

台形断面開水路流れの三次元乱流構造解析

宇都宮大学大学院 学生員 亀澤正之
 宇都宮大学工学部 正員 杉山 均
 宇都宮大学工学部 秋山光庸

1. 緒言

開水路流れは自由水面を有するため、閉管路とはその乱流構造を大きく異にする。また、開水路の断面形状によってもその構造に変化が現れることが知られている。すなわち、流路アスペクト比（河川幅／水深）が小さい長方形断面開水路では、最大主流方向速度位置の自由水面下への降下現象が認められるが、台形断面開水路ではこの降下現象は認められず、縦渦も長方形断面の場合と全く逆向きの流れが傾斜壁近傍に認められる。そこでこの台形断面開水路を対象にレイノルズ応力モデル、境界適合座標系を用いて三次元乱流場として数値解析を行い、実験値と比較することによってモデルの妥当性、台形断面開水路内の乱流場における流動特性について検討を加えることを目的とする。

2. 解析手法

2.1 計算対象実験： 数値解析の対象とした富永・江崎・福津¹⁾の実験装置の概略図、及び座標軸をFig.1に示す。測定流路は、短辺 $B=24.8(\text{cm})$ 、水深 $h=11.0(\text{cm})$ 、傾斜角 60° の台形断面をもつ、全長 $12.5(\text{m})$ の流路である。 Re 数は混合平均速度 U_m 、代表長さとして径深 R の4倍を用いて $Re=6.84 \times 10^4$ である。測定断面位置は上流端から $7.5(\text{m})$ 下流に設置されている。

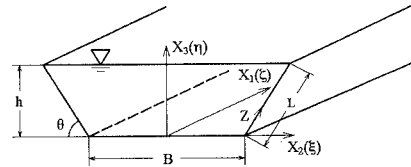


Fig.1 供試空間及び座標系

2.2 乱流モデル： 対流項、拡散項に Rodi²⁾ 近似を用い、代数応力モデルにより解析を行った。モデル化の際問題となる圧力-歪み相関項については、Launder-Reece-Rodi³⁾ により提唱されたモデルをもとに、その制約条件の一部に改良を加えた著者らの提示モデル⁴⁾ を使用した (Table 1, 2)。表中 $f(L/X_w)$ は壁面の影響を示す関数 $f(L/X_w) = (C_\mu^{3/4} k^{3/2}) / (\kappa \varepsilon) \cdot (1/X_w)$ である。ただし、 $1/X_w = \sum (1/X_{wi})^2 / \sum (1/X_{wi})$ (X_{wi} は壁からの垂直距離)。

2.3 数値解析： 計算領域はFig.1に示す領域の全断面を対象とし、計算に際しては境界適合座標系を用い支配方程式の変換を行った。計算格子は断面内で 43×21 、主流方向に54断面設置した。

2.4 自由水面境界条件： 開水路流れの数値解析において問題となる境界条件は、以下のことに留意して設定した。自由水面に垂直方向の速度変動の減衰に関して、本モデルでは壁面による影響を定数系に考慮していることから (Table 1)、自由水面においても同じ定数系を使用した。また、垂直方向速度変動値が自由水面に到達する以前に減衰傾向を示し、自由水面下で非常に小さな値を取る現象を、計算では垂直方向速度変動値を自由水面から計算第一点目で零とすることで近似した。乱流散逸については、自由水面も一種の壁面と考えられること、水深がテップ状に変化しても乱流散逸が不連続値をとらないようにすることなどを考慮し、一次近似として一般に壁関数として使用される次式を用いた。

Table 1 ORIGINALモデルにおける再配分項のモデル化

$\pi_{ij,1} + \pi_{ji,1}$	$-c_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(u_i u_j - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$
$\pi_{ij,3} + \pi_{ji,3}$	$-\frac{c_3 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_i \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{8c_3 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_i \delta_{ij} \right)$
$[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_w$	$c_1 = c_1' + c_1' \cdot f \left(\frac{L}{X_w} \right), \quad c_3 = c_3' + c_3' \cdot f \left(\frac{L}{X_w} \right)$ $\zeta = \zeta' + \zeta' \cdot f \left(\frac{L}{X_w} \right)$

$$P_{ij} = -u_i u_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - u_j u_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j},$$

$$D_{ij} = -u_i u_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - u_j u_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad P_i = -u_i u_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i}$$

Table 2 ORIGINALモデルでの経験定数

c_1'	c_3'	ζ'	c_1'	c_3'	ζ'
1.40	0.44	-0.16	-0.35	0.12	-0.10

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y} \dots (1)$$

ただし、乱流散逸値は壁関数を使用する場合と同様、自由水面から計算第一点目までの距離を示している。

3. 結果と考察

3.1 主流方向速度分布： Fig.2 は主流方向速度の実験値との比較図で、各等値線は流路断面最大速度 U_{1max} で無次元化した。両結果に特徴的な現象として、左右対称軸に沿う等値線が自由水面に向かって凸状に湾曲した分布を示すこと、長方形断面開水路にみられた最大主流方向速度位置が水面下に現れる現象 (velocity-dip) は認められないことなどが指摘できる。

3.2 第二種二次流れベクトル分布： Fig.3 に両結果を示す。実験結果における図中 A、B、C の記号及び渦パターンは、富永らにより示されたものである。長方形断面管路の縦渦⁵⁾と比較すると、台形断面開水路においては縦渦構造は異なり、台形断面特有の B 渦が生成される。しかもその流れは傾斜壁に向かい台形断面開水路を特徴づけていることがわかる。計算結果は、こうした特徴的な渦を比較的良好に予測しており、解析手法の妥当性を示しているものと思われる。

3.3 壁面せん断応力分布： Fig.4 に壁面せん断応力分布の比較図を示す。各壁面せん断応力値は平均せん断応力 $\bar{\tau}$ にて無次元化した。また、Z は左右対称軸位置を原点に河床、傾斜壁に沿う座標を示す。実験結果は $Z=0$ 位置から単調に増加しピーク値をとった後減少し、コーナ部を挟んで再度増加傾向を示す。その後減少し、再度僅かな増加を示した後減少するといった分布を示すが、計算結果も値に多少の差は認められるものの同様な傾向を示した。

3.4 せん断応力分布 $\overline{u_1 u_3}$ ： Fig.5 にせん断応力分布の両結果の比較を示す。せん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ は平均摩擦速度 $\bar{u}$ で無次元化した。両結果より、せん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ は河床壁面から自由水面に向かって発達する様子がうかがえる。また実験結果より、傾斜壁面沿いの自由水面近傍にて比較的值の高いこと、河床壁近傍にて最大値をとることなどが認められるが、計算結果も同様な傾向を予測している。

4. 結論

台形断面を有する開水路について三次元開水路として数値解析を行い、実験結果と比較検討した。その結果、主流方向速度等値線分布、壁面せん断応力分布、レイノルズ応力等を比較的良好に予測することができ、本解析手法の妥当性、自由水面境界条件の妥当性を確認した。

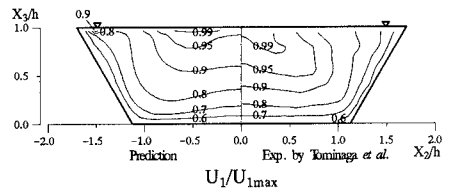


Fig.2 主流方向等値線の比較

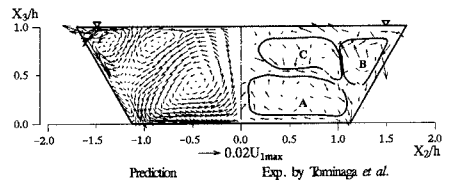


Fig.3 二次流れベクトル線図の比較

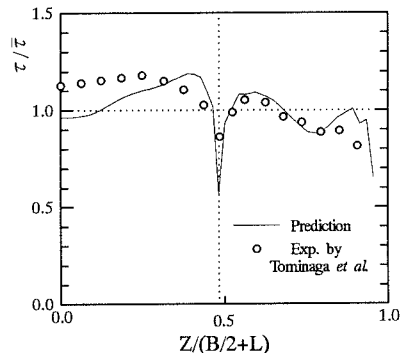


Fig.4 壁面せん断応力分布の比較

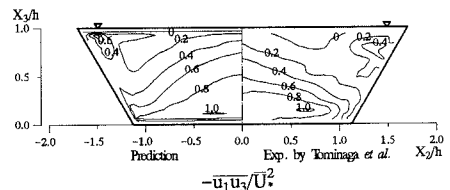


Fig.5 せん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ 分布の比較

参考文献 1) 富永晃宏・江崎一博・楠津家久：台形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究，土木学会論文集，第381号，pp.55～63,1987. 2) Rodi, W.: Z. Angew. Math. Mech. 56, pp. T219～T221, 1976. 3) Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W.: J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 537～566, 1975. 4) 杉山均・秋山光庸・芹沢寿行：日本機械学会論文集，56-531, pp. 3328～3335, 1990. 5) 楠津家久・中川博次，開水路流れの三次元乱流構造（縦渦）とそれに及ぼす自由水面の影響に関する研究，京都大学防災研究所年報，28, pp. 499～522, 1985.