

基于VOF模型的阿拉沟溢洪道 流场数值模拟

何照青¹, 祁永斐², 李卫鹏¹

(1. 水利部新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟湍流, 利用 VOF 法追踪自由水面, 对阿拉沟溢洪道在不同流量下进行三维流场数值模拟, 并将设计洪水位和校核洪水位两种工况下溢洪道的自由水面、底板压强、断面流速与模型试验观测数据进行对比分析。结果表明: 数值模拟和模型试验资料基本吻合, 为阿拉沟水库溢洪道优化设计提供更为可靠的依据。

关键词: 溢洪道; 数值模拟; VOF 模型; 阿拉沟

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0170-04

Numerical simulation of 3-D flow field of Alagou spillway based on VOF model

HE Zhaoqing¹, QI Yongfei², LI Weipeng¹

(1. Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: By using the standard $k-\varepsilon$ model to simulate turbulence and VOF method to track the free surface of Alagou spillway at different flow rates of three-dimensional flow field numerical simulation. And the design flood level and check flood level under two kinds of conditions, the free water surface and bottom pressure, velocity and the model test observation data were compared and analyzed; the results show that the numerical simulation results and measured data are basically consistent, which can provide the reliable basis for Alagou reservoir spillway optimization design.

Key words: spillway; numerical simulation; VOF Method; Alagou

0 引言

溢洪道是泄水建筑物中使用最广泛的建筑物, 它的泄流能力和安全运行直接影响到水利枢纽防洪调度和安全运行, 因此, 对其水流水力特性的全面研究具有重要意义。目前常用的研究方法为物理模型试验和数值模拟方法, 其中物理模型试验法应用广泛, 试验结论真实可靠, 是工程设计的最终验证。但是物理模型试验也有其本身难以克服的缺点, 比如高速水流的脉动和掺气的模型相似率问题尚未解决; 又如大多数量测仪器不可避免地局部改变流场, 使量测结果带有误差。

在水工模型试验的过程中, 将物理模型试验和数值模拟法相结合, 弥补模型试验的不足之处, 快速、全面、准确地反映溢洪道内流场特性, 为溢洪道

优化设计和运行管理提供可靠的依据和参考^[1-3]。文章主要是通过采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟湍流, 利用 VOF 法追踪自由水面, 对阿拉沟溢洪道进行三维流场数值模拟, 对比试验数据和数值模拟计算的结果, 为阿拉沟水库溢洪道优化设计提供更为可靠的依据。

1 工程概况

阿拉沟水库工程位于托克逊县境内, 是阿拉沟河及托克逊县“两河”流域的重要控制性工程, 该工程开发任务具有防洪、供水、灌溉等综合利用效益。阿拉沟水库溢洪道位于右岸, 为岸边开敞式正槽溢洪道, 采用直线布置, 纵轴与大坝轴线夹角 166.48° , 阿拉沟溢洪道纵剖面及平面布置见图 1。

溢洪道进水渠段采用矩形断面, 长 14.3 m, 底

收稿日期: 2012-12-14; 修回日期: 2012-12-20

作者简介: 何照青(1987-), 男, 四川西充人, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 水工水力学。

部宽 28 m,平坡坡底,控制段采用“WES”实用堰,长 16 m,堰顶高程 939.0 m,堰高 2.25 m,溢流堰设弧形闸门 3 孔,单孔净宽 8 m,中墩厚度为 2.0 m,堰后接长 205.7m 整体式矩形断面泄槽,底宽由控制段处的 28 m 渐变为 20 m,渐变段长度 40 m,泄槽段纵坡 25.4%,泄槽末端接 15 m 长的挑流消能段,挑流鼻坎半径 30 m,挑角为 15°。

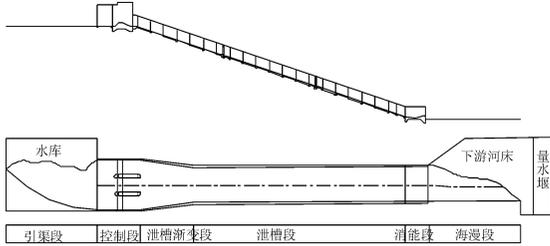


图 1 阿拉沟溢洪道纵剖面及平面布置图

2 数学模型

标准 $k-\varepsilon$ 模型^[4-7]是由 Launder 和 Spalding 提出的,因其考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大流动,使得标准 $k-\varepsilon$ 模型具有稳定性、经济性、较高的计算精度和基本形式比较简单等优点,因此,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

$$\text{连续方程: } \partial u_j / \partial x_j = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_\tau \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - g_i \end{aligned} \quad (2)$$

紊动能方程(k 方程):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

紊动能耗散率方程(ε 方程):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: P 为修正后的压力值; ρ 和 μ 分别为体积分加权平均的密度和分子粘性系数,它可由紊动能 k 和紊动能耗散率 ε 求出:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: C_μ 为经验系数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的紊流

普朗特数; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为 ε 方程常数; G 为平均速度梯度引起的紊动能产生项,它可由下式定义:

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2, 3$, 即 $\{x_i = x, y, z\}$, $\{u_i = u, v, w\}$; j 为求和下标; 方程中通用模型常数^[8] $C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

为了更好地分析溢洪道运行过程中复杂的自由液面,故在对自由表面处理时引入流体体积分法(VOF)。VOF^[5-6,9-10]方法是一种简单而有效的处理复杂自由表面的方法。假设在同一单元中,水和气体服从同一组动量方程,但他们的体积分 α 在整个流场中都作为单独变量, α 应满足以下关系式:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\alpha_q + \alpha_a = 1 \quad (8)$$

当 $\alpha_a = 1$ 时,表示控制体内充满 q 相流体, $\alpha_a = 0$ 表示控制体内充满空气, $0 < \alpha_a < 1$ 表示控制体内部分冲满 q 相流体。

采用有限体积法对控制方程组进行离散,数值计算采用基于同位网格的 SIMPLE 法。

3 网格划分及边界条件

溢洪道模拟区域为:顺水流 x 方向为 $-100.0 \sim 230.0$ m,沿宽度 y 方向为 $-10.0 \sim 30.0$ m,沿水深 z 方向为 $-60.0 \sim 10.0$ m。

由于溢洪道进口引渠段、控制段与泄槽段的几何边界较规则,因此,采用六面体结构网格进行网格划分。为获得精确数据观察流场特性,对墙壁、控制段、渐变段以及出口段进行局部网格细化,整个模拟区域的计算网格划分见图 2。

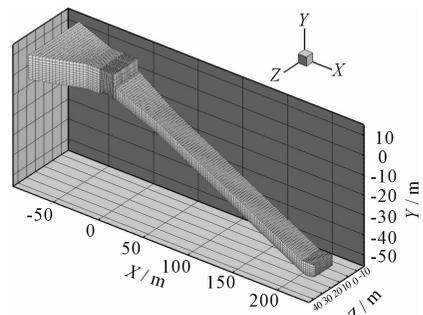


图 2 计算区域网格划分图

对于恒定流量的泄流,采用流速边界。根据物理模型试验中的水库水位、泄流量大小换算成进口流速给定;出口边界条件采用压强出口边界,其总压强为大气压强;上边界采用压强进口边界,其总压强

为大气压强;整个溢洪道固壁上给定法向速度为零和无滑移条件,湍流近壁的粘性底层采用壁函数法来处理。

4 计算结果与分析

通过计算流体力学软件 FLUENT 对水流运动进行数值模拟,得到溢洪道模拟区域的沿程水面高程、压强、流速场等水流流场特性。分别选取设计洪水位、校核洪水位两种基本工况与模型试验的数据进行验证,两种工况的基本信息见表 1。

表 1 两种基本工况		m, m ³ /s
工 况	库水位	泄流量
设计洪水水位	944.60	631.72
校核洪水水位	947.80	1240.80

4.1 水面高程

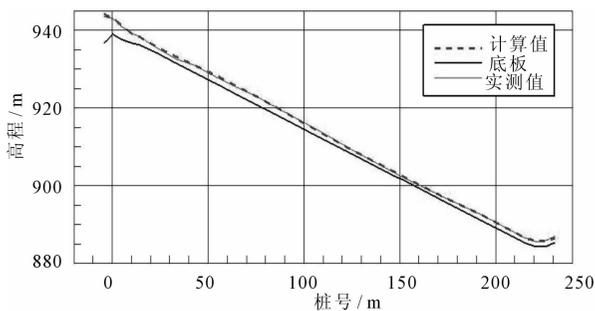
自由水面对工程的设计和水库调度运行起着决定性作用。图 3 为溢洪道设计水位及校核水位两种工况下沿程水面线分布情况,从图 3 中可见,溢洪道水面线与模型试验情况总体上是保持一致的,控制段和渐变段的水面高程存在相应的误差,主要是由于水流收缩引起水位的壅高与降低所造成的。在模

型试验中,我们测出的水位或水深是断面的平均值,测量过程中存在一定的人为误差;但是在数值模拟计算过程中,计算结果取的是这个断面的平均值,更加接近真实情况,这是造成误差又一原因。

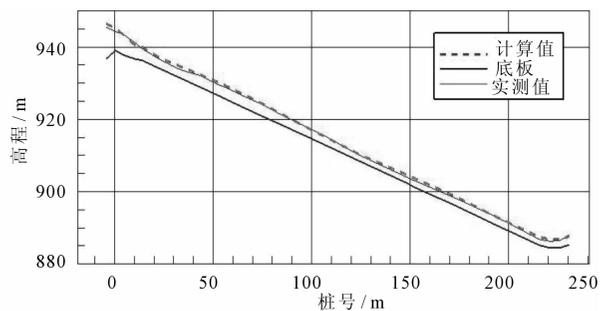
4.2 底板压强

实际工程中压强是一项很重要的指标,它决定着建筑物底板及边墙的设计荷载,同时,在压强较小和出现负压的地方容易发生空化、空蚀等现象,对建筑物的安全存在的一定的危险,因此在模型试验中,测量压强是一项重要的工作。

图 4 为模型试验资料与数值模拟计算结果的溢洪道底板压强分布对比,其中试验数据的压强是以水头形式体现,压强单位为 m,数值模拟计算中压强单位为 Pa,根据公式 $P = \rho gh$,其中 $1\text{MPa} = 10\text{ m 水头}$,得出水头 $h = \frac{P}{\rho g}$,单位为 m。从图中可见,数值计算的沿程压强分布与模型试验资料比较吻合,数值模拟在桩号 0+223.5 m(即挑流鼻坎底部)压强相对模型试验数值较大,其主要原因是试验中底板压强测量存在一定的误差,并且是一个点的压强不是整个断面的平均压强,这是造成误差的一个主要原因。

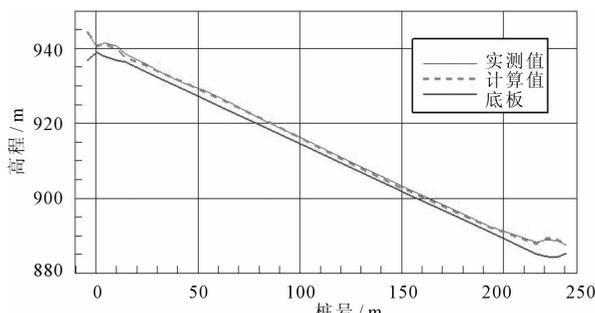


(a) 设计水位工况下

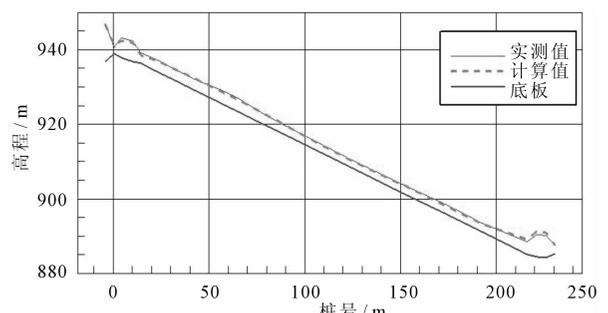


(b) 校核水位工况下

图 3 模型试验和数值计算水面高程对比



(a) 设计水位工况下



(b) 校核水位工况下

图 4 模型试验与数值计算底板压强对比

4.3 断面流速

在模型试验中采用毕托管和可移动指针支架装置对溢洪道泄槽段和挑坎内的典型断面进行了流速的测量,表2为溢洪道设计水位和校核水位两工况下部分断面平均流速数值计算值与实测值对照。从表中可见,伴随流量的增加,断面流速会有所增加,但增幅不大。试验数据与数值模拟计算数据均能反映断面流速变化情况,而且两者误差较小。

表2 模型试验和数值计算流速对比 m/s, %

桩号	设计水位			校核水位		
	实测值	计算值	误差	实测值	计算值	误差
0+004.30	8.227	7.777	-5.474	9.233	8.725	-5.502
0+023.30	13.080	12.112	-7.401	14.181	13.006	-8.287
0+053.30	16.647	17.123	2.858	17.523	17.909	2.203
0+075.80	19.866	19.920	0.272	19.764	20.563	4.040
0+125.05	23.432	24.939	6.431	24.888	25.427	2.166
0+151.55	22.116	26.808	21.214	24.350	27.035	11.027
0+216.00	27.170	29.638	9.084	31.208	29.768	-4.614
0+226.00	25.712	28.668	11.498	28.732	28.648	-0.291
0+231.00	24.900	28.560	14.700	28.376	28.200	-0.621

5 结 语

(1) 利用非恒定流标准 $k-\varepsilon$ 模型和追踪自由表面的VOF法,并且考虑了进口边界的影响,通过数值模拟计算,对阿拉沟水库溢洪道在设计水位和校核水位情况下进行了流场的紊流数值模拟研究,得到溢洪道的沿程自由水面线、沿程压强分布、速度场等数据,并将计算结果与模型试验结果进行了对比分析,结果表明数值模拟结果和实测资料基本吻合,水面线、沿程压强,各断面平均流速的实测值与

计算值误差较小。

(2) 数值模拟的结果表明数学模型计算能够准确反映不同边界条件下溢洪道的水流流态,为模型试验中的不足起到了一定数据的补充说明,并且通过模拟计算可以获得溢洪道在任何运行工况下任意位置的流场结构,其结果可以为阿拉沟水库溢洪道优化设计提供更为可靠的依据。

参考文献:

- [1] 屈磊飞,王林锁,陈松山,等. 闸站合建枢纽泵站三维水流的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2006,4(1): 15-17.
- [2] 刁明军,杨永全,王玉蓉,等. 挑流消能水气二相流数值模拟[J]. 水利学报,2003,34(9):77-82.
- [3] 巨江,刘少斌,杨晓池. Fluent软件在泄水工程中的应用[J]. 水力发电学报,2009,28(2):110-114.
- [4] 韩占忠,王敬,兰小平. Fluent流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:19-20.
- [5] 江帆,黄鹏. Fluent高级应用于实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [6] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 张凯,王瑞金,王刚. Fluent技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2010:2-3.
- [8] Speziale C G, Thangam S. Analysis of RNG based turbulence model for separated flows[J]. J Engng Sci. 1992, (10):1379-1388.
- [9] 张健,方杰,范波芹. VOF方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展,2005,25(2):67-90.
- [10] 李冰冻,李嘉,李克锋等. VOF方法在山区河流航道工程中的应用[J]. 中国水运,2009,9(2):26-28.