

# 溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究

王海军<sup>1,2</sup>, 张凡<sup>1,2</sup>, 李会平<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 临底流速是影响泄流结构安全的一项重要因素。采用 Fluent 软件中 RNG  $k-\epsilon$  和 VOF 模型对某溢洪道泄流临底流速进行了数值仿真模拟研究。数值模拟结果的水流流态和水深等与溢洪道泄流原型观测数据基本一致, 验证了所采取数值仿真模拟方法的合理性。在此基础上, 系统分析了该溢洪道临底流速的分布规律。结果表明: 工程实际冲刷破坏处与仿真结果中最大临底流速及近底侧临底流速最大梯度出现位置是吻合的, 可见临底流速及其变化梯度是引起溢洪道冲刷破坏的主要原因之一。

**关键词:** 溢洪道; 临底流速; 数值仿真; 流速梯度; 冲刷破坏; 原型观测

中图分类号: TV651.1; TV135.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0128-05

## Research on numerical simulation of underflow velocity distribution of spillway discharge

WANG Haijun<sup>1,2</sup>, ZHANG Fan<sup>1,2</sup>, LI Huiping<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety of Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering of Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Underflow velocity is an important factor affecting the safety of discharge structures. Based on RNG two-equation turbulence model and volume of fluid (VOF) model of the Fluent software, the simulation method of spillway discharge was studied. The flow regime and water depth of the spillway discharge simulation are almost consistent with the prototype observation, verified that the numerical simulation method is rational. With this method, the distribution of the underflow velocity of the spillway discharge was analyzed. The results showed that the position of actual scouring damage is consistent with the position of the maximum underflow velocity and the maximum gradient of the underflow velocity near the bottom of the numerical simulation. It showed that underflow velocity and its gradient should be one of the main reasons which cause the scouring damage of the spillway.

**Key words:** spillway; underflow velocity; numerical simulation; velocity gradient; scouring damage; prototype observation

## 1 研究背景

随着我国高坝建设的快速发展,泄水建筑物水头越来越高。溢洪道是水利枢纽中重要的泄洪建筑物。随着下泄流量增大,对溢洪道的过流能力及结构的安全性要求越来越高。溢洪道的过流能力及其壁面压强、临底流速的分布情况等因素都对溢洪道泄水、消能有重要的影响<sup>[1]</sup>。临底流速是底流消能

工的一项重要水力学指标,同时也是影响结构安全的一项重要因素。传统的溢洪道消力池水力特性分析主要是采用物理模型试验法<sup>[2]</sup>以及原型观测法,尤其是前者,在已做的工程设计和水力静动力特性研究中起到了极为重要的作用。杨敏等<sup>[1]</sup>利用物理模型试验的方法对跌坎消力池的临底流速进行了探究,分析比较了跌坎消力池与传统消力池的临底流速分布规律;王立杰等<sup>[3]</sup>采用物理模型试验的方

收稿日期:2018-06-07; 修回日期:2018-08-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401902);天津市重点领域创新团队项目(2014TDA001);国家自然科学基金项目(51509180)

作者简介:王海军(1978-),男,江西萍乡人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水工结构静动力特性研究。

法针对新型射流消能的流态演变与极限临底流速进行了研究,同时也发现,在采用物理模型试验时,模型建立较为复杂、成本较高、测量精准性难以保证,且存在比较大的简化,比尺效应影响较大。随着近年来计算机技术的发展及数值计算方法的完善,采用数值模拟方法分析研究复杂水流也成为经济有效的手段。基于计算流体力学的大型商业软件 Fluent、Flow-3D 等的开发利用,水利领域的数值仿真模拟也得到快速发展<sup>[4]</sup>。李玲等<sup>[5]</sup>研究了三维 VOF 模型及其在溢洪道水流计算中的应用;薛宏程等<sup>[6]</sup>对溢洪道出口斜切型挑坎挑射水舌进行了三维数值模拟;王青等<sup>[7]</sup>基于 Flow-3D 对陡坡弯道水流进行了三维数值模拟;李树宁等<sup>[8]</sup>对不同体型参数的跌坎型消力池进行了数值模拟计算,为工程设计提供依据等。

本文采用 Fluent 软件,对某水电站溢洪道泄洪进行精细数值模拟,结合该水电站原型观测数据,验证所采取数值模拟方法的合理性。并在此基础上探寻溢洪道水流临底流速的分布规律及临底流速梯度对溢洪道结构安全的影响。

## 2 临底流速模拟方法

临底流速的数值模拟主要包括基本的流体控制方程、自由液面 VOF 模型、模型求解方法。

### 2.1 控制方程

将连续性方程和不可压缩黏性流体运动的 Navier-Stokes 方程作为流体运动的控制方程,紊流模型采用的是 RNG  $k-\varepsilon$  模型<sup>[9]</sup>。

(1) 连续性方程

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

式中:  $u_i$  为  $i$  方向的速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $x_i$  为坐标方向; 下标  $i$  为变量的不同方向,取值 1、2、3。

(2) 运动方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} + f_i \quad (2)$$

式中:  $f_i$  为作用于单位质量水体的质量力,  $\text{m/s}^2$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $p$  为压强,  $\text{N/m}^2$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u_j$  为  $j$  方向的速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $x_i, x_j$  为坐标方向(下标  $i, j$  为变量的不同方向,取值 1、2、3)。

(3)  $k$  方程

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \varepsilon \quad (3)$$

式中:  $G_k$  为剪切产生项,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $G_b$  为浮力产生项,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $k$  为单位质量紊动动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$  为紊动动能耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $\nu$  为运动黏性系数,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\nu_t$  为紊流运动黏性系数,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ 。

(4)  $\varepsilon$  方程

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (4)$$

式中:系数  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  为常量;  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  为  $k$  方程和  $\varepsilon$  方程的 Prandtl 数;  $R_\varepsilon$  为附加项,  $\text{m}^2/\text{s}^4$ , 以适应瞬变流和流线弯曲的影响<sup>[10]</sup>。

### 2.2 VOF 模型

VOF 模型(volume of fluid)基本原理是通过研究网格单元中流体与网格体积比函数来追踪自由液面。相比于 Mixture 模型与欧拉模型更加适用于计算任意气液分界面的分界面。VOF 模型中不同的流体共用一套运动方程,通过引进相体积分数这一变量,实现对每一个计算单元相界面的追踪。在每个控制容积内,所有相体积分数额总和为 1,所有变量及其属性在所控制容积内各相共享,且代表了容积的平均值。在任何给定控制容积内的变量和其属性代表了一相或多相的混合。假设单元内第  $m$  相流体的体积分数为  $\alpha_m$ ,则存在 3 种情况:

(1)  $\alpha_m = 0$ , 单元体积内不存在第  $m$  相流体;

(2)  $0 < \alpha_m < 1$ , 单元体积内包含了第  $m$  相流体和其他一相或多相流体,且存在着不同相流体之间的交界面;

(3)  $\alpha_m = 1$ , 单元体积内充满第  $m$  相的流体。单元体积内具有相同的速度和压力场。

在 VOF 模型中,追踪第  $m$  相流体自由水面的控制微分方程为:

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_m}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

通过对该方程的求解可以完成自由水面的追踪<sup>[11-14]</sup>。

### 2.3 模型求解方法

流场计算采用的是有限体积法,其是一种分块近似的计算方法。具体的将计算区域划分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积,这样计算区域被离散成许多小的体积单元,然后将待解的微分方程对每一个小单元体进行积分,便得出一组离散方程解。其求解方法分为分离解法和耦合解法两大类。具体的扩展分为 SIMPLE

算法以及在其基础上改进的 SIMPLEC、SIMPLER、PISO 算法。由于 PISO 算法对瞬态问题有明显的优势<sup>[15]</sup>,故本模拟采用 PISO 算法。

### 3 临底流速仿真模拟

#### 3.1 工程简介

某工程采用了溢流表孔底流消能的泄洪消能方式。泄洪建筑物的泄水孔为开敞式表孔,总共分为 5 孔,单孔尺寸为 13 m×20 m。边墩、中墩厚度分别为 4.0 和 5.0 m,溢流坝段总宽为 93.0 m;孔口设有检修平板门和弧形工作门,闸墩前缘呈尖圆流线形,溢流坝堰顶高程为 1 398.0 m。堰面为 WES 曲线,曲线末端接 1:0.75 直线段和半径  $R=55$  m 的反弧段;溢流坝后为长约 200.0 m 的泄槽和 170.0 m 的消力池,入池跌坎高 6.0 m,池底高程 1 276.5 m,消力池后设海漫与河床平顺连接。溢洪道纵剖面示意图如图 1 所示。

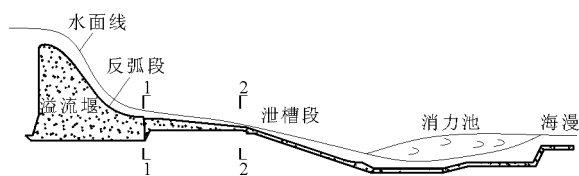


图 1 溢洪道剖面示意图

#### 3.2 模拟步骤

模型计算求解步骤为:(1)在 Auto CAD (前处理器)中建立几何模型。(2)将模型导入 ICEM 中,进行网格的划分。(3)将划分完成的网格模型导入 Fluent 中,并设置相关参数。参数设置包括计算模型选取、材料属性和边界条件设定以及求解方法的选取和运行环境的设置等。(4)对流场的初始化、求解。(5)进行计算结果的后处理及结果的分析。

#### 3.3 ICEM 精细网格划分

网格的划分是流场数值模拟的重要环节。网格质量的高低直接影响计算精度及收敛速度。溢洪道泄流的模拟范围大、流道体型复杂,本文研究分析的

重点是临底流速分布,因此在网格划分时,近底处进行了细化加密,上部网格适当放大。计算模型约  $525 \times 10^4$  个节点,约  $498 \times 10^4$  个网格。

#### 3.4 边界条件

模型自由表面的处理采用 VOF 模型,边界条件采用压力进出口边界条件。模型进流边界为压力进口,给定进水口水头;出流边界为压力出口,给定出口水头;固壁面采用无滑移壁面,法向和切向速度均为 0。

### 4 模型验证

利用建立的溢洪道三维数学模型,对已进行过原型观测的工况进行模拟计算。采用 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 孔全开工况(表 1 中工况 1)的模拟结果进行验证,此工况堰上水头为 117.15 m,下游水头 13.50 m,溢洪道流量  $3\ 336\ \text{m}^3/\text{s}$ 。比较数值模拟计算值和原型观测值,对所建立的数学模型进行验证。

#### 4.1 水流流态验证

溢洪道纵剖面水气相分布如图 2 所示。从图 2 可以看出水流出闸室后,沿溢流面下泄,水流在溢流堰曲线段水流平顺下泄,出闸室后的水流横向扩散。水流沿溢流堰面急速下泄至消力池内,水流在消力池内剧烈掺混,充分消能,出消力池后水流趋于平顺泄向下游,消力池消能效果较好。整个过程水流在溢流堰反弧段与泄槽陡坡段水深均较小。模拟水流流态与原型观测流态分布基本一致,原型观测如图 3 所示。

#### 4.2 水面线验证

提取自由液面水深和实测水深对比,图 4 为 3<sup>#</sup> 孔中心线处溢洪道水深模拟计算值与原型实测值比较图(横坐标为分析位置距离坝趾的距离),二者吻合度较好。溢流堰陡坡处水深下降迅速,至消力池后水深迅速增加,出消力池后水深开始减小。

通过流态和水面线验证,数值仿真模拟与原型观测结果基本吻合,可见数值仿真模拟结果可作为原型观测数据的补充。

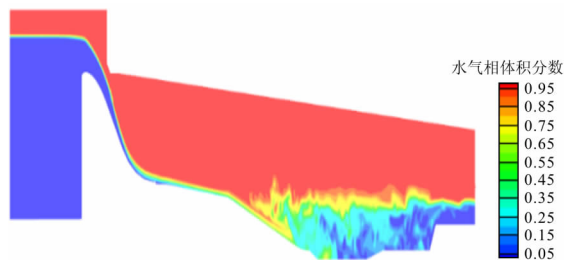


图 2 溢洪道纵剖面水气相分布



图 3 原型观测水流流态

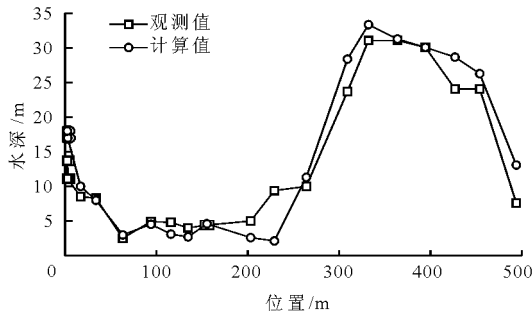


图 4 水深计算值与观测值对比图

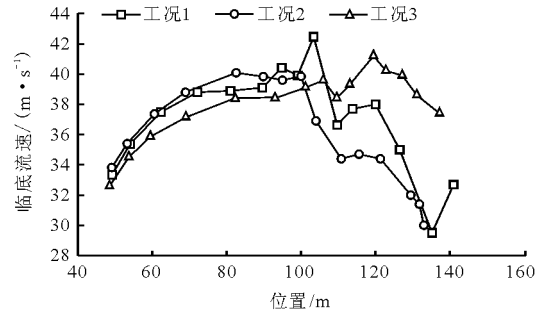


图 5 纵向最大临底流速变化趋势图

### 5 临底流速分布规律

分别选取原型观测中出现的最大流量、最小流量以及中间流量 3 种典型工况进行数值模拟,从而分析临底流速分布规律。具体工况如表 1 所示,

表 1 3 种模拟工况表

工况	开孔	上游水头/m	下游水头/m	实测流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	模拟流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
1	3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 孔全开	117.15	13.50	3336	3617
2	3 <sup>#</sup> 孔全开	118.48	9.33	1900	2105
3	1 <sup>#</sup> 、3 <sup>#</sup> 、5 <sup>#</sup> 全开	118.00	12.92	9645	10032

分析 3 种模拟工况,提取 3<sup>#</sup>孔中轴线的纵向最大临底流速分布,如图 5 所示。从数值仿真结果可知,纵向不同断面临底流速最大值顺水流方向呈现先增大后减小的趋势。同时观察到在 1-1 断面

(距离坝址 102 m,见图 1)和 2-2 断面(距离坝址 200 m,见图 1)的临底流速最大值在工况 3 时分别达到了 42.24 和 44.95 m/s,如表 2 所示。

图 6~7 为 3 种工况下,3<sup>#</sup>孔中轴线在 1-1 断面与 2-2 断面处距离底板不同位置临底流速变化曲线图,可以发现在这两个断面处近底侧流速梯度均较大,最大值出现在工况 3 的断面 2 处,达到了 52.3 m/(s·m),具体值见表 2。

表 2 不同断面最大临底流速和流速梯度

工况	临底流速/( $m \cdot s^{-1}$ )		流速梯度/( $m \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ )	
	1-1 断面	2-2 断面	1-1 断面	2-2 断面
1	42.60	41.10	31.1	24.0
2	38.60	36.40	24.2	19.9
3	42.24	44.95	20.4	52.3

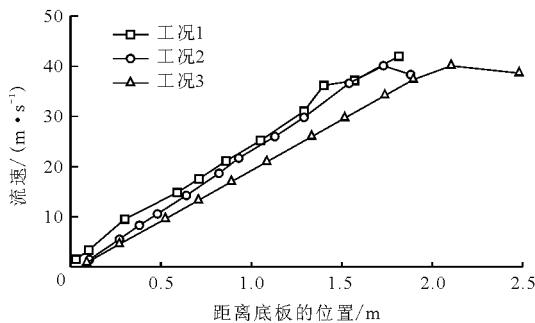


图 6 1-1 断面临底流速曲线图

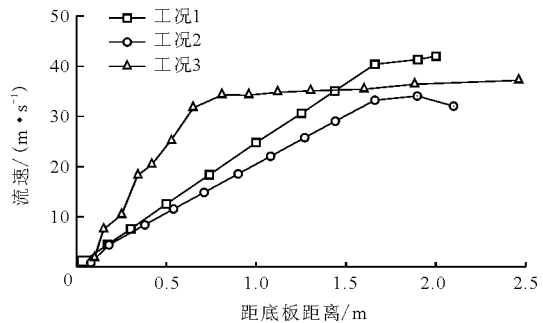


图 7 2-2 断面临底流速曲线图

3 种工况下溢洪道中轴线处近底板处的湍流动能如图 8 所示,可见在 1-1 断面和 2-2 断面处湍流动能值并不是最大值,其湍流动能值相对于最大值处在一个较小的范围内。

结合原型观测情况,发现在 1-1 断面和 2-2 断面处前后均发现了底板以及墙体的冲刷破坏,如图 9、10 所示。对比发现与数值模拟发现的临底流速变化规律相吻合。即原型底板发生破坏处临底流速、流速梯度均较大。

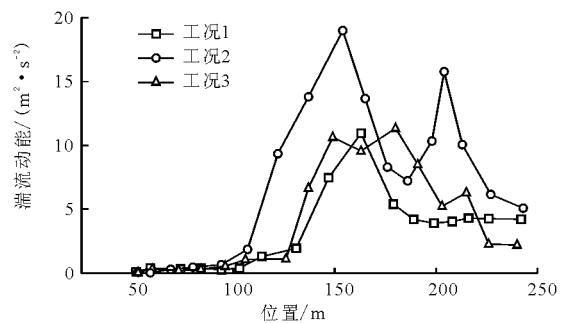


图 8 中轴线处湍流动能变化曲线



图9 工程反弧段破坏照片



图10 2-2断面附近侧壁破坏照片

由于临底流速的增大,在近底处边界层变薄,流速梯度增大,根据于洪银等<sup>[16]</sup>的研究,过大的流速梯度是工程冲刷破坏的主要原因之一,可见该工程出现冲刷破坏的主要原因之一是局部临底流速及其梯度过大。

## 6 结 论

(1)通过工程原型观测数据与数值仿真结果对比表明,采用 RNG  $k - \varepsilon$  和 VOF 模型仿真模拟溢洪道泄流是可行的。在此基础上开展泄流临底流速分布规律研究,可有效解决原型或模型临底流速难以测量的问题。

(2)工程实际冲刷破坏处与临底流速数值仿真中最大临底流速及近底侧临底流速最大梯度出现位置是吻合的,可见引起该工程冲刷破坏的主要原因之一是局部临底流速及其梯度过大。

### 参考文献:

- [1] 杨敏,李会平,李树宁,等. 跌坎消力池临底流速试验研究[J]. 天津大学学报,2013,46(4):342-346.
- [2] 吴守荣,张建民,许唯临,等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):37-42.
- [3] 王立杰,牛争鸣,张蕊萃,等. 新型射流消能的流态演变与极限临底流速研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(S1):8-13.
- [4] 耿敬,马世领,李刚,等. 龙头桥水库溢洪道流场数值模拟及优化研究[J]. 水力发电学报,2017,36(10):74-83.
- [5] 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.
- [6] 薛宏程,刁明军,岳书波,等. 溢洪道出口斜切型挑坎挑射水舌三维数值模拟[J]. 水利学报,2013,44(6):703-709.
- [7] 王青,黄细彬. 基于 Flow-3D 的陡坡弯道水流三维数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):145-149.
- [8] 李树宁,张文静,张庆华. 跌坎消力池体型优化数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(3):95-100.
- [9] 闫晓惠,陈新,李华煜. 基于标准和 Realizable  $k - \varepsilon$  湍流模型的阶梯式溢洪道流的数值模拟[J]. 水利科技与经济,2015,21(10):29-31.
- [10] 段中喆. ANSYS FLURNT 流体分析与工程实例[M]. 北京:电子工业出版社,2015.
- [11] 张志雁. 基于 FUENT 的溢洪道数值模拟[J]. 甘肃水利水电技术,2016,52(11):14-16+33.
- [12] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics,1981,39(1):201-225.
- [13] 关大玮,程香菊. 基于 VOF 模型的溢流坝三维水流数值模拟[J]. 中国水运(下半月),2015,15(6):51-55+59.
- [14] 尹杨松. 基于 VOF 法的自由跌水水力特性研究[J]. 四川水利,2018,39(1):3-6.
- [15] 李国杰,黄萌,陈斌. 基于 PISO 算法的非结构化网格 VOF 算法[J]. 工程热物理学报,2013,34(3):476-479.
- [16] 于洪银,李建中. 低佛氏数水跃下游水流紊动特性的试验研究[J]. 陕西水力发电,1991,(2):24-31+39.