

波状河床を伴う漸拡・漸縮水路の流れの1次元解析

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎  
 金沢大学大学院 学生員 ○細川 迭男  
 金沢大学工学部 学生員 斉藤 彰  
 長野県庁 中島 俊一

1, まえがき

境界面特性(形状を含む)は流れの性状及び砂粒運動に大きな影響を及ぼす。本研究ではこうした影響の出現機構を明らかにするため、先ず図-1に示すような波状河床を伴い幅が漸拡・漸縮を繰り返す(幅及び河床がともに正弦波状に変化する)流路(側壁固定・固定床)における、特に流れの特性に関する基礎的研究を行った。現実の河川でもこのような漸拡・漸縮の連続が見られるし、また、近年の段階的河道掘削が進められる中で、このような流路状況が見られ本論文の考え方が実用的にも有意義なものと考えられる。ここでは、先ずその本質的特徴を浮き出させるため、線形解析を行い、さらに数値計算に基づく非線形解析及び実験値との比較・検討を行った。

2, 流れの性状

境界形状が変化する場における流れの性状を記述する近似的なかつ一般的によく用いられる方法は一次元解析で次式の水面形方程式が基礎式とされる。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_b - dz/dx + Fr^2(\alpha(h/B)(\partial B/\partial x) - (1/\varphi^2)\psi_R)}{1 - \alpha Fr^2} \quad \text{-----}(1)$$

ここに、 $i_b$ : 路床勾配,  $Fr^2 = Q^2/gB^2h^3$ ,  $Q$ : 流量,  $h$ : 水深,  $B$ : 流路幅,  $\varphi = U/u_*$ ,  $U$ : 断面平均流速,  $u_*$ : 摩擦速度,  $\psi_R = R/h$ ,  $R$ : 径深,  $\alpha$ : エネルギー係数である。流れの一次元解析の場合エネルギー係数の評価が重要と思われるが、流れの構造(流速分布)自体に不明の点も多く、ここでは、 $\alpha = 1$ と仮定する。

図-1のような幅及び河床が変化する流路における流れの特性、すなわち、水面の振幅( $\eta_0$ )とその位相差( $\phi_H$ )の水理量に対する変化の本質的な特徴を抽出するため、上式(1)を線形近似することを試みる。このとき、図-1に示すような漸拡・漸縮流路の幅  $B(x)$ 、正弦波状に変化する河床高  $z(x)$ 、水深  $h$  は次のように表される。

$$B(x) = B_0 + b \sin(\kappa x) \quad \kappa = 2\pi/L \quad \text{-----}(2)$$

$$z(x) = a \sin(\kappa x - \varphi_Z) \quad \text{-----}(3)$$

$$h = h_0(1 + \eta_0 \sin(\kappa x - \phi_H)) \quad \text{-----}(4)$$

但し、記号は図-1に準拠する。

$a\kappa$ ,  $b\kappa$ が十分小さく、線形近似が可能であるとき、式(2)~式(4)を用いて、式(1)中の各項を線形化して水面の振幅 $\eta_0$ 及び位相差 $\phi_H$ について解くと次式が得られる。

$$\eta_0 = \sqrt{(G^2 + E^2)/(A^2 + F^2)} \quad \text{-----}(5)$$

$$\phi_H = \arctan \sqrt{(EA - GF)/(EF + GA)} \quad \text{-----}(6)$$

ここに、  $A = (1 - \alpha Fr_0^2) K_*$  -----(7)

$$E = -A_* K_* \sin \varphi_Z + 2\alpha Fr_0^2(1 + 2H_*)(1 + (H_*/(1 + 2H_*)))B_*/\varphi_0^2 \quad \text{-----}(8)$$

$$G = -A_* K_* \cos \varphi_Z + \alpha Fr_0^2 B_* K_* \quad \text{-----}(9)$$

$$F = 2\alpha Fr_0^2(1 + 2H_*)((H_*/(1 + 2H_*)) - 10/6)/\varphi_0^2 \quad \text{-----}(10)$$

但し、 $A_* = a/h_0$   $H_* = h_0/B_0$   $K_* = \kappa h_0$   $B_* = b/B_0$  である。

図-2～図-3はある流路条件が与えられた時のフルード数に対する $\phi_H$ 、 $\eta_0$ との変化を图示したもので、 $A_*$ をパラメータとしている。図-2の $\phi_z = 0$ の場合、 $A_*$ 、 $B_*$ とも0.1の時、お互いに打ち消しあって水面の振幅がフルード数に関係なくほとんど0に近くなることが特徴として挙げられる。また、図-3は $\phi_z = \pi/2$ の場合であるが、先ほどの $A_*$ 、 $B_*$ 共に0.1の場合でも $\phi_z$ が先ほどの0でなければ、水面の振幅は0にはならない。但し、計算においては $\phi_0 = 18$  (const) としている。

一方、図-4は $h_0 = 4$ cm,  $B_0 = 19$ cm,  $b = 4$ cm,  $a = 0.02$ cm,  $L = 40$ cmとして $Fr_0 = 0.5, 0.8$ について式(5)、式(6)にもとづく線形解析結果と下流端に $B = B_0$ での等流水深 $h_0$ を与えて、非線形を無視することなく式(1)を直線数値積分して得られた平衡区間での水面形とを比較したもので $Fr_0 = 0.5$ 程度ではよく一致するが、 $Fr_0 = 0.8$ 以上の流れになると、水面の位相差 $\phi_H$ には、両者の間に大きな差はないが、振幅 $\eta_0$ はかなりの差が見られるようになる。

3. 実験的検討

2. で述べた水面形方程式の線形近似及び直接的な数値計算による解の適用性検討のため、幅40cm、長さ12mの可変勾配一様矩形断面水路中に連続した漸拡・漸縮流路模型( $B_0$ ; 19cm,  $b$ ; 4cm  $L$ ; 40cm)を作成し、河床も正弦波状に変化させて、水面形を計測し、図-5に示されるように、本実験の水理量の範囲では理論の妥当性が確認された。

4. あとがき

河床及び幅がともに正弦波状に変化する流れの特性を、流れの次元解析の手法にもとづく水面形方程式を線形近似によって解を求めることにより明らかにした。今後は、流れの内部構造を明らかにするとともに本研究で得られた知見との関係を明らかにする予定である。

表-1 条件表

case	$A_*$	$B_*$	$\phi_0$	$\phi_z$	$l_0/1000$	$Fr$
a	0	0.10	1.00	0.10	0	---
b	0.05	0.10	1.00	0.10	0	---
c	0.1	0.10	1.00	0.10	0	---
d	0.05	0.10	1.00	0.10	30	---
e	0.1	0.10	1.00	0.10	30	---
f	0.05	0.21	0.53	0.21	0	1.78
g	0.05	0.21	0.53	0.21	0	4.55
h	0.16	0.21	1.00	0.34	0	1.00

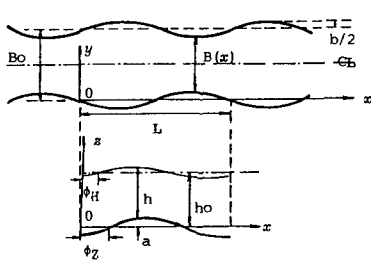


図-1 漸拡・漸縮流路模型図

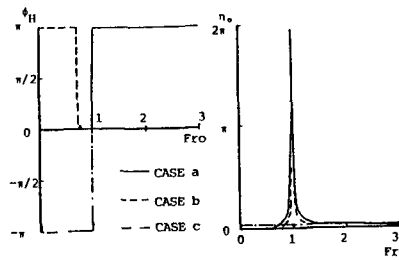


図-2 Fr数に対する水面の振幅と位相差の変化 ( $\phi_z = 0$ )

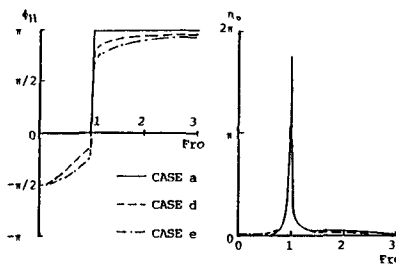


図-3 Fr数に対する水面の振幅と位相差の変化 ( $\phi_z = \pi/2$ )

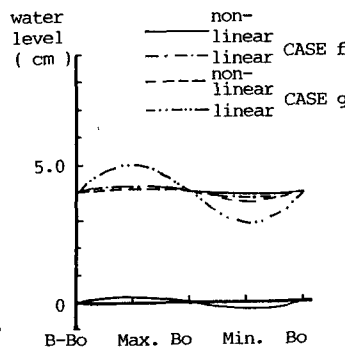


図-4 線形近似と非線形計算の比較

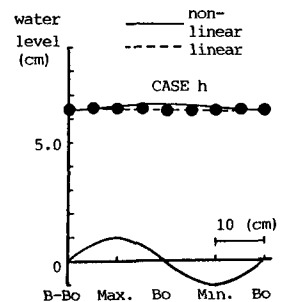


図-5 波状河床上の平均水深 (実験値と比較)