

新疆五一水库消力池悬栅消能水流 水力特性数值模拟

李园园, 牧振伟, 吴战营, 孙阳平, 王国伟, 王军委

(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 RNG $k-\epsilon$ 模型, 利用 VOF (Volume of Fluid) 流体体积法追踪自由水面, 对迪那河五一水库导流洞出口悬栅消力池内水流水力特性进行数值模拟, 将计算的沿程水深、底部压强、流速与物理模型试验结果进行对比, 计算值与实测值吻合较好。通过数值模拟研究, 弥补了物理模型试验不足, 为实际工程设计提供参考。

关键词: 悬栅消力池; RNG $k-\epsilon$; 水流流态; VOF

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)06-0061-03

Numerical Simulation for Flow Pattern in Grid-suspended Plunge Pool of Wuyi Reservoir in Xinjiang

LI Yuan-yuan, MU Zhen-wei, WU Zhan-ying, SUN Yang-ping,

WANG Guo-wei, WANG Jun-wei

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

Abstract: The RNG $k-\epsilon$ turbulence model and VOF (Volume of Fluid) method are employed to numerically simulate the flow pattern in the grid-suspended plunge pool of the diversion tunnel outlet of Wuyi Reservoir. The computation results of the water depth along the way, the pressure on the bottom and velocity of the grid-suspended plunge pool are in agreement with those from experiments and measurements. The simulation of flow pattern could overcome the shortages of physical model test and provide references for practical engineering design.

Keywords: grid-suspended plunge pool; RNG $k-\epsilon$; flow pattern; VOF

0 引言

在工程中, 为了保证水流正常平稳的流向下游, 防止河床冲刷, 尽可能消除水流的动能, 消除波状水跃, 常采用消力池进行消能^[1]。因此, 它的完善对水利枢纽的安全运行有直接影响, 当前水工设计中采用的消能方式有底流式、面流式和挑流式三种, 针对不同的水头及地形条件采用不同的消能方式, 最常用的是底流式^[2]。然而, 在新疆五一水库中, 导流洞出口若采用底流消能, 在低水头、大单宽流量及高水头、大流量的泄水建筑物中均适用^[3], 水流流态虽然稳定, 但底孔泄流如果要兼顾排沙功能, 消力池内就不宜采用辅助消能工, 考虑到地形、消力池尺寸的限制,

可以通过加悬栅提高消能率, 保证建筑物安全。

水利工程研究中数学模型已被广泛应用, 它为原型提供了简洁的形式化语言, 有助于人们全面、系统的把握问题的全部特征或结构^[4]。对不同工况进行研究时较方便、简洁, 可以克服模型试验的一些不足之处, 使试验快速、准确和全面地进行, 另外还可以对模型试验进行检验, 在研究中采用 VOF 流体体积法对悬栅消力池进行数值模拟, 为设计研究提供可靠的依据。

1 工程概况

迪那河五一水库枢纽工程位于新疆巴音郭楞蒙古自治州轮台县群巴克乡境内, 具有工业供水、防

洪、灌溉等综合效益。

水库正常蓄水位 1 370.0 m, 设计洪水位 1 370.3 m, 校核洪水位 1 373.14 m。初期导流最高水位 1 322.16 m, 导流隧洞泄流量 402.86 m³/s, 导流兼泄洪冲沙洞导流; 后期导流最高水位 1 331.60 m, 导流隧洞泄流量 474.97 m³/s 导流兼泄洪冲沙洞导流。设计洪水下, 导流隧洞泄流量 758.48 m³/s, 校核洪水下, 导流隧洞泄流量 722.99 m³/s, 导流洞出口采用消力池消能, 消力池底部高程为 1 275.0 m, 消力池边墙高 18 m, 消力池深 8.4 m, 消力池宽度 16 m。由于原消力池达不到预期消能效果, 因此通过设置悬栅改善池内水流条件, 最大程度消能, 图 1 为悬栅消力池结构尺寸图。

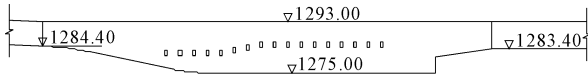


图 1 悬栅消力池结构尺寸

2 数学模型^[5]

2.1 VOF 方法

在数模计算中, 采用 VOF 法以流体在网格中所占的体积比函数 F 来构造和追踪自由面。

对流场中任意一点 (x, y) , 定义函数 $f(x, y)$ 如下:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{在 } (x, y) \text{ 点有流体质点} \\ 0 & \text{在 } (x, y) \text{ 点没有流体质点} \end{cases}$$

守恒形式的传输方程表示为:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial(uf)}{\partial x} + \frac{\partial(vf)}{\partial y} = 0$$

通过求解该连续方程来完成水气界面的跟踪, 采用集合重建格式来确定自由水面的具体位置。

2.2 控制方程

不可压缩非定常流的基本微分方程包括连续方程、动量方程、紊动能 k 方程及紊动能耗散率 ϵ 方程。可分别表示如下:

连续方程:

$$\partial u_j / \partial x_j = 0 \quad (1)$$

动量方程:

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

紊动能方程 (k 方程):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v + v_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \epsilon \quad (3)$$

紊动能耗散率方程 (ϵ 方程):

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v + v_\tau}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

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; 方程中通用模型常数 $C_{\mu} = 0.09$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

采用有限体积法对控制方程进行离散, 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

建立二维数学模型, 消力池模拟区域范围: 桩号 0+467.617-0+684.045。

由于原消力池几何边界较规则, 因此, 采用四边形结构网格进行网格划分, 而在悬栅消力池中, 悬栅的置入, 使得池中悬栅周围几何边界不规则, 则布置了三角形非结构网格。为获得精确数据, 对悬栅消力池悬栅附近进行局部网格细化, 整个模拟区域的计算网格划分见图 2。

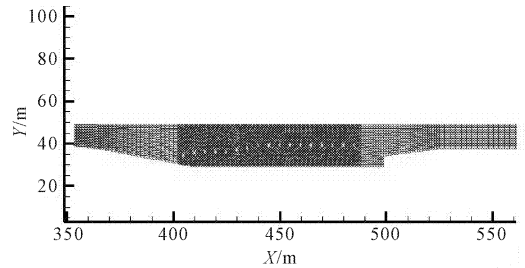


图 2 悬栅消力池计算网格划分

对于恒定流量的泄流, 采用速度进口边界。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

通过运用 FLUENT 流体力学软件对水流运动进行模拟计算, 得到消力池模拟区域沿程水深、底部压强、流速等水力参数。将校核工况下的悬栅消力池数值计算与模型试验的数据进行对比。

4.1 沿程水深

图 3 为悬栅消力池内水深计算值与实测值的对比情况。从图 3 中可以看出, 悬栅消力池内计算水

深与模型试验值基本相符合,在桩号 0+600.0 m 处水深略有增大,主要由于栅条引起水跃后移造成的。在图 3 中,模型试验与数值计算均能反映池内水深变化情况,并且二者误差较小。

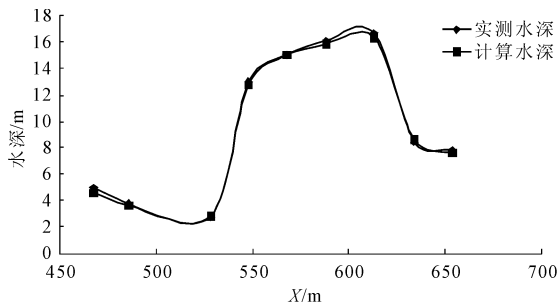


图 3 悬栅消力池模型试验和数值计算水深对比

4.2 底部压强

在实际工程中,压强经常起着决定性的作用,通常在压强较小或有负压的区域易引起空蚀、气蚀等破坏^[3],因此在模型试验中,测量压强是重要^[6]的。图 4 为悬栅消力池底部压强计算值与实测值的对比情况。从图 4 中可以看出,数值计算的压强分布与模型试验实测值较好的吻合,数值计算弥补了模型试验中测压点布置不准确的缺点。

4.3 流速

在工程设计中,流速对比是确定断面尺寸、能量变化的有效途径。图 5 为悬栅消力池内流速计算值与实测值的对比。从图 5 中可以看出,消力池内水流流速计算值与模型试验情况总体上是一致的。在悬栅消力池内,水流与栅条碰撞产生损失,导致流速

降低,数值计算更确切的反映这一变化,确定出各断面的流速值。

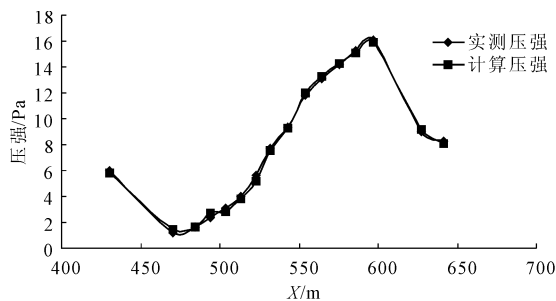


图 4 悬栅消力池模型试验与数值计算底部压强对比

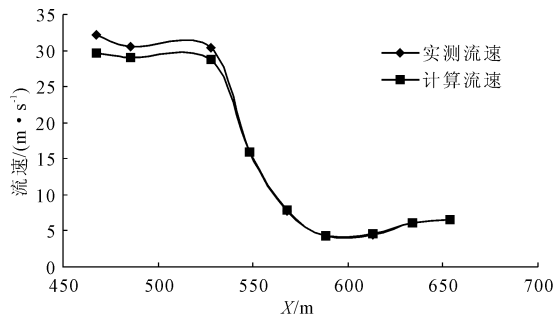


图 5 悬栅消力池模型试验与数值计算流速对比

4.4 水流流态

对加悬栅和不加悬栅的消力池,通过水汽两相体积分数的对比,从而对水流流态进行分析。在图 6 中,白色线下方区域代表水流,白色线上方区域代表气体,白色线之间为水汽混掺区域,可以看出,悬栅消力池池内水跃跃前断面后移,在水流与栅条相碰撞时产生了能量损失,从而更好的达到消能效果。

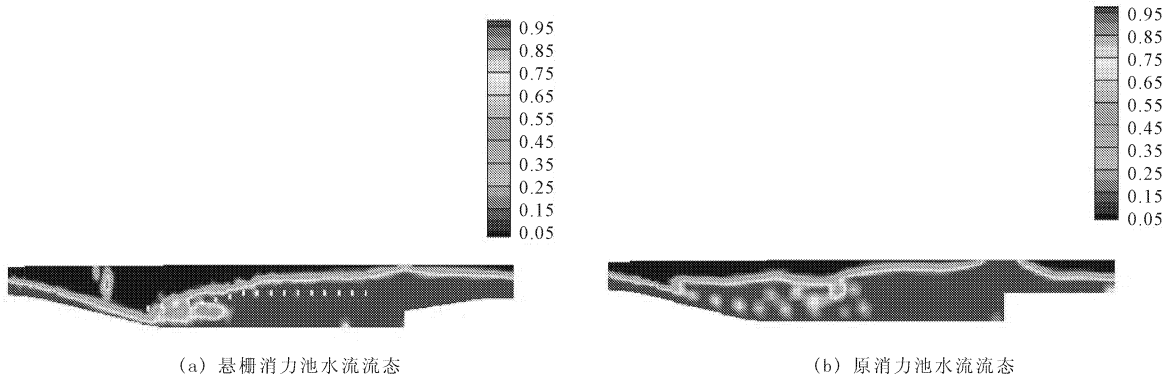


图 6 消力池加悬栅和不加悬栅水流流态

5 结 论

(1) 利用恒定流 RNG $k-\epsilon$ 模型和追踪自由表面的 VOF 法,对五一水库消力池整体进行了数值模拟研究,通过计算,得到了消力池内沿程水深、底部压

强、流速等水力参数,并将数模计算结果与物理模型试验结果对比分析,结果表明吻合较好。

(2) 通过模拟计算可以获得消力池内任意位置的流场结构,弥补模型试验仅测量底板中线上数据的缺陷,为消力池优化设计提供了可靠的依据^[7]。

(下转第 101 页)

(上接第 63 页)

参考文献:

- [1] 侯 杰,成 军,邱秀云,等.悬栅消能工水力特性研究[J].新疆农业大学学报,2003,26(3):1-7.
- [2] 邱秀云,侯 杰,王 锴.无压隧洞洞内消能试验研究[J].新疆农业大学学报,2004,27(3):62-65.
- [3] 吴战营,牧振伟,潘光磊.导流洞出口消力池内设置悬栅消能工试验研究[J].水利与建筑工程学报,2011,9(4):39-41.
- [4] 李谊乐,刘应中,缪国平.二阶精度的 VOF 自由面追踪方法及其应用[J].船舶力学,1999,3(1):44-45.
- [5] 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.
- [6] 李风兰,侯 杰,邱秀云,等.悬栅消力池消能特性的试验研究[J].新疆农业大学学报,2006,29(1):63-66.
- [7] 侯 杰,唐 毅.悬板分层水流流动特性的测试研究[J].新疆农业大学学报,1997,20(1):56-60.