

阿拉沟水库溢洪道水流特性数值模拟

朱玲玲¹, 牧振伟¹, 龚厚建², 秦国强¹, 朱松¹, 杨海华¹

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆军区联勤部 建筑勘察设计院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 采用标准 $k \sim \epsilon$ 湍流模型, 利用 VOF 法追踪自由水面对阿拉沟水库溢洪道设计和校核工况下水面线、断面流态进行数值模拟, 并将两种工况下水流特性进行比较, 结果表明水面线实测值与计算值二者吻合良好, 各断面平均流速实测值与计算值误差在允许范围内。因此采用数值模拟能够反映不同工况条件下溢洪道的水流特性, 可为溢洪道结构设计提供可靠依据, 具有一定的实际应用价值。

关键词: 溢洪道; 数值模拟; VOF 法; 阿拉沟水库

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0022—04

Numerical Simulation for Flow Characteristics of Alagou Reservoir Spillway

ZHU Ling-ling¹, MU Zhen-wei¹, GONG Hou-jian², QIN Guo-qiang¹, ZHU Song¹, YANG Hai-hua¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Survey and Design Institute of Architecture, Lianqin Department of Xinjiang Military Region, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: The standard $k \sim \epsilon$ turbulence model and VOF method are employed to numerically simulate the water surface line and cross flow of Alagou Reservoir's spillway under design and check conditions, and the flow characteristics in two conditions are compared. The analysis result shows that both the measured value and calculated value of the water surface line are matched well, simultaneously, the measured value and calculated value of each sectional average velocity are within the error range. So the numerical simulation could reflect the spillway's flow characteristics under different working conditions, and provide reliable basis for the design of spillway structure, thus having a certain practical value.

Keywords: spillway; numerical simulation; VOF method; Alagou Reservoir

1 概述

溢洪道是水利枢纽主要泄水建筑物之一, 随着工程实践的发展、高水头电站的兴建, 溢洪道的泄流量越来越大, 对溢洪道的设计要求越来越高^[1]。

阿拉沟水库工程位于新疆维吾尔自治区托克逊县境内, 控制灌溉面积 133.3 hm², 水库总库容 4.45 × 10⁷ m³, 兴利库容 3.05 × 10⁷ m³, 死库容 8.50 × 10⁶ m³, 正常蓄水位 944.5 m, 设计洪水位 944.85 m, 校核洪水位 947.8 m, 是具有防洪、供水、灌溉等综合利用效益的中型水利工程。

阿拉沟水库溢洪道布置在右岸坝肩, 采用开敞式正槽溢洪道, 纵轴与大坝轴线夹角为 166.48°, 由

进水渠、控制段、泄槽和消能防冲设施四个部分组成。溢洪道进水渠采用分离式矩形断面, 底坡 $i = 0$, 渠长 14.3 m, 宽 28 m, 底板高程 936.75 m, 边墙采用底宽 6.5 m 的重力式挡土墙。控制段堰型采用驼峰堰, 堰顶高程 939.0 m, 堰高 2.25 m, 溢流堰设 3 孔, 单孔净宽 24 m, 中墩厚 2.0 m, 采用弧型工作闸门控制, 控制段长 16 m。堰后连接长 205.7 m 整体式矩形断面泄槽, 底宽由控制段处的 28 m 渐变 20 m, 渐变段长度 40 m, 侧墙采用悬臂式挡土墙, 底部厚度 3.55 m, 高度 5.5 m。泄槽末端采用挑流消能。

采用 FLUENT 计算流体力学软件, 对阿拉沟溢洪道设计洪水位 ($Z = 944.85$ m) 和校核洪水位 ($Z = 947.80$ m) 两种工况进行数值模拟, 通过计算分析两

收稿日期: 2012-05-02

修稿日期: 2012-06-10

基金项目: 新疆农业大学紧缺人才专业大学生创新项目资助

作者简介: 朱玲玲 (1988—), 女 (汉族), 河南南阳人, 大学本科, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 牧振伟 (1973—), 男 (回族), 河南南阳人, 副教授, 主要从事水力学及河流动力学的教学与科研工作。

种工况下水流流场内部水流特性,为溢洪道结构设计

提供可靠依据^[2-3]。阿拉沟溢洪道布置如图 1 所示。

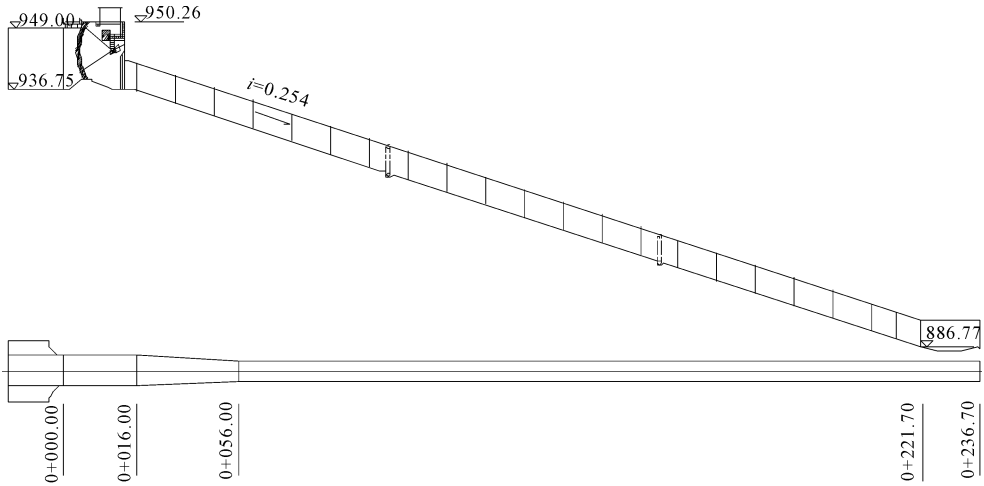


图 1 阿拉沟溢洪道布置图(单位:m)

2 数学模型

数值模拟采用标准 $k \sim \epsilon$ 湍流模型。标准 $k \sim \epsilon$ 湍流模型的连续方程,动量方程和 k, ϵ 方程分别表示如下:

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

紊动能方程(k 方程):

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

紊动能耗散率方程(ϵ 方程):

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

$$G_k = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

以上表达式中, $i = 1, 2, 3$, 即 $\{x_i = x, y, z\}$, $\{u_i = u, v, w\}$, j 为求和下标, μ 为运动粘滞系数, p 为修正压力, G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项, 方程中通用模型常数 $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, σ_k

$= 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

追踪模拟自由表面采用 VOF (Volume of Fluid) 方法进行处理^[4-6], 该方法采用一个流体容积分数来描述自由表面的各种变化, 在控制体内对第 q 相流体的容积分数规定为 $\alpha_q = 0$, 表示控制体内无 q 相流体, $\alpha_q = 1$, 表示控制体内完全充满 q 相流体, $0 < \alpha_q < 1$ 表示控制体内部分充满 q 相流体, 对所有流体的容积分数总和为 1, 即 $\sum \alpha_q = 1$ 。采用 VOF 方法追踪流体自由表面对第 q 相流体的控制微分方程为:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

流体自由界面的跟踪即通过求解该连续方程来完成, 具体位置采用几何重建格式来确定, 用有限体积法对控制方程进行离散求解, 数值计算采用基于同位网格的 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 法。

3 网格划分与边界条件

溢洪道计算区域整体是对称结构, 由于进口边界条件不对称, 以此对溢洪道整体进行了网格划分, 溢洪道进口引渠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划分, 而控制段与进口引渠段的连接处几何边界不规则, 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^[7]。计算区域网格总数 44 448, 节点总数 51 628, 整个计算区域网格划分见图 2。

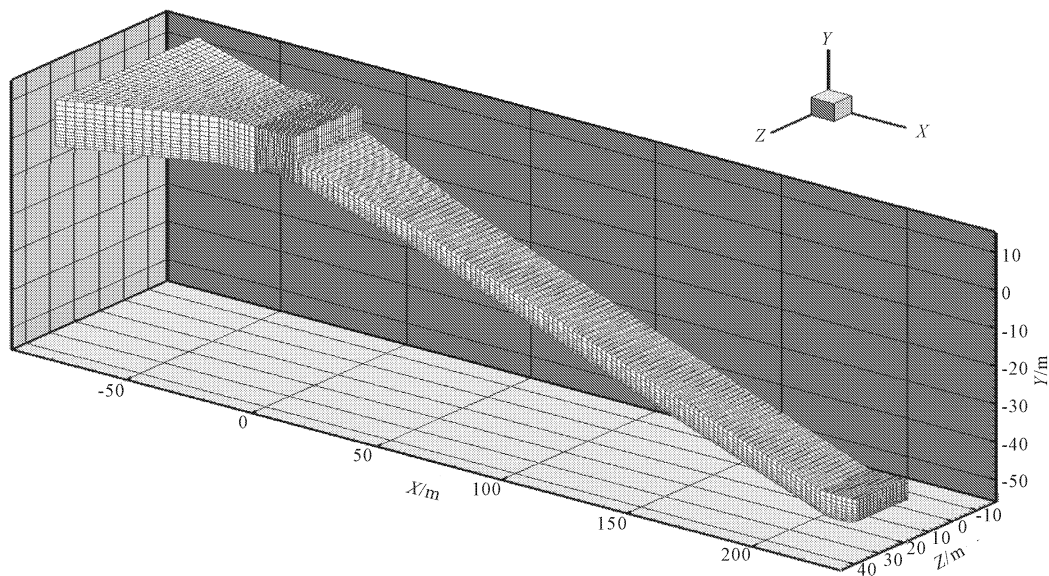


图 2 溢洪道计算区域网格划分

对于恒定流量的泄流,采用流速进口边界,整个溢洪道固壁采用无滑移边界,壁面边界采用壁面函数来处理,出口边界采用压强出口边界,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,自由表面采用 VOF 方法处理。

4 计算结果与分析

通过计算流体力学软件 FLUENT 进行模拟,得到溢洪道模拟区域内水面线、断面流态等流场特性。为使水流平顺稳定,流速分布均匀的进入渠道,溢洪道进水渠在数值模拟中采用喇叭形进口。

4.1 水面线

图 3 为溢洪道两种工况下沿程水面线。由图 3 可见,两种工况下溢洪道水面线计算值与实测值二者吻合良好,水流在驼峰堰后产生束窄现象,泄槽段水面雍高后下降,消能段水面在泄槽末端经过挑流消能后平顺流出。

4.2 断面流态

表 1 为阿拉沟水库溢洪道设计和校核洪水下断面平均流速,实际流速在水下 0.667 (水下相对位置)处测得,计算的是水相不同断面处的平均速度。由表 1 可知各断面平均流速计算值与实测值误差比较小,表明设计洪水位和校核洪水位下数值模拟与模型试验结果基本一致。图 4 为两种工况下不同断面水相体积分数,图 3 中模拟的水面线对应图 4 中水体积分数为 0.5,在泄槽段 $X = 53.3$ m 断面中,校核和设计工况下水体积分数都是中间高,两边低,而

在消能段 $X = 223$ m 断面中,校核工况下水流比较平顺。

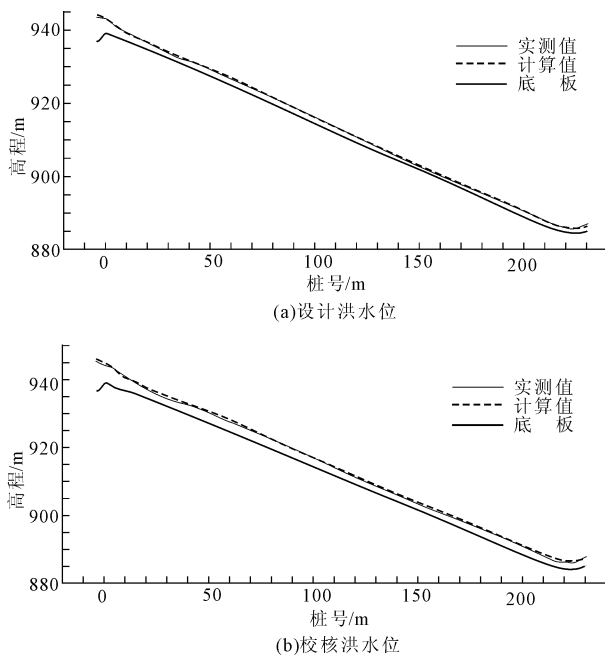


图 3 溢洪道两种工况下水面线

5 结论

(1) 通过对阿拉沟水库溢洪道进行数学模拟计算,得到溢洪道沿程水面线和断面流态等水流特性,数值模拟与模型试验结果基本一致,水面线实测值与计算值吻合良好,各断面平均流速实测值与计算值误差较小。

表 1 溢洪道断面平均流速

桩号	设计洪水位			校核洪水位		
	实测值 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	计算值 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差 $\%$	实测值 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	计算值 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差 $\%$
0+014.30	11.258	10.21	-9.310	12.347	11.206	-9.241
0+033.30	14.209	13.913	-2.082	15.254	14.700	-3.634
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+216.00	27.170	29.638	9.084	31.208	29.768	-4.614
0+221.00	26.534	29.218	10.114	29.849	29.307	-1.815

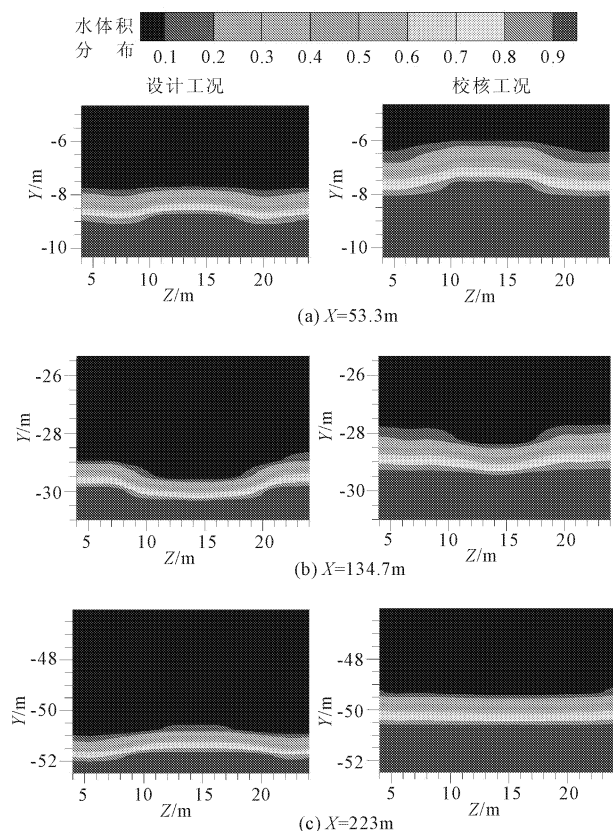


图 4 溢洪道两种工况下各断面水相体积分数

(2) 数值模拟计算结果表明采用标准 $k \sim \epsilon$ 湍流模型, 利用 VOF 方法模拟阿拉沟溢洪道内水流流态是可行的, 能够较准确的反映两种工况下的水流特性, 数值模拟结果对阿拉沟水库溢洪道结构设计提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 郑小玉. 溢洪道水力特性的数值模拟及实验研究[D]. 成都: 四川大学, 2004: 4-25.
- [2] 李斌华, 肖艳, 刁明军. 数值模拟在溢洪道体形优化中的应用[J]. 水力发电, 2010, 36(3): 36-38.
- [3] 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.
- [4] 丁道扬, 吴时强. 三维过坝水流数值模拟[J]. 水利水运科学研究, 1994, (3): 185-196.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 张志雁, 牧振伟, 万连宾. 克孜加尔溢洪道控制段体形优化的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(3): 69-72.