平成14年12月18日

粗面河床の曲がり開水路乱流構造への 影響に関する数値解析

Numerical Analysis of Developing Turbulent Flow in Curved Open Channel with Roughened Beds

杉山 均 (宇都宮大学大学院工学研究科) ○杉山 真悟(宇都宮大学大学院工学研究科) Hitoshi SUGIYAMA Shingo SUGIYAMA Energy and Environmental Science, Utsunomiya Univ.

目的

- (1) 滑面壁を有する曲がり開水路流れにおける冨永らの実験 (1998)を対象に数値解析を行い、実験結果と比較して解析 手法・乱流モデルの妥当性を検証する。
- (2) 流路に粗面壁の条件を与え、二次流れ分布や主流方向速度など主に速度場の状態から粗面壁の流れ場に及ぼす影響を検証する。



レイノルズ数

$$\operatorname{Re} = \frac{U_b h}{v} = 41900$$



支配方程式

運動方程式

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left(v \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$

レイノルズ応力輸送方程式

$$\frac{D\overline{u_{i}u_{j}}}{Dt} = -\left(\overline{u_{i}u_{j}}\frac{\partial U_{j}}{\partial X_{k}} + \overline{u_{j}u_{k}}\frac{\partial U_{i}}{\partial X_{k}}\right) - \frac{\partial}{\partial X_{k}}\left[\overline{u_{i}u_{j}u_{k}} - \nu\frac{\partial\overline{u_{i}u_{j}}}{\partial X_{k}} + \frac{\overline{p}\left(\delta_{jk}u_{i} + \delta_{ik}u_{j}\right)}{\rho\left(\delta_{jk}u_{i} + \delta_{ik}u_{j}\right)}\right] + \frac{p}{\rho}\left(\frac{\partial u_{i}}{\partial X_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial X_{k}}\right) - 2\nu\frac{\partial u_{i}}{\partial X_{k}}\frac{\partial u_{j}}{\partial X_{k}}$$

モデル化したレイノルズ応力輸送方程式

$$\frac{u_i u_j}{k} \left(P_k - \varepsilon \right) = P_{ij} + \left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right] + \left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_2 - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon$$

$$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_1 = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$$

$$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_2 = -\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) - \zeta \cdot k \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{8C_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$$



 $\xi \times \eta = 41 \times 17$

計算格子







主流方向速度等值線図 U_1/U_b





主流方向速度ベクトル線図



壁面せん断応力等値線図 τ/τ₀

乱流特性量の境界条件





主流方向速度等值領域図 U_1/U_b





断面内平均二次流れ強度 Is



結論

- (1)本解析手法は主流方向速度、二次流れ分布および壁面 せん断応力など実験結果の傾向を良好に再現した。
- (2) 主流方向速度はRiverbed、Bank、Riverbed+Bankの
 3パターンの内、Riverbed+Bankの値が最も大きい。
- (3) 二次流れ強度はRiverbed、Bank、Riverbed+Bankの 3パターンの内、曲がり部ではRiverbedの値が、直線部 ではBankの値が最も大きくなる。これは断面内の乱れの 非等方性に起因する。
- (4)本解析手法は粗面壁を有する曲がり開水路流れの水理 特性を解析することが可能であることを示した。

再配分項のモデル化

$$\begin{split} \left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_{1} & -C_{1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_{i}u_{j}} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \right) \\ \left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_{2} & -\frac{C_{2} + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3}P_{k}\delta_{ij} \right) - \zeta \cdot k \left(\frac{\partial U_{i}}{\partial X_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial X_{i}} \right) - \frac{8C_{2} - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3}P_{k}\delta_{ij} \right) \\ C_{1} = C_{1}^{*} + C_{1}^{\prime} \cdot f \left(\frac{L}{x_{w}} \right) & C_{2} = C_{2}^{*} + C_{2}^{\prime} \cdot f \left(\frac{L}{x_{w}} \right) & \zeta_{1} = \zeta_{1}^{*} + \zeta_{1}^{\prime} \cdot f \left(\frac{L}{x_{w}} \right) \\ P_{ij} = -\overline{u_{i}u_{k}} \frac{\partial U_{j}}{\partial X_{k}} - \overline{u_{j}u_{k}} \frac{\partial U_{i}}{\partial X_{k}} & D_{ij} = -\overline{u_{i}u_{k}} \frac{\partial U_{k}}{\partial X_{j}} - \overline{u_{j}u_{k}} \frac{\partial U_{k}}{\partial X_{i}} \\ P_{k} = -\overline{u_{k}u_{l}} \frac{\partial U_{k}}{\partial X_{l}} & f \left(\frac{L}{x_{w}} \right) = \frac{C_{\mu}^{3/4}}{\kappa} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \frac{1}{x_{w}} \end{split}$$

C_1^*	C_2^*	5*	C'_1	C'_2	5'
1.40	0.44	0.16	-0.35	0.12	0.10

境界適合座標系

直交座標系における運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$
$$-\overline{u_i u_j} = \left(\frac{b}{a} \right)_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \left(\frac{c}{a} \right)_{ij}$$

変換直前の運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left(d_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - e_{ij} \right)$$
$$d_{ij} = \nu + \left(\frac{b}{a}\right)_{ij} \qquad e_{ij} = \left(\frac{c}{a}\right)_{ij}$$

座標変換公式

$$\frac{\partial}{\partial X_{i}} = \frac{\partial \xi}{\partial X_{i}} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial X_{i}} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial X_{i}} \frac{\partial}{\partial \zeta}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{\partial U_{i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{1}{J} \left(\mathbf{U}U_{i} + \frac{P}{\rho} \xi_{xi} - l_{1}U_{i\xi} - l_{2}U_{i\eta} - l_{3}U_{i\zeta} + \xi_{xi}e_{i1} + \xi_{x2}e_{i2} + \xi_{x3}e_{i3} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ \frac{1}{J} \left(\mathbf{V}V_{i} + \frac{P}{\rho} \eta_{xi} - l_{1}U_{i\xi} - l_{4}U_{i\eta} - l_{5}U_{i\zeta} + \eta_{xi}e_{i1} + \eta_{x2}e_{i2} + \eta_{x3}e_{i3} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{1}{J} \left(\mathbf{W}W_{i} + \frac{P}{\rho} \zeta_{xi} - l_{3}U_{i\xi} - l_{5}U_{i\eta} - l_{6}U_{i\zeta} + \zeta_{xi}e_{i1} + \zeta_{x2}e_{i2} + \zeta_{x3}e_{i3} \right) \right\} \\ = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} l_1 = d_{i1}\xi_{x1}^2 + d_{i2}\xi_{x2}^2 + d_{i3}\xi_{x3}^2 \\ l_2 = d_{i1}\xi_{x1}\eta_{x1} + d_{i2}\xi_{x2}\eta_{x2} + d_{i3}\xi_{x3}\eta_{i3} \\ l_3 = d_{i1}\xi_{x1}\zeta_{x1} + d_{i2}\xi_{x2}\zeta_{x2} + d_{i3}\xi_{x3}\zeta_{x3} \\ l_4 = d_{i1}\eta_{x1}^2 + d_{i2}\eta_{x2}^2 + d_{i3}\eta_{x3}^2 \\ l_5 = d_{i1}\eta_{x1}\zeta_{x1} + d_{i2}\eta_{x2}\zeta_{x2} + d_{i3}\eta_{x3}\zeta_{x3} \\ l_6 = d_{i1}\zeta_{x1}^2 + d_{i2}\zeta_{x2}^2 + d_{i3}\zeta_{x3}^2$$

$$\mathbf{U} = U_1 \frac{\partial \xi}{\partial X_1} + U_2 \frac{\partial \xi}{\partial X_2} + U_3 \frac{\partial \xi}{\partial X_3}$$
$$\mathbf{V} = U_1 \frac{\partial \eta}{\partial X_1} + U_2 \frac{\partial \eta}{\partial X_2} + U_3 \frac{\partial \eta}{\partial X_3}$$
$$\mathbf{W} = U_1 \frac{\partial \zeta}{\partial X_1} + U_2 \frac{\partial \zeta}{\partial X_2} + U_3 \frac{\partial \zeta}{\partial X_3}$$

自由水面境界



Naot-Rodi(1982) $\varepsilon_{s} = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_{s}^{3/2}}{\kappa} \left(\frac{1}{y'} + \frac{1}{y^{*}}\right) \quad (y' = 0.07h)$ Nakagawa-Nezu(1987)

 $\overline{u_{3}^{2}} = 0.0$

$$k_{s} = Dk_{d}$$

$$(D = 0.8)$$

$$\varepsilon_{s} = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_{s}^{3/2}}{\kappa y}$$



水平方向流速 U_2 の比較



水平方向流速偏差U₂₈の横断分布比較



平均主流方向渦度_{0b}変化

	0. <mark>00 0.31 0.63</mark>	0.94 1.26 1.57				
Smooth	Riverbed	Bank	Riverbed+Bank			
主流方向速度等值線図 U_1/U_b						





摩擦速度等值線図 U_{*}/U_b