

II-114

管水路における河床波の発生機構に関する実験的研究

大 阪 府 正 員○岡野一郎
神戸大学大学院 学生員 石原 茂
神戸大学工学部 正 員 筧 源亮

1) はじめに 本研究は、水平水路における河床波の発生機構に関し、粒径と比重の異なる河床材料を用いて実験を行い、安定理論との適合性を調べ、考察を行った。

2) 安定理論¹⁾ 河床に接する流れの垂直分布は、河床中の速度勾配を考えると図1のように表せる。図中の各流速の関係は、まず最も簡単な流れの状態について考察することとし、流れは等流速の状態にあると考え、次の様になるものとする。

$$U_0 = U_b / 2, U_b = U_m / 4$$

これに外部より微小変動を与えるものとする、粒子群の容積比、流体部流速、粒子群速度は

$$e_s = e_0 + e' (x, y, z, t)$$

$$q_f = Q_f + q_f' (x, y, z, t)$$

$$Q_f = U_0 = \text{const.}$$

$$q_f = q_s' (x, y, z, t)$$

ただし添字 f は流体, s は固体粒子群を表す。

また、 e_0 , U_0 は等流状態における値であり、 e' , q_f' , q_s' は外部より与えられた微小変動にもとづく変動値である。ここでは、粒子群の変化を調べるために、粒子容積比 e' の変動特性を求める。以下に e' に関する式を示す。¹⁾

$$C_1 \frac{\partial^2 e'}{\partial t^2} + C_2 \frac{\partial^2 e'}{\partial t \partial x} + C_3 \frac{\partial^2 e'}{\partial x^2} + C_4 \frac{\partial e'}{\partial t} + C_5 \frac{\partial e'}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここで係数 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 は以下のようになる。

$$C_1 = (\sigma - 1) e_0^2 - (2\sigma - 1) e_0 + \{ \alpha_2(e_0) + \sigma \}$$

$$C_2 = 2U_0 e_0^2 + 2U_0 \{ \alpha_2(e_0) + 1 \} e_0$$

$$C_3 = -U_0^2 e_0^2 + U_0^2 \{ \alpha_2(e_0) + 1 \} e_0$$

$$C_4 = \alpha_1(e_0)$$

$$C_5 = \beta(e_0)g(\sigma - 1) e_0^2 + \{ \alpha_1(e_0)U_0 - \beta(e_0)(\sigma - 1)g \} e_0$$

ただし、 $\sigma = \rho_s / \rho_f$, $\alpha_1(e_0) = 18\nu / d^2$, $\beta(e_0)$: 摩擦係数, d : 粒径, g : 重力加速度であり、粒子群容積比変動量 e' に関する(1)式では、粒子群の抵抗係数 $\alpha_1(e_0)$ と見掛け上の質量に働く圧力係数 $\alpha_2(e_0)$ は、等流状態における容積比 e_0 の関数であるけれども、ここではこれらの値は単一粒子の場合の値と同一と考える。従って、係数 $C_1 \sim C_5$ は定数であり、(1)式は線形方程式となる。

(1)式の解は、

$$e' = \phi \exp(ikx + \delta t) \quad \delta = \delta_r + i\delta_i \quad (2)$$

と考えられる。この解は波動を示し、 ϕ は擾乱波の振幅、 k は波数である。 δ_r は ϕ に掛かる増幅率である。ここで、(2)式を(1)式に代入し解くと、次に示す δ の解が得られる。

$$\delta = [-(C_4 + iC_2) \pm \sqrt{C_4^2 + (4C_1C_3 - C_2^2)k^2 + i(2C_2C_4 - 4C_1C_5)k}] / (2C_1) \quad (3)$$

ここで、本研究の実験で用いた諸元、(1)式の係数ならびに(3)式における実部と虚部を比較したものを表1に示す。これより、実部 > 虚部 ($k < 1$) が成立することから、以下に示すように増幅率は波数の2乗に比例する。

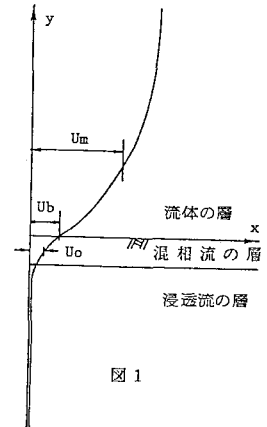


図 1

$$\delta = \delta_r = [-C_4 + \sqrt{\{C_4^2 + (4C_1C_3 - C_2^2)k^2\}}] / (2C_1)$$

$$\delta = C/\lambda^2, C = (4C_1C_3 - C_2^2)\pi^2 / (C_1C_4) \quad \lambda: \text{波長}$$

3) 実験 本研究で用いた河床材料は表1に示す通りである。

RUN1～3は砂粒子、RUN4はポリスチロール粒子である。河床波の測定には、回転抵抗器（水平方向）と Position Sensing Detector（鉛直方向）を用い、X-Yレコーダーに定時間ごとの河床波の形状を記録した。

4) 限界掃流速付近の場合の河床波発生実験 比重2.65の砂粒子の実験値と理論値の適合性を検討したものを図2～4に示す。

各図より、粒径が小さくなるにつれて、実験値の理論値への適合性は悪くなる。また比重1.04のポリスチロール粒子について検討したものを図5に示す。比重が1に非常に近い粒子の場合は全体的に見ると、比重2.65の砂粒子の場合と比べて、波長が大きい値となり、またその時、波高の増幅率の値は小さい値をとる傾向が見られ、適合性は良好である。

5) 流速が限界掃流速より大きい場合の河床波発生実験

各ケースにおける実験値と理論値の適合性を検討したものを図6～9に示す。各図より流速が増すと各ケースとも波高の増幅率の変動が大きくなり、その値も理論曲線より右側に位置をとる傾向がみられる。しかし、全体的には適合性は限界掃流速時の実験と比較すれば理論値への適合性は良くない。ポリスチロール粒子の適合性は砂粒子と比較すると悪い。これは、界面活性剤の使用が十分でなかったため粒子間の付着が影響しているものと思われる。

6) 考察 粒径が小さくなるにつれて実験値と理論値の適合性が悪くなるのは、① 粒径の評価に誤差があったことと、② 粒子の付着物の影響、が考えられるが、この理由を明かにすることは今後の研究課題と考える。

(k<1)

表 1

	RUN1		RUN2	
σ	2.65		2.65	
$d(\text{cm})$	0.018		0.025	
	U_{min}	U_{max}	U_{min}	U_{max}
cm/sec	1.691	1.933	1.651	1.967
C_1	1.694	1.694	1.694	1.694
C_2	2.570	2.983	2.510	2.990
C_3	1.258	1.644	1.199	1.702
C_4	556.556	555.556	288.000	288.000
C_5	-12.302	41.476	-197.885	-161.482
C_4^2	3×10^6	3×10^6	8×10^4	8×10^4
$2C_3C_4$	3×10^3	3×10^3	3×10^3	3×10^3
$-4C_1C_5$	3×10^3	3×10^3	3×10^3	3×10^3

	RUN3		RUN4	
σ	2.65		1.04	
$d(\text{cm})$	0.030		0.080	
	U_{min}	U_{max}	U_{min}	U_{max}
cm/sec	1.682	2.051	0.410	0.661
C_1	1.694	1.694	1.694	1.694
C_2	2.557	3.118	0.623	1.005
C_3	1.245	1.851	0.074	0.192
C_4	200.000	200.000	28.125	28.125
C_5	-253.520	-224.000	-4.796	-1.872
C_4^2	4×10^4	4×10^4	7×10^2	7×10^2
$2C_3C_4$	3×10	3×10^3	10^2	10^2
$-4C_1C_5$	3×10	3×10^3	10^2	10^2

[$\epsilon_s=0.4, \alpha_s(\epsilon_s)=0.5, \beta(\epsilon_s)=1.0$]

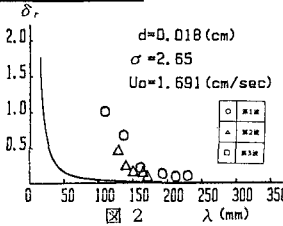


図 2

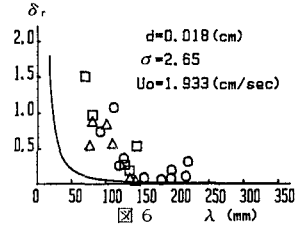


図 6

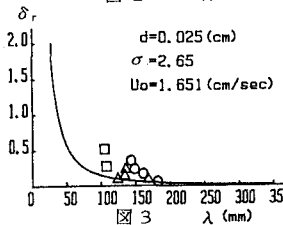


図 3

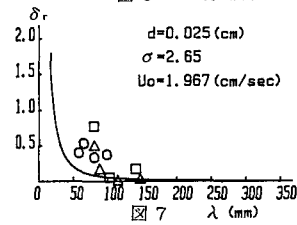


図 7

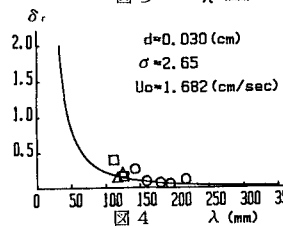


図 4

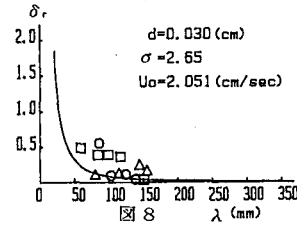


図 8

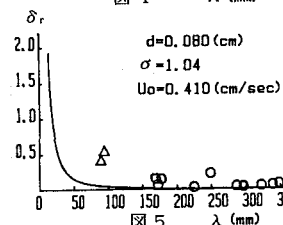


図 5

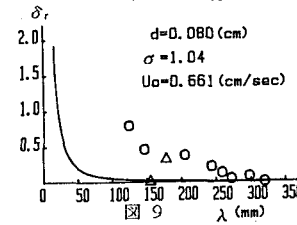


図 9

《参考文献》1) M. Yano, T. Matsuda: BEDFORM STABILITY IN THE NONUNIFORM FLOW, IAHR, Cong, 1987.