

复式断面明渠水流三维数值模拟

吕彬, 魏文礼, 刘玉玲

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 复式断面渠道水流流场结构比较复杂, 本文用耦合式求解器对复式断面明渠水流的三维流场进行了模拟。采用交错网格, 界面上的动量差值采用 Roe 格式, 紊流数学模型选用雷诺应力模型。将计算结果与实验结果进行比较, 两者的吻合度较好, 从而验证了数学模型的可靠性, 最后又对复式断面明渠横剖面上水流运动特性进行了分析。

关键词: 复式断面明渠; 耦合式求解; Roe - FDS; 二次流

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0071-03

3D Numerical Simulation for hydraulic characteristics of compound section of open channel

LÜ Bin, WEI Wenli, LIU Yuling

(Faculty of Water Resources and Hydraulics Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The flow field structure of compound channel is more complex. this paper simulated the compound open-channel flows based on reynolds stress model (RSM) and finite volume method (FVM) and also used the coupled solver. It apply Roe averaged flux difference splitting (Roe - FDS) to discretizing flux. The comparison between numerical results and experimental data showed a very good agreement. Finally, the hydraulic characteristics of the cross - section of the compound channel was analyzed.

Key words: compound section of open channel; coupled solver; Roe - FDS; secondary flow

许多的天然河道及渠道都是由主河槽和浅滩构成的, 这种河道或渠道断面称之为复式断面, 当河道水位上涨或渠道中充满水时, 复式断面上的主槽和滩地共同过流。由于在主河槽中水流运动速度较快, 而在滩地上水流运动速度相对较慢, 这就导致了水流在主河槽及滩地间不停地进行能量的交换, 使得复式断面河道及渠道中的水流流场异常复杂。许多学者对此进行过大量的研究, 早期的研究如 Tominaga A^[1] 等对复式断面明渠进行了实验研究, 林斌良等^[2] 采用非线性紊流数学模型和代数应力模型模拟复式断面明渠三维紊流, 槐文信等^[3] 用非均匀交错网格下的混合有限分析法 (HFAM) 对漫滩恒定明渠水流进行了三维数值模拟, Kang H 等^[4] 研究比较了在主槽和滩地上有无植物时的流场特性, 梁爱国等^[5] 采用雷诺应力模型对复式断面明渠二次流进行数值模拟, 并与实验做比较, 验证了模型的可靠性, 槐文信等^[6] 采用考虑浮力效应的 RNG 双方程模型, 结合混合有限分析法对复式断面明渠流中水平圆孔热水浮力射流进行了数值模拟, 张明亮等^[7] 研究了植被作用下复式渠道的三维湍流特性, 肖柏青等^[8] 运用大涡模拟方法计算了

个非对称复式断面明渠内的水流运动和污染物的扩散。纵观现有的研究成果, 多数的模拟研究都采用的是分离式求解器即压力校正的方法, 本文为寻求计算复式断面明渠水流特点的新方法, 采用了耦合式求解器, 物理量在界面上的插值采用的是 Roe 格式, 网格的划分采用交错网格, 紊流数学模型采用雷诺应力模型。将计算结果与实验结果进行比较, 以验证模型的可靠性。

1 数学模型

1.1 控制方程

描述水流的时均控制方程如下:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) + \rho g_i \quad (2)$$

$$- \rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

收稿日期: 2012-04-11; 修回日期: 2012-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178391); 陕西省重点学科专项资金资助

作者简介: 吕彬 (1987-), 男, 陕西洛南人, 硕士研究生, 主要从事计算流体力学研究。

式中: t 为时间; x_i 为沿 i 方向的空间坐标; u_i 为沿 i 方向的速度分量; μ_t 为湍动粘度, ρ 和 μ 分别为流体密度和分子粘性系数, p 为压强, g_i 为 i 方向的重力加速度。

紊动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

紊动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中: 湍动粘度 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; 模型常数 $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.99$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$

雷诺应力方程:

$$\frac{D \overline{u_i u_j}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_k \frac{k^2}{\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_l} \right] + P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \quad (6)$$

$$P_{ij} = - \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

$$P_{ii} = - 2 \overline{u_i u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \quad (8)$$

$$P = P_{ii}/2 \quad (9)$$

$$C_k = 0.09 \times 0.11, C_1 = 1.5 \times 2.2, C_2 = 0.4 \times 0.5$$

在实际计算中, 雷诺应力方程需要和平均运动的连续性方程, 紊动能 k 和紊动能 ε 方程以及雷诺方程联立求解, 共 12 个方程, 未知量也有 12 个, 包括 6 个雷诺应力分量, 3 个速度分量, 压强, 紊动能 k 和紊动能耗散率 ε 。

1.2 Roe 通量差格式^[9]

求解双曲型守恒方程时需要计算数值通量, 通过函数重构可以得到守恒变量在网格边界处的高阶近似值, 然后求解高阶数值通量。采用通量差分分裂法来保证格式具有正确的迎风性质, 保证数值解具有物理意义。本文采用 Roe 平均通量差分分裂法(FDS)。

$$f_{j+1/2} = \frac{1}{2} \{ f(u_{j+1/2}^L) + f(u_{j+1/2}^R) - \tilde{a} (u_{j+1/2}^R - u_{j+1/2}^L) \}$$

$$\tilde{a} = \frac{f(u_{j+1/2}^R) - f(u_{j+1/2}^L)}{u_{j+1/2}^R - u_{j+1/2}^L}$$

式中: $u_{j+1/2}^L, u_{j+1/2}^R$ 分别表示 u 在 $x_{j+1/2}$ 左右的值, 通过插值函数求得右侧的值。

2 计算区域及网格划分

本文研究所用的断面尺寸采用文献[1]的断面(图1), 其中 $b = 0.4$ m, $h = 0.08$ m, 纵向长度为 2 m。计算区域的横断面网格图绘于图 2 中, 采用结构化网格。

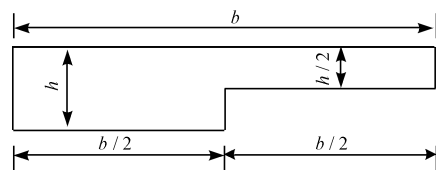


图1 计算区域图

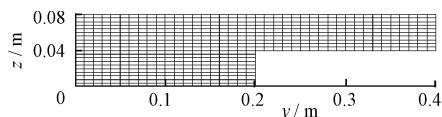


图2 计算区域网格图

3 边界条件

在进口, 所有边界条件都按本质条件给出, $u = u_0, v = v_0, w = w_0, k = k_0, \varepsilon = \varepsilon_0$; 在出口边界, 按充分发展湍流条件给出, 即设各变量法向导数为零, $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$; 在壁面边界, 采用壁面函数法。自由液面采用对称边界。

4 计算结果分析

4.1 计算结果与实验结果的比较

本文将横断面上的流速矢量图的计算结果与实验结果绘于图 3 中。将横断面上纵向流速 v_x 与整个流场中最大流速 $v_{\max}$ 的比值的等值线图绘于图 4 中。

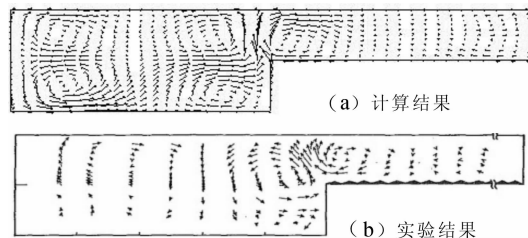


图3 流速矢量图

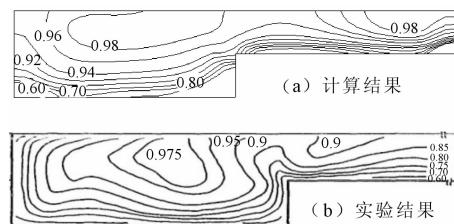


图4 $v_x/v_{\max}$ 等值线图

由图 3 可以看出, 计算结果与实验结果的流速矢量分布规律相同, 都是在主槽中有对称漩涡存在,

且漩涡的位置两者吻合度较好。由图4的 $v_x/v_{\max}$ 可看出,计算结果和实验结果的分布规律相近,只是在主槽中左右壁面处计算结果和实验结果稍有出入,这可能是由于在计算中壁面的边界处理不当引起的,但在其它地方两者的吻合度较好。

由此可见,本文所用的计算复式断面水流特性的数学模型是可靠的。

4.2 复式断面水流横向运动强度的研究

本文将横断面上主河槽上 $y = 0.05$ m, $y = 0.15$ m,及滩地上 $y = 0.25$ m, $y = 0.35$ m 处的沿水

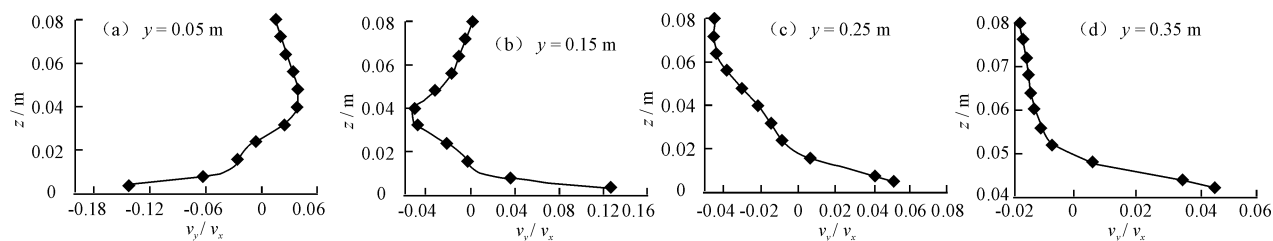


图5 v_y/v_x 沿水深分布图

4.3 紊动动能及耗散率分析

本文将横断面上的紊动动能及耗散率图绘于图6及图7中。



图6 紊动动能分布

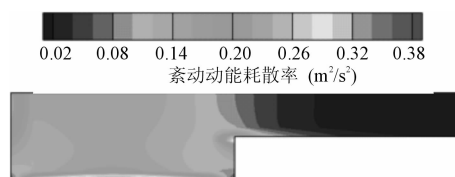


图7 紊动动能耗散率分布

由图6可见,复式断面明渠中,水流紊动主要集中在主槽中,而在滩地部分水流紊动比主槽中弱的多。由紊动动能耗散率分布图7可见,能量耗散也是主槽中要强于滩地处,且在主槽中靠近渠底处能量耗散要强于上部。

5 结 语

本文用耦合式求解器对复式断面明渠水流的三维流场进行模拟。采用交错网格,界面上的动量差值采用 Roe - FDS 格式,紊流数学模型选用雷诺应力模型。计算结果与实验结果吻合度良好,从而验证了模型的可靠性,最后又对复式断面上水流的横

深方向的横向流速 v_y 与纵向流速 v_x 的比值 v_y/v_x 分布图见图5。由图5可看出,在主槽上水深0.04 m以下的水流横向运动比较强烈,最大值可达到纵向水流运动的13%;在滩地上水深为0.01 m以下的水流横向运动比较强烈,最大值可达到纵向水流运动的5%。由图5(a)及图5(b)还可看出,在主槽上靠近主槽的内外壁面附近,水流横向运动强度的大小变化是一致的,但是方向是相反的,这主要是由于在主槽上有两个方向相反的漩涡的存在。而在滩地上,滩地左右两端的水流的横向运动大小和方向都比较一致。

向运动规律进行了研究,结果显示:主槽上的水流横向运动比滩地的强烈,渠底的水流横向运动比上部的强烈。对紊动动能及耗散率的分析显示,主槽中的紊动动能及耗散率都要强于滩地处。

参考文献:

- [1] Tominaga A, Nezu L. Turbulent structure in compound open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(1): 21 - 41.
- [2] 林斌良. 复式断面明渠三维紊流的数值模拟[J]. 水利学报, 1995, 26(3): 52 - 61.
- [3] 槐文信, 陈文学, 童汉毅, 等. 漫滩恒定明渠水流的三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 15 - 19.
- [4] Kang H, Choi S. Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetation on the flood-plain using the Reynolds stress model[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(11): 1650 - 1664.
- [5] 梁爱国, 槐文信. 复式断面明渠二次流的数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(2): 296 - 304.
- [6] 槐文信, 肖庆华, 曾玉红, 等. 复式断面明渠中水平热水浮力射流近区稀释特性研究[J]. 应用数学和力学, 2008, 29(2): 239 - 246.
- [7] 张明亮, 沈永明. 植被作用下复式渠道的三维湍流数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(3): 402 - 411.
- [8] 肖柏青, 李然, 罗麟, 等. 非对称复式断面明渠中污染物输移扩散的大涡模拟[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 309 - 314.
- [9] 段毅, 杨永. 一维高阶 ENO 格式的应用研究[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(4): 486 - 489.