

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.06.003

带闸墩溢流坝控泄工况二维与三维数值模拟

李 静¹ 李 丹² 姜伯乐¹

(1. 长江水利委员会长江科学院 湖北 武汉 430010; 2. 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 :引入水气两相流模型,利用 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟银盘水电站带闸墩坝面上的复杂紊流流场,采用非结构网格来处理复杂的边界形状,采用有限体积法进行迭代求解。通过二维和三维模拟计算得到坝面水流的水面线位置、坝面压力分布以及流线分布情况,并将二维和三维数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比分析。结果表明,与二维计算结果相比,三维计算结果与物理模型试验结果吻合程度更高,特别是对进口压力与水跃发生点的模拟,三维模拟更加准确。

关键词 溢流坝;闸墩; $k-\epsilon$ 紊流模型;数值模拟

中图分类号:TV131.2;TV135.2 文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2011)06-0010-04

2D and 3D numerical simulations of controlled discharging conditions of overflow dam with frusta // LI Jing¹, LI Dan², JIANG Bo-le¹ (1. Changjiang Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : By introducing the air-water two-phase flow model, the $k-\epsilon$ turbulence model was employed to simulate the complicated turbulent flow fields on the surface of overflow dam with frusta of Yinpan Hydropower Station. The unstructured grids were used to treat the irregular boundaries, and the finite volume of fluid method was applied to the iteration of calculation. The curvilinear free surface, velocity and pressure distributions were obtained by means of 2D and 3D numerical simulations. The results of 2D and 3D numerical simulations were compared with the test data. A conclusion is drawn that compared with those of 2D numerical simulations, the results of 3D numerical simulations fit physical model test ones better. Especially for the pressure on the inlet and the occurrence positions of hydraulic jump, 3D numerical simulations are more accurate.

Key words : overflow dam; frusta; $k-\epsilon$ turbulence model; numerical simulation

目前对带闸墩溢流坝过坝水流的三维数值模拟比较少见,这主要是由于三维模拟的计算网格单元数急剧增加,闸墩的存在加大了网格划分的难度并且使整个流场变得异常复杂。因此对过坝水流的研究工作通常较少考虑闸墩对流场的影响,而直接以二维流场为研究对象^[1-3]。文献[4]通过分别计算过坝水流和闸墩绕流2个二维模型来近似模拟三维带闸墩的溢流坝流场,为解决三维过坝水流问题提供了一条途径,但是将二维数值模型应用于实际带闸墩溢流坝过坝水流计算还有一定的差距。主要表现在闸墩的存在对水面线位置、坝面压力、溢流流量等均产生显著的影响。文献[5]利用有限体积法对溢流坝三维湍流场进行数值模拟,但没有考虑闸墩的影响。文献[6-14]对溢流坝及湍流场进行了数值模拟研究。笔者以银盘水电站带闸墩溢流坝为例,以雷诺时均方程为基础,利用 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟湍流流动,采用流体体积(VOF)法确定自由水面线的位

置,采用有限体积法进行离散求解,并与物理模型试验结果进行对比,比较准确地给出了过坝水流的水面线位置及坝面压力分布,可为泄水工程的水力设计提供比较可靠的设计依据。

1 数学模型

1.1 模型控制方程

VOF模型适用于跟踪捕捉两相或多相流中互不穿透流体间的界面变化。VOF模型通过引入体积分数、求解体积分方程来捕捉界面^[15]。

设某一控制单元内第 q 相体积分数为 α_q ($0 \leq \alpha_q \leq 1$) 则当 $\alpha_q = 0$ 时,该控制单元内无第 q 相流体; $\alpha_q = 1$ 时,该控制单元内充满第 q 相流体; $0 < \alpha_q < 1$ 时,该控制单元内存在相间界面。当控制单元中存在 n 相流体时,各控制单元内各相体积分之和为 1,即

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (1)$$

本文所研究问题属于不可压缩流体的湍流流动问题,因此模型中采用标准 $k-\epsilon$ 模型,其基本控制方程如下:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:密度、黏性系数等物理量采用体积分数加权平均法求得,如 $\rho = \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q$; G 为湍动能生成项, $G =$

$\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{\epsilon^2}{k}$, $C_\mu = 0.09$; σ_k , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 为系数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 。其他物理量符号含义见文献 [16]。

1.2 计算区域和网格划分

溢流坝堰顶高程为 195 m,进口坝面头部采用方程为 $x^2/7^2 + y^2/4.075^2 = 1$ 的 1/4 椭圆曲线,后接 WES 曲线,曲线方程为 $y = 0.038x^{1.85}$,其后由 1:1.8 斜坡与半径为 69.80 m 的反弧段衔接。消力池底板高程为 175 m。闸孔宽度为 15.5 m,闸墩宽度为 4.5 m。本研究工况:上游水位为 215 m,下游水位为 199.66 m,进口水深为 40 m,闸门开度为 0.4,闸门开启孔数为 8 个,下泄流量为 10 850 m³/s。物理模型取 2 孔,按照重力相似准则设计,长度比尺为 1:50。为了与物理模型结果进行比较,二维和三维模型与物理模型尺度相同。根据 WES 曲线的特性, x 方向坐标原点取在堰顶处。二维模型计算区域见图 1。

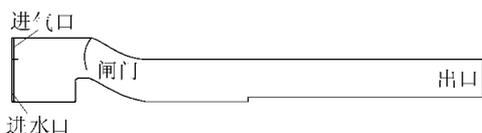


图 1 二维模型计算区域

由于闸墩附近的几何形状十分复杂,为了保证计算精度,对包含闸墩的三维区域进行网格划分时对整个区域进行分区,在各分区上采用不同的网格系统。三维模型计算区域和网格划分分别见图 2 和

图 3。

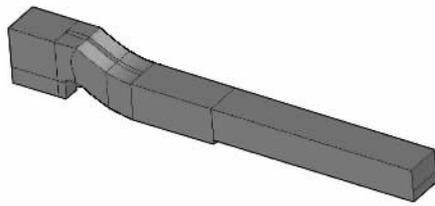


图 2 三维模型计算区域

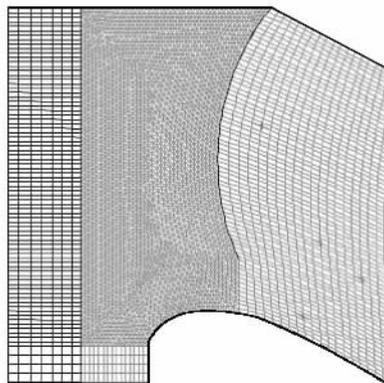


图 3 三维模型闸门局部网格划分

1.3 边界条件

气体入口边界为压力边界条件,入口边界处压强为大气压强。水的入口边界为速度入口边界条件。二维计算和三维计算中流速 u_{in} 均为 1.844 m/s。入口紊动能 k 和耗散率 ϵ 的边界条件分别由式(6)、式(7)得出:

$$k = 0.00375 u_{in}^2 \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{k^{1.5}}{0.4 H_{in}} \quad (7)$$

式中: H_{in} 为进口水深。

1.3.1 出口边界

由于出口压力分布已知,因此出口边界采用压力边界条件,出口边界上压力分布为 $p = \rho g(199.66 - z)$ 。过堰水流经过消力池消能后,流态仍然非常紊乱。水流过水断面上流速分布需要经过一段足够长的距离才能逐渐调整至渐变流流速分布。因此,在数学模型建立以后,通过大量的重复测试,并与物理模型试验对比,确定了合适的出口边界位置。

1.3.2 壁面边界条件

壁面边界采用无滑移边界,即在壁面上 $u = v = w = 0$ 。近壁区的黏性底层采用标准壁函数处理。

1.4 数值求解方法

本文采用基于非结构网格的有限体积法对计算区域进行离散,并采用 PISO 算法进行求解。

2 物理模型

本文用于对比的试验数据采用物理模型试验获

得。物理模型采用重力相似原则,比尺为 1:50。物理试验主要采集了水面线和坝面压力数据。物理模型试验流态见图 4。

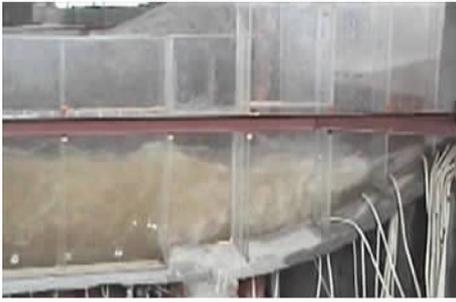


图 4 物理模型试验流态

3 计算结果比较与分析

3.1 水跃区流线

物理模型试验结果表明,该控泄工况下消力池内发生了淹没水跃。图 5 给出了消力池内水跃的二

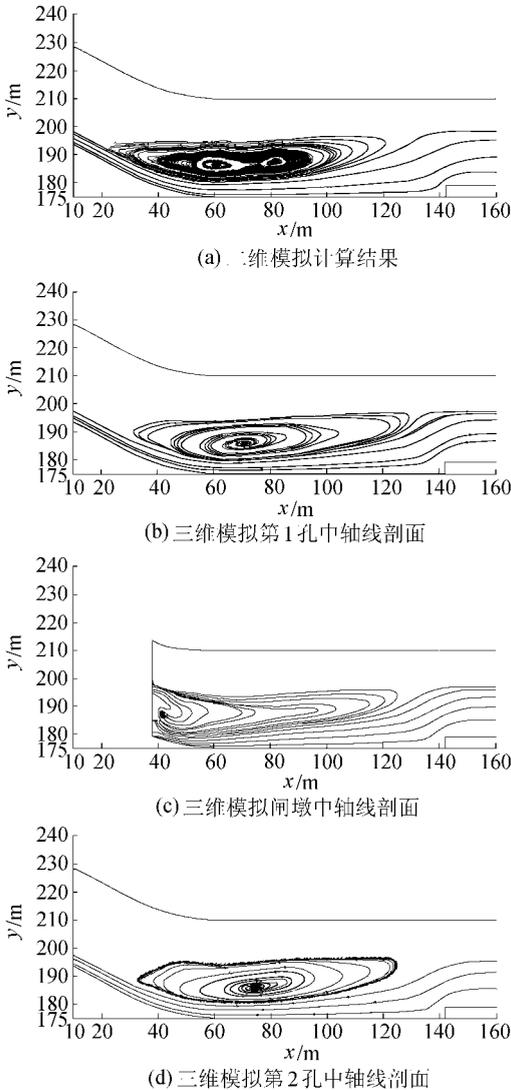


图 5 二维与三维模拟消力池内流线分布

维模拟与三维模拟结果。图 5(a)为二维模拟计算结果,图 5(b)~(d)分别为三维模拟第 1 孔、闸墩和第 2 孔中轴线剖面上的流线分布。从图 5 可以看出,三维计算中由于模拟的对称性,第 1 孔与第 2 孔的流线分布基本相同,二维计算的流线分布中存在 2 个涡,而三维计算的流线分布中只存在 1 个涡。在三维模型中计算区域、网格划分是完全对称的。但从图 5(b)、(d)中可以看出第 1 孔与第 2 孔中轴线剖面上的流线分布并不完全一致。这一现象看似与计算区域对称性矛盾。实际上,在三维模拟中水流与空气的掺混机理十分复杂,而且两者的掺混过程属于非恒定过程,因此三维模拟无法得出完全对称的结果。

3.2 水面线位置

图 6 给出了水面线的二维模拟、三维模拟以及与物理模型结果的对比。由图 6 可以看出,二维模拟得出的水跃发生位置与物理模型结果有较大偏差,三维模拟得出的水面线与物理模型结果吻合较好,水跃发生位置与物理模型结果比较一致。在水跃发生点之前,二维与三维模拟得出的水面线与物理模型结果均十分接近。但是水跃发生位置 2 种模拟结果显著不同。二维模拟的水跃发生位置比三维模拟提前许多,出现了较大的偏差。

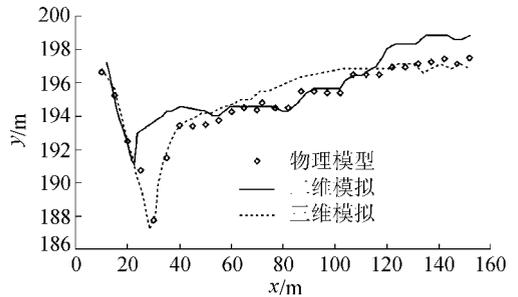


图 6 二维模拟、三维模拟与物理模型水面线对比

3.3 坝面压力分布

图 7 给出了坝面压力分布的二维模拟、三维模拟与物理模型结果的对比。坝面压力采集范围为桩号 -11.70~37.81 m。从图 7 中可以看出,由于闸墩的影响,进口压力二维模拟与三维模拟结果有较大差别,三维模拟结果与物理模型结果吻合得更好,但

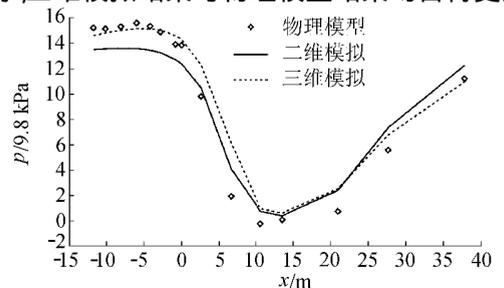


图 7 二维模拟、三维模拟与物理模型坝面压力分布对比

在水跃区二维模拟与三维模拟得出的压力相差不大。坝面压力的数学模拟结果与物理模型结果相比还存在一定的差距,主要原因是数学模型是在物理模型的基础上对进口条件进行简化后建立的。进口条件的简化对计算结果造成的影响在二维模拟中表现得非常突出。由于没有闸墩、进口侧收缩的影响,堰顶上游段水流流速比物理模型试验所测得的流速大,因此造成二维模拟结果中进口段坝面压力偏小。

4 结 语

以银盘水电站带闸墩溢流坝为例,用紊流模型模拟了控泄工况下二维和三维数值模拟水面线位置、坝面压力分布以及流线分布情况,并与物理模型结果进行了对比。与二维模拟结果相比,三维模拟结果与物理模型试验结果吻合程度较好,特别是对进口压力与水跃发生点的模拟。但由于数学模型进出口边界条件与物理模型存在差异,数学模拟结果与物理模型试验结果存在一定的差异。相比二维模拟中进出口边界条件简化造成的影响,三维模拟受到的影响较少,因此推荐采用三维模型进行模拟。

参考文献:

[1] 苏远波,马震岳,张宏战,等.太平哨水电站溢流坝闸墩裂缝成因数值分析[J].水利水电科技进展,2009,29(S1):103-106.
[2] 陈群,戴光清,刘浩吾.阶梯式溢流坝研究综述[J].水利水电科技进展,2002,22(1):47-50.
[3] 魏文礼,刘玉玲,金忠青.溢流坝面明流流动水力特性数值分析[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(3):

107-110.

[4] 谭仁忠,王世夏.有闸墩的溢流坝过坝水流数学模型[J].水利学报,1988,19(8):40-44.
[5] 马福喜,王金瑞.三维紊流数值研究[J].水动力学研究与进展:A辑,1995,10(2):115-124.
[6] 王志东,汪德.含闸墩溢流坝三维过坝水流数值模拟[J].水科学进展,2004,15(6):735-738.
[7] 王志东,汪德.不同墩型溢流坝水动力特性研究[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):391-394.
[8] 陈群,戴光清,刘浩吾.带有曲线自由水面的阶梯溢流坝面流场的数值模拟[J].水利学报,2002,33(9):20-26.
[9] 陈永明,吉庆丰.阶梯溢流坝水流数值模拟及消能分析[J].灌溉排水学报,2006,25(2):68-71.
[10] 刘晓川,杨纪伟,李书芳,等.阶梯溢流坝自掺气水流的数值模拟[J].水利科技与经济,2008,14(3):190-192.
[11] 程香菊,罗麟,赵文谦,等.阶梯溢流坝自由表面掺气特性数值模拟[J].水动力学研究与进展:A辑,2004,19(2):152-157.
[12] FERZIGER J H,PERIC M. Computational methods for fluid dynamic[M].Berlin:Springer,1996.
[13] YAKHOT V,ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence[J].Journal of Scientific Computing,1986,1(1):3-5.
[14] LAUNDER B E,SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flow[J].Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1974,3:269-289.
[15] LAUNDER B E,SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M].London:Academic Press,1972.
[16] HIRT C W,NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J].J Comput Phys,1981,39:201-225.

(收稿日期 2011-04-13 编辑 骆超)

· 简讯 ·

第 1 届全国防灾减灾工程学术会议在河海大学召开

由中国灾害防御协会、国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、江苏省地震局、《防灾减灾工程学报》编辑部联合主办,河海大学与南京工业大学联合承办的第 1 届全国防灾减灾工程学术会议于 2011 年 10 月 22—23 日在河海大学召开。中国工程院院士水利建筑学部副主任欧进萍院士,中国工程院周丰峻院士、郑颖人院士、吴中如院士、唐明述院士,河海大学校长王乘教授,江苏省地震局局长丁仁杰研究员,以及来自全国高等院校、科研院所和企业单位从事防灾减灾工程研究和应用的 120 多名专家学者出席了大会。河海大学校长王乘教授致欢迎辞,丁仁杰局长和欧进萍院士先后在开幕式上讲话。开幕式由本届会议组委会主席、河海大学土木与交通学院院长刘汉龙教授主持。大会期间,欧进萍院士、郑颖人院士、周丰峻院士、唐明述院士等知名专家作了特邀报告,15 位专家学者作小组报告,与会人员围绕地震工程与工程抗震、地震区划和应急救援、岩土工程与地下工程中的防灾减灾、爆炸力学与防灾、地质灾害及防治技术等领域的最新科研进展和成果进行了研讨与交流,共有 84 篇学术论文收入《防灾减灾工程学报》出版的会议论文集。会议决定第 2 届全国防灾减灾工程学术会议于 2013 年召开,由哈尔滨工业大学承办。

(本刊编辑部供稿)