形安定解析の適用性について検討した結果を述べる。

1 実験の概要：実験水路は幅(B)10 cm, 中心曲率半径(r_c)25 cmの亚克力製円形水路で上盤が回転(0~300 rpm)することによってCouette流を発生している。実験条件は表-1に示すように、粒径 $d = 0.1 \sim 1$ mmの4種の均一砂を用い、水深 h と回転速度 ω を変化させて砂の移動限界付近から河床波が消滅する状態までの実験を行った。この種の水路では掃流力の評価が難しいが、本実験では固定床滑面および粗面($d = 1$ mm)の環れでトルクメーターによる実測値と比較した結果、図-1に示すようにほぼ一致したので、表-1の摩擦速度 u_{*} , Re_{*} および τ_c の計算には次式を用いている。

$$\omega/u_* = 2.5 \ln 9u_*h/b + 2.5 \ln 30h/d \quad (1)$$

ここに、 r は曲率半径、 ν は動粘性係数である。

2 河床形態の形成条件：本実験で発生した河床形態は河床全面が移動する水理条件では、砂州河床(B)と平滑河床(F)とに大別できる。なお、移動限界付近および内岸まで河床波が発達しない状態をPMの記号で表してある。これらの河床形態の発生条件を $\tau_c \sim Re_{*}$ と $\tau_c \sim h/d$ の相関図上で検討した結果を図-2と図-3に示す。 $\tau_c \sim Re_{*}$ によって河床形態の存在範囲が明確に区別されており、 Re_{*} が減少すると砂州および平滑河床へ移行する限界が小さくなる傾向がみられる。一方で $\tau_c \sim h/d$ 図には、直線水路でのlower regimeとupper regimeの区分線が記入してあるが、 h/d の小さい領域で砂州がTransitionに入っている。しかし、円形水路では、たとBの要素が重要であるので、曲率の異なった水路で検討する必要がある。

3 河床波の特性：河床波は外岸付近で発生し、内岸へそのフロントを伝播させながら振幅が増大する。振幅の増大に伴って波数が減少して平衡状

Run	d	h	ω	u_*	Re_*	τ_c	
A-1	1.0	2.47	50.0	3.21	28.7	0.0635	B
A-2		2.50	72.0	3.89	31.9	0.0937	B
A-3		4.34	49.0	2.52	22.7	0.0394	PM
A-4		4.13	72.0	4.22	34.8	0.110	B
A-5		4.32	100.0	5.70	48.4	0.201	B
A-6		5.49	67.5	3.34	27.0	0.0691	B
A-7		5.49	85.0	4.16	33.7	0.107	B
A-8		5.09	170.0	8.12	59.1	0.408	F
A-9		5.12	54.0	2.75	20.1	0.0446	PM
B-1	0.5	2.24	68.0	3.59	14.5	0.159	B
B-2		4.06	55.0	2.74	11.3	0.0929	B
B-3		4.23	66.5	3.26	13.4	0.132	B
B-1	0.4	5.19	59.0	2.82	8.72	0.123	B
B-2		5.16	72.4	3.43	10.5	0.182	B
B-3		5.78	135.0	6.15	17.2	0.585	F
B-4		5.81	30.0	1.85	12.1	0.0530	PM
C-1	0.1	2.64	42.3	2.06	1.58	0.262	B
C-2		5.17	34.5	1.58	1.20	0.155	PM
C-3		5.05	58.2	2.60	2.03	0.418	B
C-4		5.00	80.4	3.54	2.69	0.776	F

表-1 実験条件
B: Bar, PM: Partial Moving, F: Flat bed

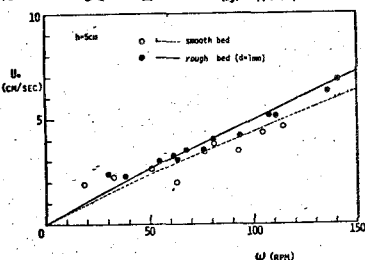


図-1 摩擦速度の検討

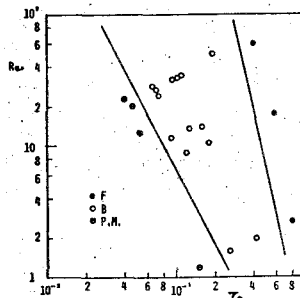


図-2 $\tau_c \sim Re_{*}$ による区分

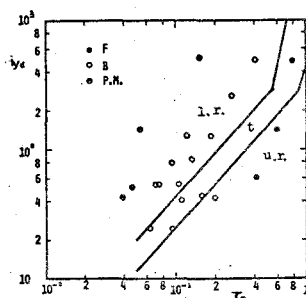


図-3 $\tau_c \sim h/d$ による区分

態にいたる。図-4は外岸における波数 n の時間的变化を示したものである。平衡状態にいたる時間は掃流力が大きいものほど早い傾向にある。図-5と図-6は最終時刻の平面形状と各波長の縦断形状を正規化して示したものである。河床波の縦断形状は下流面がやや急であるが、正弦波形に近い。図-5の斜線部分は円周方向に平均化した河床面より高い部分を示しており、平均水深 $h_0(r)$ を基準とすると、河床波の半径方向変化は小さく、円周方向に同位相の波に近いことがわかる。 $h_0(r)$ を各実験ケースについて求めると図-7のように直線に近似できるが、 $h_0 = Cr^p$, $p = D \tan \phi$ ($\tan \phi$: 砂の動摩擦係数, C, D : 定数) の $p = 1.38 \sim 3.75$, $D = 2.30 \sim 7.52$ であって、砂粒径および水深が小さいほど D が大きい傾向にあった。

表-2は河床波の代表量を示したもので、 L_B は $r=r_2$ での平均波長、 Z_B は最大波高、 Z_1, Z_2 は内岸、外岸での波高、 V_d は移動速度である。 $L_B/B = 2 \sim 4$, $Z_B/L_B = 0.1 \sim 0.3$, $Z_1/L_B = 1 \sim 3$, $V_d/V_{*c} = (1 \sim 3) \times 10^{-2}$ であって弯曲水路における砂州のそれらの値に近く、 T_* , R_{*c} による差違は顕著でなかった。また、河床波の縦断形状と移動速度から流量量 Q_B を求めた結果、流砂量則は直線水路のFlat Bedの式に近く、その半径方向分布 $Q_B \propto r^m$ の指数 $m = 2.70 \sim 3.95$ であった。

3 線形安定解析の適用性の検討 : Englund とほぼ同様の基礎式を用い、二次流および河床高の擾乱 $u_2(r)$, $h_0(r)$ に対しては境界条件を満足するつぎの関数形を仮定して代数式に帰着させた。

$u_2(r) = \hat{u}_0 \exp i\pi(r-r_1)/B$; $h_0(r) = \hat{h}_0 \exp i\pi(r-r_1)/B$ (2)
ここに、 $\hat{u}_0, \hat{h}_0$: 実数, r_1 : 内岸の半径である。安定条件には、 $r_1/B, r_2/h_0, U_{*c}/U, \tan \phi$ と上述の定数 p と m が含まれる。 $m=3, p=4$ として各実験条件で検討した結果、河床波が発生するケースでも安定となる場合があり、また、上述の河床波の特性を考慮して $h_0 = \hat{h}_0$ とした場合は全て不安定となった。一方、弯曲水路の砂州は(2)式の特性に近いので、 Q_B/h_0 を変化させて解析した結果、定性的には従来の実験結果に対応することがわかった。解析結果の詳細は講演時に述べる。本研究の一部は昭和51年度試験研究費の補助を受けたことを付記する。

1) 村本・吉村: 防災年報12B (1969)

2) Englund : J.F.M. 72-1 (1975)

3) 芦田・道上: 土木学会論文集206 (1972)

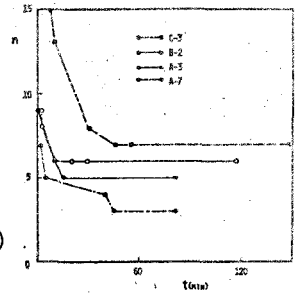


図-4 波数の時間変化

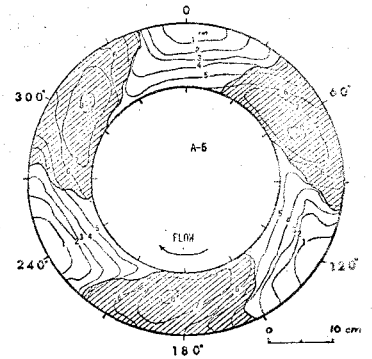


図-5 河床の平面形状

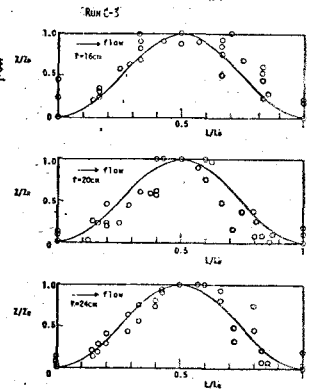


図-6 河床横断形状

Run	n	L_B	Z_B	V_d	Z_1	Z_2
A-1	4	31.4	5.02	1.81		
A-2	4	31.4	6.45		1.00	4.55
A-4	3	41.9	7.27			
A-5	3	41.9	7.39	3.25		
A-6	3	41.9	8.13	2.78	1.50	6.10
A-7	3	41.9	8.46	3.94	2.35	6.40
B-1	4	31.4	5.35			
B-2	6	20.9	5.83	3.94		
B-3	4	31.4	6.50	3.01		
B-1	6	20.9	1.65			
B-2	4	31.4	7.46	5.17	3.00	5.60
C-1	7	18.0	5.08	0.106		
C-2	6	20.9	5.90	0.717	1.00	3.35

表-2 河床波の特性量

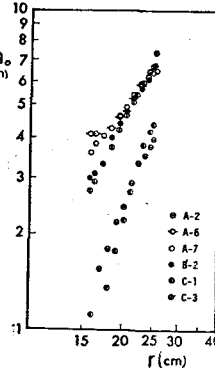


図-7 $h_0(r)$ の比較