

宽尾墩消力池非恒定流动水压强特性数值模拟

邱春^{1,2}, 刘承兰¹

(1. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型结合动网格技术对某工程 Y 型宽尾墩泄洪表孔弧形闸门开启过程进行了三维动态数值模拟研究。分析了闸门开启总时间、堰顶水头及下游初始尾水深对反弧及消力池压强的影响; 定义了闸后水流的三种流态; 分析了反弧及消力池三个区域压强特性。研究表明, 闸门开启总时间越小, 闸后水流滞后越明显, 冲击区滞后最大压强越大; 闸门开启过程中, 冲击区最大压强与堰顶水头近似成线性关系; 且其与调节区平均压强差随着下游尾水深度的增加而迅速减小。部分结果与试验数据吻合良好, 说明数值方法是可靠的, 可为水工闸门的合理运行提供借鉴。

关键词: 三维动态数值模拟; 开启过程; 非恒定流; 动网格; 弧形闸门; 消力池

中图分类号: TV 652.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)04-0721-05

Numerical simulation of unsteady hydrodynamic pressure in the stilling basin of flaring gate pier

QIU Chun^{1,2}, LIU Chenglan¹

(1. Sichuan College of Architecture Technology, Deyang 618000, China;

2. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The RNG $k-\epsilon$ turbulent model and dynamic mesh technology were applied to simulate the unsteady flow in the stilling basin of Y-shaped flaring gate pier during the process of radial gate opening. The effects of total gate opening time, water head over weir, and initial downstream water depth on the pressures of anti-arc and stilling basin were analyzed. Three different flow patterns were defined according to different gate opening velocities. The pressure characteristics of anti-arc and stilling basin were obtained. The results showed that (1) if the total gate opening time is shorter, flow lagging behind the gate is more obvious and the lagged maximum pressure is higher in the impact zone; (2) there is a linear relationship between the maximum pressure and water head in the impact zone during the gate opening process; and (3) the difference between the maximum pressure in the impact zone and average pressure in the adjusting zone decreases with the increasing of downstream water depth. The simulation results agreed well with the experimental data, which suggested that the numerical simulation method is reliable and can provide important reference for the reasonable operation of hydraulic gate.

Key words: three dimensional dynamical numerical simulation; opening process; unsteady flow; dynamic mesh; radial gate; stilling basin

水工闸门是水工建筑物中挡水和控制流量的重要设备, 对于一般的泄水建筑物而言, 为了有效调节库容, 闸门经常需要动水启闭, 国内水利工程由于闸门运行方式的不合理引起下游冲刷破坏的案例时有发生。因此了解闸门启闭过程中水流水力特性, 对于防止消能设施发生破坏有着重要意义。

水利工程中表孔弧形闸门泄洪的情况较为常见, 其水流属明流水气二相流, 其边界条件及过程较复杂, 给试验数据测量带来了较大困难, 作为模型试验的补充, 直接动态数值

模拟更容易得到过程中各时刻水力要素特性。文献[1]模拟了蓄水池闸门开启过程中水体流动, 但和实际情况有差别, 文献[2]分析了孔板泄洪洞事故闸门动水下门过程闸室噪音和振动的成因, 文献[3]采用数值模拟对梯形渠道中闸门不同调控方式引起的非恒定流进行了研究, 文献[4]对湖南镇水电站闸门不同开启组合下水舌扩散形态对下游的影响进行了试验研究, 文献[5]通过数值模拟研究了不同长度的单一渠段的非恒定流响应过程, 文献[6]采用动网格技术对弧

形闸门开启过程数值模拟进行了初步探索。本文采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程模型结合动网格技术对某电站溢流表孔 Y 型宽尾墩加消力池非恒定流进行了三维数值模拟研究, 重点分析闸门开启速度、堰顶水头及下游初始水深对非恒定流压强等水力特性的影响。

1 数学模型

控制方程如下。

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

动量方程

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

k 方程

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

ϵ 方程

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

式中: ρ 和 μ 分别为体积分数的密度和分子黏性系数; p 为压力; k 为紊动能; ϵ 为紊动能耗散率; x_i 表示 x, y, z ; u_i 表示 u, v, w ; $i, j = 1, 2, 3$ 为求和指标; t 为时间; μ_t 为紊流黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, 其中: C_μ 为经验常数, 取 $C_\mu = 0.0845$;

$\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$; $C_{1\epsilon} = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为 ϵ 方程常数, $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$ 。 $\eta = (2E_j E_j)^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$, $E_j = \frac{1}{2}$

$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$; G_k 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 。

采用有限体积法对上述方程进行离散, 时间和空间均采用二阶精度格式, 压力速度耦合采用压力隐式算子分割法 PISO 算法。采用 VOF 法^[7] 跟踪自由水面, 此方法的 $k-\epsilon$ 紊流模型方程式(1)~式(4)与单相流形式相同, 但 ρ 和 μ 是体积分数的函数, 可由下式表示:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \quad (6)$$

式中: α_w 为水的体积分数; ρ_w 和 ρ_a 分别为水和气的密度。 μ_w 和 μ_a 分别为水和气的分子黏性系数。动网格模型用于描述边界或流体内部物体的变形及运动, 对于通量 φ 的积分形式的守恒方程如下:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_{\partial V} \rho \varphi (\bar{u} - \bar{u}_s) \cdot d\bar{A} = \int_{\partial V} \Gamma \Delta \varphi \cdot d\bar{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (7)$$

式中: ∂V 为控制体 V 的边界; \bar{u} 为流体流动速度矢量; \bar{u}_s 为动网格的网格变化速度矢量; Γ 为扩散系数; S_φ 为通量的源项;

$\Delta = \bar{e}_i \frac{\partial}{\partial x_i}$ 为哈密顿算子。

2 计算区域网格与计算条件设置

本文采用某实际工程表孔单孔 1:50 比尺建立如图 1 所示的数模区域, 模型尾坎高 0.2 m, 闸门宽度为 0.3 m, 弧形闸门半径为 0.51 m, 类似工程的恒定流研究已较多^[8-15]。

本文对弧形闸门开启过程闸门区、宽尾墩、消力池水体进行了整体模拟。闸门区网格变形较大, 采用非结构网格, 其它区域采用六面体结构化网格, 水气交界面和消力池等关键区域网格进行了局部加密。

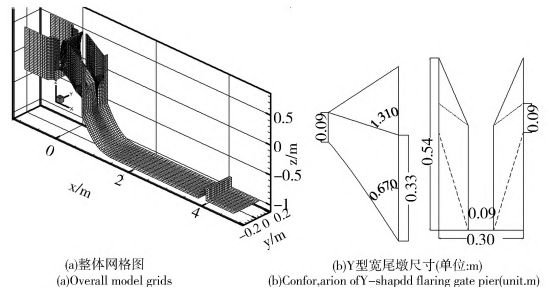


图 1 数值模拟区域

Fig. 1 Numerical simulation domain

库区进口采用压力边界条件, 并利用自定义程序 UDF (User Defined Function) 来控制其水位, 溢洪道出口为压力出口, 模型上部为与空气进口, 其它区域为无滑移边界条件。文中弧形闸门均采用匀速开启, 并采用了六种开启总时间 T , 分别为: 3 s, 10 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s。

采用弹簧光顺法和局部重构法更新动网格。图 2 给出了 $T = 120$ s 对应的开启过程中不同相对开度 (e) 时溢洪道中线纵剖面闸门区域网格图, 可看出整个计算过程网格质量良好。采用 UDF 来控制弧形闸门的运动属性, $T = 60$ s 时, 对应的 UDF 如下:

```
# include < stdio. h >
# include "udf. h"
DEFINE_CG_MOTION( humen, dt, cg_vel, cg_omega,
flow_time, dtime)
{
    if( flow_time <= 60)
        cg_omega[ 1] = 0.01305;
    else
        cg_omega[ 1] = 0;
}
```

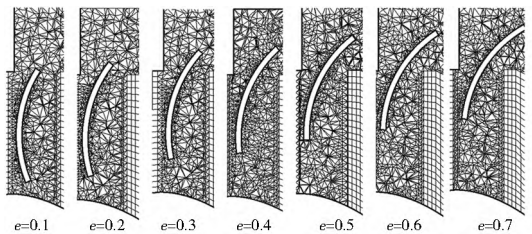


图 2 不同相对开度时闸门区中线纵剖面网格图 ($T = 120$ s)

Fig. 2 Model grids along the middle section of the overflow weir under different openings ($T = 120$ s)

3 闸后水流流态分类

图 3 给出了堰顶水头 H 恒定时, 六种开闸总时间对应的过闸流量与相对开度的关系图, 可见 T 越小, 即开闸速度越大时, 各相对开度时过闸流量就越小, 即流量滞后于过程中对应的相对开度, 闸门开启越快, 这种滞后效应越明显, 当 $T > 30$ s 时整个过程中各相对开度的过闸流量差别已很小。

当 T 无限大时,非恒定流变化平稳,趋近于恒定流。

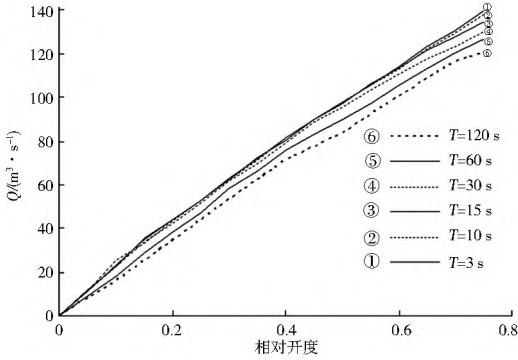


图3 过闸流量随相对开度的变化关系

Fig. 3 Relationship between water discharge and relat

从图4亦可看出 T 越小时,水面线越低。根据流量的滞后特点,将过闸水流分为三种流态:滞后式、过渡式和平稳式,对于本试验模型, $T=15\text{ s}\sim 30\text{ s}$ 时水流近似为过渡式流态。

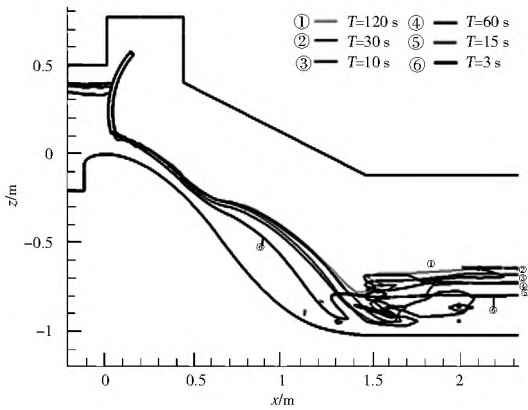


图4 $e=0.3$ 时六种开启总时间溢流堰中线水面线

Fig. 4 Water surface profiles along the middle section of the spillway under six total opening times at $e=0.3$

4 压强时空变化特征

4.1 开启总时间对压强的影响

为比较三种流态水流对反弧及消力池底板压强的影响,分别选取开启总时间 $T=10\text{ s}$, 15 s 及 60 s 作为研究对象,堰顶水头 $H=0.4\text{ m}$,初始尾水深 $h_0=0.2\text{ m}$ 。根据反弧及消力池底板所受压强的特点,将其分为三个区域:下泄水舌的直接动水冲击区;位于其后的调节区;消力池中后部静水压强为主的静压区(见图5(a))。

表1中给出三种开启总时间对应的各相对开度时反弧及消力池底板所受的冲击区最大动水压强 P_{\max} 、调节区的平均压强 P_{aver} 及二者的差值 ΔP 。可看出当竖向拉伸水舌进入消力池后,冲击区动水压强出现最大,调节区压强则较小,二者均随 e 的增大而增大。

当 $T=10\text{ s}$ 时,由于流量滞后, e 较小时 P_{\max} 偏小, $e=0.7$ 时开始大于另外两种情况。计算发现,在闸门全开一段时间后, P_{\max} 才达到极值 8200 Pa ,见图5(a),称之为滞后最大动水压强。 $T=15\text{ s}$ 对应的滞后最大动水压强为 7850 Pa (图5(b)), $T=60\text{ s}$ 则无明显的滞后最大动水压强。这是由于 T 较小时,虽然闸门已经升起,但是水流由于惯性作用,下

泄过程需要一定时间,当闸门全开时流量尚未达到最大值,之后流量会有一突然增大的过程。由于此时消力池中水深相对较小,因此会有一较大的滞后动水压强,且持续较长时间才能达到恒定状态。而 T 较大的情况,随闸门缓慢开启,流量逐步增加,消力池中水深随之增加,闸门全开后即可缓慢过渡到敞泄恒定状态,因此水流比较平稳。对于静压区,当 T 较小时,静压区压强分布比平稳式流态波动更明显。

表1 反弧及消力池底板压强

Tab. 1 The pressures of the floor of the anti arc and stilling basin Pa

T	压强	e							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
10 s	P_{\max}	2 450	3 700	5 550	5 600	6 250	6 500	7 250	7 800
	P_{aver}	1 900	2 200	2 250	2 250	2 700	3 050	3 200	3 400
	ΔP	550	1 500	3 300	3 350	3 550	3 450	4 050	4 400
15 s	P_{\max}	2 600	4 150	5 600	6 050	6 500	6 850	7 100	7 400
	P_{aver}	2 000	2 100	2 350	2 600	3 100	3 450	3 650	3 800
	ΔP	600	2 050	3 250	3 450	3 400	3 400	3 450	3 600
60 s	P_{\max}	3 150	4 500	5 050	5 700	6 100	6 200	6 750	7 000
	P_{aver}	1 950	2 400	2 800	3 350	3 600	3 750	4 200	4 150
	ΔP	1 200	2 100	2 250	2 350	2 500	2 450	2 550	2 850

对于 $T=10\text{ s}$, e 较小时, ΔP 小于其它情况;之后随 e 的增大,迅速增大, $e=0.75$ 时压强差达到 4400 Pa , $T=15\text{ s}$ 及 60 s 时为 3600 Pa 和 2850 Pa 。可见当开启总时间 T 越大时,冲击区最大压强与调节区平均压强之差越小,且其增长平缓。对于消力池而言,由于调节区处于冲击区下游,是高速水股偏转和急剧扩散的低压区,一般来说此处的受到的时均动水压强合力向上,与岩基不同,消力池最先失稳的部位是在冲击区之后压强较小的调节区,冲击区最大压强与调节区平均压强差值越大,对于反弧及消力池底板的危害越大,因此,开启总时间不应位于滞后区或过渡区,否则必须考虑压强差 ΔP 可能对反弧及消力池底板造成破坏。

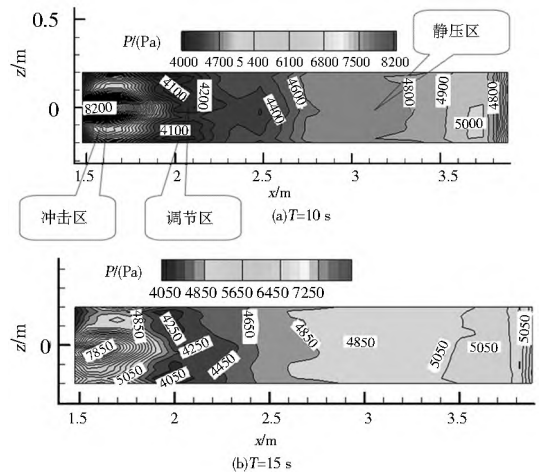


图5 两种开启总时间 T 时的消力池底板最大压强云图

Fig. 5 Pressure distributions of the floor of stilling basin under two different total opening times

4.2 堰顶水头对压强的影响

对于宽尾墩消能工而言,堰顶水头高低对下泄水股的影响较大,选取 $T=60\text{ s}$, $h_0=0.2\text{ m}$,采用 $H=0.1\text{ m}$, 0.2 m , 0.3 m , 0.4 m 四种堰顶水头进行分析。在四种堰顶水头时,

反弧及消力池冲击区最大压强均随 e 的增大而增大, 且 e 相同时 P_{\max} 与 H 近似成线性关系。采用四种堰顶水头时冲击区最大压强极值 P_0 及其对应的最大的堰顶水头 H_0 对 P_{\max} 及 H 作无量纲化处理。将不同 e 时的无量纲化的最大压强及堰顶水头的关系表示为

$$\frac{P_{\max}}{P_0} = k \frac{H}{H_0} + c \quad (8)$$

式中: k 为直线的斜率, c 为最大压强对应的截距, 二者均为 e 的函数。由七种 e 时的 $\frac{P_{\max}}{P_0}$ 与 $\frac{H}{H_0}$ 的线性关系, 可得斜率及截距与相对开度 e 的拟合关系式:

$$k = 4.4718e^3 - 6.0196e^2 + 2.3851e + 0.3616 \quad (9)$$

$$c = -5.5222e^3 + 6.732e^2 - 1.7283e + 0.1749 \quad (10)$$

将上述 k, c 与 e 的关系式代入式 (8) 得到堰顶水头不同时, 堰上弧形闸门开启过程中各相对开度所对应的冲击区最大压强的经验关系式, 图形见图 6。公式为弧形闸门开启总时间 $T = 60$ s 时的关系式, 当 T 位于平稳式时均适用, 但对于滞后式开启时间并不适用。

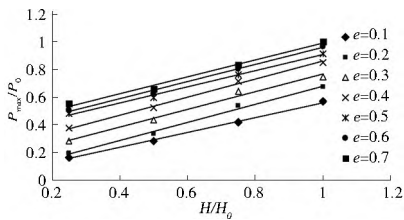


图 6 开启过程中各开度时 P_{\max}/P_0 与 H/H_0 的关系

Fig. 6 Relationship between P_{\max}/P_0 and H/H_0 under different opening degrees during the gate opening process

4.3 下游初始尾水深对压强的影响

选取开启总时间 $T = 60$ s, 采用 $H = 0.4$ m, $h_0 = 0.2$ m, 0.3 m, 0.4 m 三种初始尾水深进行分析。由表 2 的结果可看出三种情况时 P_{\max} 均随 e 的增加而增加, 在 $e < 0.4$ 时, $h_0 = 0.3$ m 对应的 P_{\max} 大于 $h_0 = 0.2$ m 时的值, 这主要是因为 e 较小时, 流量较小, 下泄水股的冲击作用还较弱, 池中静水压力起主要作用, 而越大, 静压越大, 因此 $h_0 = 0.3$ m 时的最大压强大于 $h_0 = 0.2$ m 时的值。当 $e \geq 0.4$ 时, 情况恰相反, 由于下泄流量增加, 水股冲击作用力增大, 过程中 $h_0 = 0.3$ m 时最大压强反而比 $h_0 = 0.2$ m 时要小。二者对应的调节区的平均压强差别亦较大, $h_0 = 0.3$ m 时远大于 $h_0 = 0.2$ m 时的压强, 最大差别为 1 350 Pa。

$h_0 = 0.4$ m 时, 由于水深的进一步增加, 过程中各相对开度的 P_{\max} 与调节区的平均压强均比 $h_0 = 0.2$ m 及 $h_0 = 0.3$ m 时要大。分析三种情况时 ΔP 变化, 可看出 $h_0 = 0.2$ m 时各对应相对开度时的 ΔP 均要大于另外两种情况, $h_0 = 0.2$ m 时 ΔP 在 $e = 0.1$ 时最小为 1 200 Pa, 在 $e = 0.7$ 时达到最大值 2 550 Pa, 为 $h_0 = 0.4$ m 时的 3 倍。显然 $h_0 = 0.4$ m 时反弧及消力池底板受的压强更均匀, 调节区的向下的压强较大, 可以有效平衡该区的底板的向上的动水压强。

分析可见下游初始水深对堰上弧形闸门开启过程中消力池所受压强影响较大, 而一般情况下, 开闸过程中, 尾水位是偏低的, 为安全起见, 必须使尾水位达到一定的高度才可开闸, 否则池底板的安全及稳定将受到威胁。

表 2 三种下游初始水深时压强

Tab. 2 The pressures corresponding to three different initial water depths

e	反弧及消力池压强/Pa								
	$h_0 = 0.2$ m			$h_0 = 0.43$ m			$h_0 = 0.4$ m		
	P_{\max}	P_{aver}	ΔP	P_{\max}	P_{aver}	ΔP	P_{\max}	P_{aver}	ΔP
0.1	3 150	1 950	1 200	3 550	2 950	600	4 450	4 100	350
0.2	4 500	2 400	2 100	4 800	3 500	1 300	5 200	4 600	600
0.3	5 050	2 800	2 250	5 250	4 150	1 100	5 950	5 250	700
0.4	5 700	3 350	2 350	5 700	4 200	1 500	6 300	5 750	550
0.5	6 100	3 600	2 500	6 000	4 600	1 400	6 650	5 900	750
0.6	6 200	3 750	2 450	6 050	4 750	1 300	7 000	6 200	800
0.7	6 750	4 200	2 550	6 200	5 100	1 100	7 050	6 200	850

4.4 部分测点的试验验证

图 7 为 $T = 15$ s 时溢流堰中线纵剖面上两测点 ($x = 0.572$ m 和 0.702 m, (a) 图) 的实测压强历程线与数模结果的对比((b) 图, (c) 图), 可看出在整个过程中二者随时间的变化规律是一致的, 说明数模结果是准确的。

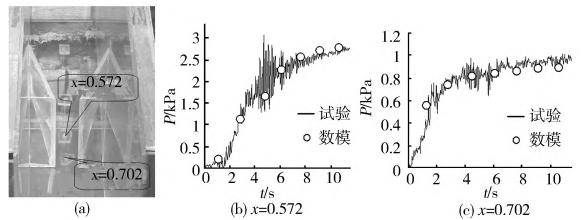


图 7 $T = 15$ s 闸室处两点压强过程线

Fig. 7 The pressure process curves of two points in lock chamber at $T = 15$ s

5 结论

研究了堰上弧形闸门开启速度、堰顶水头及下游初始尾水深对闸后宽尾墩消力池非恒定流压强的影响。根据开启过程中闸后水流特性将其分为: 滞后式、过渡式及平稳式三种流态; 指出开启总时间越小, 冲击区最大动水压强及其与调节区平均压强差越大, 冲击区最大动水压强随堰顶水头增大而增大; 初始尾水深对过程中动水压强影响明显; 分析了过程中下泄水股对消力池底板可能造成的危害。

参考文献 (References):

- [1] 朱仁庆, 杨松林, 王志东. 闸门开启过程中水体流动的数值模拟[J]. 华东船舶工业学院学报, 1998, 12(3): 18-21. (ZHU Renqing, YANG Songlin, WANG Zhi dong. Numerical simulation of water flowing during opening of flood gate[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 1998, 12(3): 18-21. (in Chinese))
- [2] WANG Wei, YANG Yongquan, XU Weilin, et al. Experimental investigation of emergency gate shutting for orifice tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002(3): 29-34.
- [3] 韩宇, 吕宏兴, 余国安. 两种运行方式下灌溉渠道的非恒定流数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(3): 29-33. (HAN Yu, LYU Hongxing, YU Guoan. Numerical simulation of unsteady flow in irrigation canals with two operation modes[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(3): 29-33. (in Chinese))

- [4] 王均星,陈晓勇,尹浩,等. 湖南镇水电站水工模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 103-108. (WANG Junxing, CHEN Xiaoyong, YING Hao, et al. Study on the hydraulic model tests of Hunanzhen hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric engineering, 2008, 27(5): 103-108. (in Chinese))
- [5] 范杰,王长德,管光华,等. 渠道非恒定流水力学响应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 55-60. (FAN Jie, WANG Changde, GUAN Guanghua, et al. Study on the hydraulic reaction of unsteady flows in open channel[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 55-60. (in Chinese))
- [6] 邱春,刁明军,徐兰兰. 溢流堰表孔弧形闸门开启过程水力特性3维数值模拟[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(3): 19-25. (QIU Chun, DIAO Mingjun, XU Lanlan. 3D Numerical simulation of hydraulic characteristics during the opening process of radial gate for overflow weir[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(3): 19-25. (in Chinese))
- [7] 刁明军,杨永全,王玉荣,等. 挑流消能水气二相流数值模拟[J]. 水利学报, 2003(9): 77-82. (DIAO Mingjun, YANG Yongquan, WANG Yurong, et al. Numerical simulation of water Air two phase jet flow from flip bucket to plunge pool[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(9): 77-82. (in Chinese))
- [8] 王念慎. 采用宽尾墩加消力池水工布置的水力特性试验研究[J]. 水利学报, 1986(9): 15-23. (WANG Nianshen. A laboratory study on hydraulic characteristics of flaring gate piers and stilling pool in combined application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(9): 15-23. (in Chinese))
- [9] 刘永川. 宽尾墩消能工在安康水电站应用中的水力学问题[J]. 水利水电技术, 1987, 18(9): 11-15. (LIU Yongchuan. Hydraulics studying & applying on flaring gate piers of ankan hydropower[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987, 18(9): 11-15. (in Chinese))
- [10] 倪汉根. 宽尾墩消力池的简化计算方法[J]. 水利学报, 1998(6): 19-24. (NI Hange. A simplified hydraulic calculation method for flaring gate pier stilling basin[J]. Journal of Hydraulic engineering, 1998(6): 19-24. (in Chinese))
- [11] 李中枢,潘艳华. 宽尾墩联合消能工体型选择及水力特性的研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 82-87. (LI Zhongshu, PAN Yanhua. Hydraulics of stilling basin with flaring gate piers[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 82-87. (in Chinese))
- [12] 张挺,伍超,莫政宇,等. X型和Y型宽尾墩水力特性对比研究[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1207-1213. (ZHANG Ting, WU Chao, MO Zhengyu, et al. Comparison on hydraulic characteristics of X-shape and Y-shape flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic engineering, 2007, 38(9): 1207-1213. (in Chinese))
- [13] 周喜德,殷彤,雷云华,等. 低Fr数宽尾墩消力池流场3维数值模拟[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6): 17-24. (ZHOU Xide, YIN Tong, LEI Yunhua, et al. 3D numerical simulation of turbulent flow with lower Fr number in stilling basin with flaring gate pier[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(6): 17-24. (in Chinese))
- [14] 胡静,邓军. 宽尾墩对跌坎底流消能影响的试验研究[J]. 水力发电, 2010, 36(3): 93-96. (HU Jing, DENG Jun. Experimental investigation about the effect of flaring gate pier on falling still bottom flow dissipator[J]. Water Power, 2010, 36(3): 93-96. (in Chinese))
- [15] 尹进步,梁宗祥. 与宽尾墩联合使用的消力池底板压强特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 103-108. (YIN Jibu, LIANG Zongxiang. Experimental study on the bottom pressure of a stilling basin combined with flaring gate piers[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 103-108. (in Chinese))

(上接第716页)

- [11] 路胜. 空气罐控制管道水击实验研究[J]. 油气储运, 1994, 13(2): 19-22. (LU Sheng. Experimental study on water hammer of pipelines by air vessel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1994, 13(2): 19-22. (in Chinese))
- [12] Stephenson D. Simple Guide for Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines[J]. Journal of Hydraulic Engineering(ASCE), 2002, 128(8): 792-797.
- [13] 廖永诚. 一种防止水锤的有效装置——空气罐[J]. 水利水电技术, 1984(3): 49-53. (LIAO Yongcheng. An effective equipment to prevent water hammer—the air tank[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 1984(3): 49-53. (in Chinese))
- [14] 高松竹,蒲家宁,许萍,等. 空气罐控制输液管道水击研究[J]. 管道技术与设备, 2004(4): 17-19. (GAO Songzhu, PU Jianing, XU Ping, Study on controlling water hammer of pipelines by air tank[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2004(4): 17-19. (in Chinese))
- [15] 黄玉毅,李建刚,符向前,等. 长距离输水工程停泵水锤的空气罐与气阀防护比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(8): 186-192. (HUANG Yuyi, LI Jiangan, FU Xiangqian, et al. Research on the comparison of air vessel and air valve on pump stopping water hammer protection of long distance pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(8): 186-192. (in Chinese))