



淹没式丁坝三维绕流的数值模拟*

郭延祥, 程 宜, 唐学林

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 利用FLUENT中的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和VOF模型对淹没式丁坝周围流场进行了数值模拟研究。计算结果表明, 由于丁坝的束水作用, 主流区的流速增大, 丁坝下游出现了较大的回流区, 回流区的流速较小。同时, 水流在丁坝处发生了壅水现象, 靠近丁坝上游的水位增高, 经过丁坝后的水位迅速下降, 并在丁坝下游沿程逐渐恢复。计算结果和试验观察与丁坝绕流客观规律相符合, 流速计算结果与试验数据吻合较好, 说明该模型可用于航道整治中有关丁坝的工程计算中。

关键词: 湍流; RNG $k-\varepsilon$ 模型; VOF模型; 数值模拟; 淹没式丁坝

中图分类号: TV 135

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0106-04

3D numerical simulation of flow around a submerged spur dike

GUO Yan-xiang, CHENG Huan, TANG Xue-lin

(College of Water Resources & Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: RNG $k-\varepsilon$ and VOF models in FLUENT software are used to simulate the flow field in the vicinity of a submerged spur dike. The result shows that the flow speed in main field is increased as a result of restraining by spur dike and a moderate backflow region with lower speed behind the dike. Backwater occurs near the dike so that the water level before the dike is increased while decreases behind, and then recovers along the channel. The simulation result coincides with the experiment and field observation and the calculated speed is close to the test data, which means that the model presented can be applied to the engineering calculation related to spur dike.

Key words: turbulent flow; RNG $k-\varepsilon$ model; VOF model; numerical simulation; submerged spur dike

丁坝是最常见的航道整治建筑物类型之一, 能够束窄水流、壅高水位、保护岸坡免受冲刷。而丁坝修建后使流动缩窄, 产生坝头分离流和坝尾回旋流, 水流流态比较复杂。并且丁坝附近竖轴回流及横轴回流共存, 局部流动呈强三维紊动特性^[1]。淹没丁坝附近水深突变, 呈多值现象, 坝前水位壅高, 坝后水位下降, 坝前后水位变动幅度较大。因此, 研究丁坝附近的三维带自由水面流场, 有利于更为精确地掌握丁坝附近水面状况和模拟丁坝附近水流液态。为合理确定丁坝规模和预测坝头冲淤变化提供基础手段。

由于丁坝附近绕流的复杂性, 求出其解析解

是十分困难的。早期研究主要以模型试验为主, 而目前随着计算机及数值模拟技术的迅速发展, 数值模拟已经成为研究丁坝绕流问题的一个重要手段。周宜林^[2]采用大涡模拟中的Smagorinsky (SM) 模型对上挑、正挑、下挑3种淹没丁坝附近的三维水流流场进行模拟。Yu等^[3]采用大涡模拟与格子Boltzmann方法的联合模型对丁坝附近流场的流速、水深与涡量分布进行了数值模拟研究。彭静^[4]研究了丁坝试验和数值模拟两方面的成果, 分析了丁坝局部流动结构及冲刷机理。崔占峰等^[5]采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型, 并结合壁面函数的方法, 模拟、分析了淹没丁坝附近的三维湍

收稿日期: 2012-11-22

*基金项目: 国家自然科学基金 (50976124); 中央高校基本科研业务费专项基金 (2012BH008)

作者简介: 郭延祥 (1974—), 男, 博士后, 主要从事水沙数值模拟研究。

流流场及应力分布。

本文将利用FLUENT中的RNG k - ε 湍流模型和VOF模型对淹没丁坝附近的湍流流场和自由液面进行数值模拟研究,并把模拟的结果与Tominaga等^[6]的试验数据资料进行比较分析。

1 数学模型

1.1 水流运动控制方程

对于不可压缩流体的流动,可以给出采用雷诺平均法表示的湍流N-S方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: u_i 是 x_i 方向的瞬时速度分量时均值; p 为瞬时压力时均值; F_i 为 x_i 方向的质量力时均值; ν 为水的分子黏性系数。

1.2 湍流模型

为了处理Reynolds应力项 $-\rho \overline{u_i' u_j'}$,使求解上述方程封闭,这里采用RNG k - ε 湍流模型来确定湍动应力。其中湍动能系数 k ,湍动耗散率 ε 的求解输运方程式为^[7]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中: $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$, $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, α_k , α_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的Prandtl数。

1.3 VOF模型

VOF模型^[8-9]根据各个时刻流体在网格单元中所占体积函数 F 来构造和追踪自由面。对于包含液体和空气两种流体的空间区域,定义标量函数 f ,存在液体空间点的 f 值等于1,其它不被液体占据

点的 f 值为0,在各网格单元上对 f 值积分,并把这一积分值除以单元的体积,得到单元的 f 平均值,即网格单元中液体所占据的单元体积份额,在VOF方法中把这一份额值定义为 F 。若在某时刻网格单元中 $F=1$,则说明该单元全部为指定相流体所占据,为流体单元。若 $F=0$,则该单元全部为另一相流体所占据,相对于前相流体则称为空单元。当 $0 < F < 1$ 时,则该单元为包含两相物质的交界面单元。其中, f 函数的欧拉描述形式为:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

2 数值方法

2.1 模型建立及网格划分

本文采用Tominaga等^[6]的试验作为算例,试验水槽及丁坝的几何尺寸如图1所示。设 x 轴为沿水流方向, y 轴为横断面方向, z 轴为沿水深方向。水槽长度为8 m,宽0.3 m。丁坝位于 $x=4$ m的位置。流量为 $3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,水深约为0.09 m。

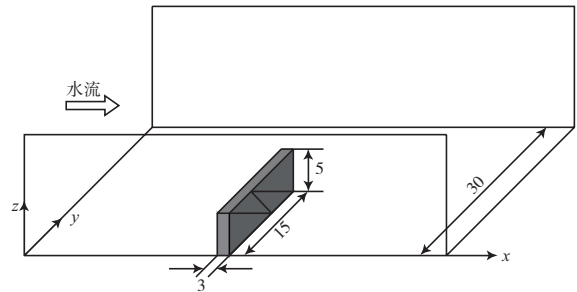


图1 淹没丁坝绕流试验布置(单位: cm)

计算域在流动方向上选取了 $x=3$ m到 $x=6$ m的区域,同时,考虑到数值模拟将采用VOF模型来模拟自由液面,在 z 方向增加一定的空气计算域,因此,最终的计算域为 $3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.18 \text{ m}$ 。考虑到丁坝附近、壁面和丁坝自由液面处的物理量梯度大,进行了网格局部加密,并通过网格无关性验证,最终网格节点数取为 $239 \times 51 \times 61$ 。

2.2 边界条件

在入口,分别设定水流和空气流速、紊动能 k 及耗散率 ε 边界,其中 k 和 ε 由经验公式 $k=0.0037u^2$ 和 $\varepsilon=k^{1.5}/(0.42H_0)$ 给出, u 为流速, H_0 为水深;在出口边界,按充分发展湍流条件给出,即设各变量

法向梯度为零；自由液面则采用VOF法求解单元液相体积百分数 F 来确定；对于近壁区流动，采用壁面函数来模拟，壁面上采用无滑移条件；对于计算域顶部，则使用刚盖假定方法来处理^[10]。

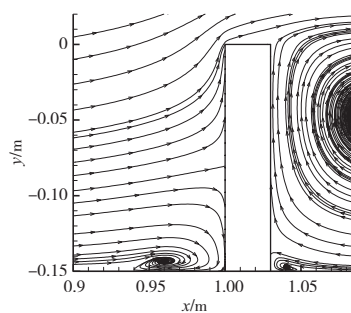
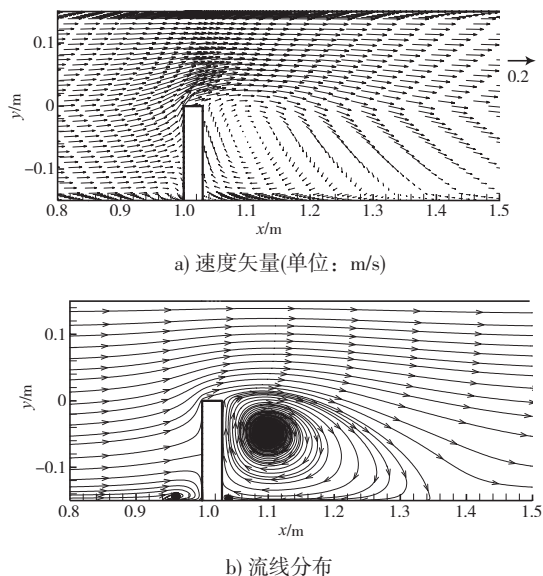
2.3 求解方法

本文利用有限体积法求解连续性方程和雷诺时均N-S方程，并采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型来封闭方程组。由于流动为非定常流，故采用显式VOF方案，近壁流动采用标准的壁面函数法。方程离散时压力差值采用PRESTO格式，湍动能与耗散率的离散采用一阶迎风格式，压力速度耦合采用PISO算法。收敛标准为计算各变量残差小于0.000 01。

3 计算结果与分析

流场底部 ($z=0.02$ m) 的平面流场计算结果如图2所示。丁坝上方2 cm处 ($z=0.07$ m) 平面流场计算结果如图3所示。从图2和图3可以观察到，由于丁坝的束水和阻挡作用，流道的主流区流速增大，坝前区域水流流速减小。同时，丁坝后形成了较大的回流区，流速较小。特别是图2中的流线分布局部放大图表明，在丁坝上下游出现了两个旋转方向相反的角涡。这些模拟的流场形态和试验观测与丁坝绕流客观运动规律基本相符合。

分别取 $x=4.0$ m, $z=0.07$ m; $x=4.1$ m, $z=0.01$ m; $x=4.05$ m, $z=0.02$ m; $x=4.05$ m, $z=0.07$ m处的4条穿河水平线，其流速分布的计算结果与实测数据比较见图4和5。



c) 流线局部放大图

图2 流道底部 ($z=0.02$ m) 平面的流场

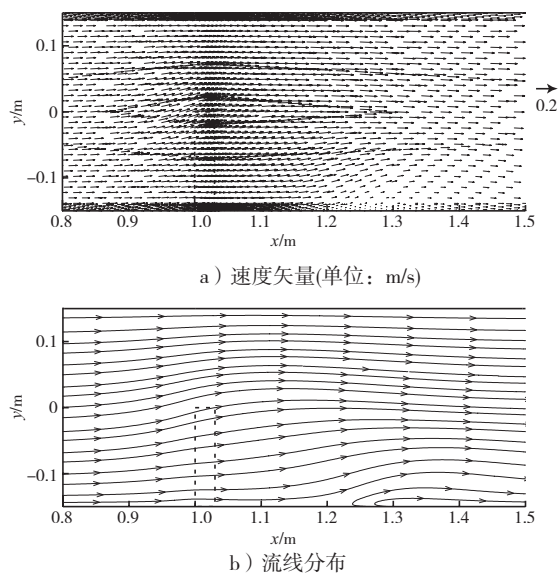


图3 丁坝上方 ($z=0.07$ m) 平面的流场

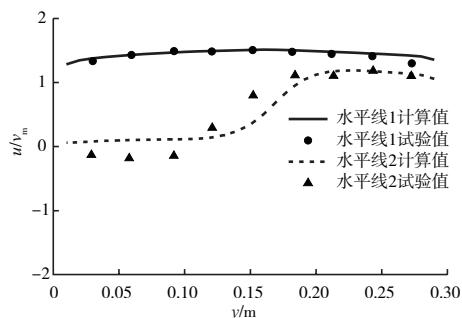


图4 水平线1, 2处流速对比

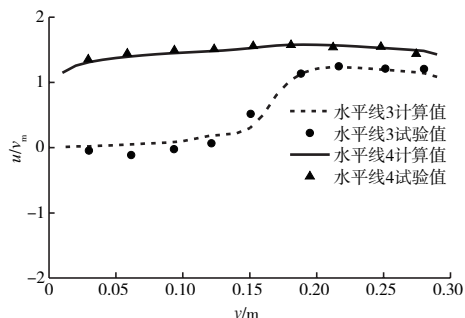


图5 水平线3, 4处流速对比

图4和图5中,由于丁坝的束水和阻塞作用,过水断面减少,在流场顶部水平线1和4位置上的水流流速增大,并高于来流的平均速度;而在丁坝下游流场底部的水平线2和3处,主流区流速较大,坝后回流区的速度较小。这些都表明模拟的结果与试验现象基本符合,其计算值与试验值吻合得也比较好。

流道 $y=0.015$ m纵剖面 and $x=4.015$ m断面处的气液分界线分布(即水深分布)见图6和7。其计算结果表明,水流经过丁坝时,由于丁坝阻挡来流,在丁坝的上游出现了壅水现象。丁坝下游水位下降的速度比较快,最小水深一般出现在下游回流区的中心附近。同时,丁坝正上方的水位高于主流区一侧,而此横断面的平均水位也高于上游来流的平均水位,这些均与实际观测情况相符合。

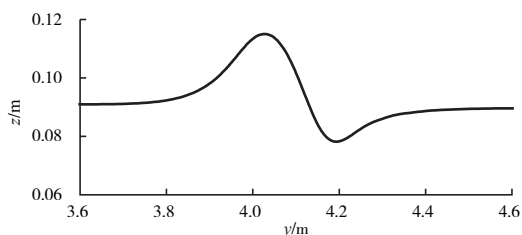


图6 $y=0.015$ m纵剖面自由液面分界线

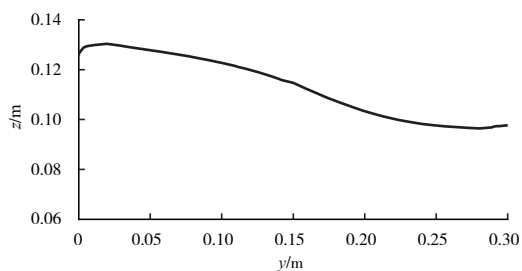


图7 $x=4.015$ m横断面自由液面分界线

4 结论

1) 利用FLUENT中的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和VOF模型对单一淹没丁坝附近的湍流流场和自由液面进行了数值模拟研究。预测了丁坝下游的较大回流区和丁坝上下游的两个角涡。计算结果表明,由于丁坝的束水和阻塞作用,主流区的流速增大,而回流区的流速较小,其中,流速计算值

与试验数据比较吻合。

2) 自由表面的水深模拟结果说明,水流在丁坝处产生了壅水现象,靠近丁坝上游的水位增高,经过丁坝后的水位迅速下降并逐渐恢复稳定,所有计算结果都符合丁坝绕流的客观规律。总之,本文所有模型和数值方法能够较准确地模拟淹没式丁坝附近的湍流流场分布及丁坝附近自由液面的分布情况,可为工程中丁坝三维湍流的相关研究提供理论指导与参考依据。

参考文献:

- [1] 李小芹,李超,张泽中. 丁坝附近湍流的数值模拟[J]. 人民黄河,2008,30(7): 32-33.
- [2] 周宜林. 淹没丁坝附近三维水流运动大涡数值模拟[J]. 长江科学院院报,2001,18(5): 28-36.
- [3] Yu Xin, Tang Xuelin, Wang Wuchang, et al. A lattice boltzmann model coupled with a large eddy simulation model for flows around a groyne [J]. International Journal of Sediment Research, 2010(25): 271-282.
- [4] 彭静. 丁坝水流及冲刷一可视化与三维数值模拟[M]. 郑州: 黄河出版社, 2004.
- [5] 崔占峰, 张小峰. 三维紊流模型在丁坝中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2006, 39(1): 15-20.
- [6] Tominaga A, Chiba S. Flow Structure around a submerged spur dike [C]. Proc of Annual Meeting of Japan Society of Fluid Mechanics, 1996: 317-318.
- [7] 刘超, 李超, 孙衣春. 丁坝附近湍流的二维数值模拟[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(6): 17-18.
- [8] 李玲, 陈永灿, 李永红. 三维VOF模型及其在溢洪道水流计算中的应用[J]. 水力发电学报, 2007, 26(2): 83-87.
- [9] Chen Liping, Jiang Juncheng. Experiments and numerical simulations on transport of dissolved pollutants around spur dike [J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(3): 341-353.
- [10] Tang Xuelin, Ding Xiang, Chen Zhicong. Experimental and numerical investigations on secondary flows and sedimentations behind a spur dike[J]. Journal of Hydrodynamics: Series B, 2007, 19(1): 23-29.

(本文编辑 武亚庆)