

# 阶梯溢洪道水力特性试验及数值模拟

周斌斌, 凤炜

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 通过对阶梯溢洪道进行模型试验研究,验证了侧堰的过流能力,研究了典型断面流速、压力及水深在不同工况下的变化规律。试验结果表明:侧堰的过流能力满足设计要求,在各工况下,水深小于边墙设计高度,阶梯段各点空化数小于初生空化数,不会引起空蚀破化。根据原设计方案使用 FLUENT 对阶梯溢洪道进行数值模拟实验,并将数值模拟计算结果与模型试验结果进行对比分析,发现数值模拟计算结果与物理模型试验结果吻合良好,为深入分析阶梯溢洪道陡坡流场提供可能,同时,为体型结构优化提供技术保障。

**关键词:** 阶梯溢洪道;物理模型;水力特性;数值模拟

中图分类号:TV131.61

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)02-0179-06

## Experiment on hydraulic characteristics of stepped spillway

ZHOU Binbin, FENG Wei

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

**Abstract:** Through the model test of stepped spillway, the paper verified the flow capacity of side weir and studied the change rule of velocity, pressure and water depth of typical cross-section under different conditions. The test results show that the flow capacity of side weir meets the design requirement, and the water depth is less than the design height of side wall. The cavitation number in each point is less than the initial cavitation number which will not cause the cavitation erosion. According to original design, the paper used FLUENT software to conduct numerical simulation test for stepped spillway, and compared the result of numerical simulation calculation with the result of model test. The coincide of two results is very good. The result can provide the possibility for depth analysis of flow field of stepped spillway steep slope and offer the technical support for body structure optimization.

**Key words:** stepped spillway; physical model; hydraulic characteristics; numerical simulation

阶梯式溢洪道是通过底部加糙、水流横向旋滚、掺气剧烈及水流强烈紊动来增强消能效果。相对于光滑溢洪道,阶梯溢洪道体现出明显优势,不仅提高了消能效果还有效减小了下游消力池规模,从而节省了投资,已广泛应用于国内外的中小型水利工程中。为保证工程的运行安全,需对工程进行事先的水工模型试验,根据试验结果对工程进行设计方案的优化。但是,物理模型试验存在着花费多、变方案慢、信息不完、整仪器干扰等不足<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着电子计算机性能的迅速提高和数值计算方法不断发展<sup>[3-5]</sup>,数值模拟已经成为一种新兴的研究方法,在很多方面上数值模拟较物理模型试验有很多

优点,首先由于其完全由计算机进行运行计算,节约了大量的人工、材料费用且其运行时间较物理模型试验大大缩短,其次如需修改体型及设计方案花费时间也较短,最后数值模拟不受仪器干扰等因素的影响,可以减少不必要的误差。可以为水利工程体型方案的选择和设计提供了足够精细和准确的数据以及科学依据。本文采用物理模型试验及 FLUENT 软件对泄水陡坡各工况进行数值模拟运算。

## 1 某阶梯溢洪道物理模型试验原方案

### 1.1 模型设置制作与试验手段

溢洪道模型制作范围为:溢洪道总长为 315 m,

收稿日期:2015-11-11; 修回日期:2016-03-22

基金项目:新疆水利水电工程重点学科资助项目(XJZDXK-2010-02-12)

作者简介:周斌斌(1984-),男,甘肃渭源人,硕士研究生,研究方向为水工结构及数值仿真。

通讯作者:凤炜(1962-),女,辽宁辽中人,副教授,研究方向为当地材料坝。

其中侧堰段 20 m(桩号 0+000~0+020);调整段 15 m(桩号 0+020~0+035);泄槽阶梯消能段 190 m(桩号 0+035~0+215);消力池段 21 m;尾水渠段 69 m。

模型设计遵循重力相似准则,采用正态模型,模型的几何比尺为  $\lambda_l = 25$ ,其它水力参数的相似比尺均列于表 1。模型平面布置图见图 1。

表 1 重力相似条件下的各水力参数相似

水力参数	换算关系	相似比尺	水力参数	换算关系	相似比尺
长度 $l$	$\lambda_l$	25	流量 $Q$	$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2}$	3125
压强 $p$	$\lambda_{p/\gamma} = \lambda_l$	25	时间 $t$	$\lambda_t = \lambda_l^{1/2}$	5
流速 $v$	$\lambda_v = \lambda_l^{1/2}$	5	糙率 $n$	$\lambda_n = \lambda_l^{1/6}$	1.70998

为使模型试验能够较真实地反映原型的水流情况,在选择水工结构模型材料时必须近似模型材料的糙率要求。根据重力相似要求,有:

$$\lambda_n = \frac{n_p}{n_m} = \lambda_l^{1/6} \quad (1)$$

原型泄水建筑物的糙率  $n_p = 0.014$ ,模型泄水建

筑物的糙率  $n_m$  应为  $n_m = \frac{n_p}{\lambda_l^{1/6}} = \frac{0.014}{25^{1/6}} = 0.0082$ ,有机玻璃材料的糙率一般为 0.007~0.009,所以模型中泄水建筑物材料选用的是有机玻璃。

水工模型试验供水系统设施,包括蓄水池、动力泵、平水塔、配水管和回水槽等;

试验量测仪器:水位与水面线量测仪器:采用水位测针、钢板尺和水准仪测定恒定流水位;采用测压管量测压强。

流量量测仪器:采用南京水科院研制 LGY-III 型多功能智能流速仪和毕托管测量流速;

流量量测仪器:采用矩形薄壁量水堰,用于测定恒定流流量,量水堰堰型满足量程和精度要求。

矩形薄壁量水堰的流量计算公式为:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2)$$

$$m_0 = \left( 0.405 + \frac{0.0027}{H} - 0.03 \frac{B-b}{B} \right) \cdot \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{H}{H+P} \right)^2 \left( \frac{b}{B} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中:  $H$  为堰上水头, m;  $P$  为堰高, m;  $B$  为堰宽, m。

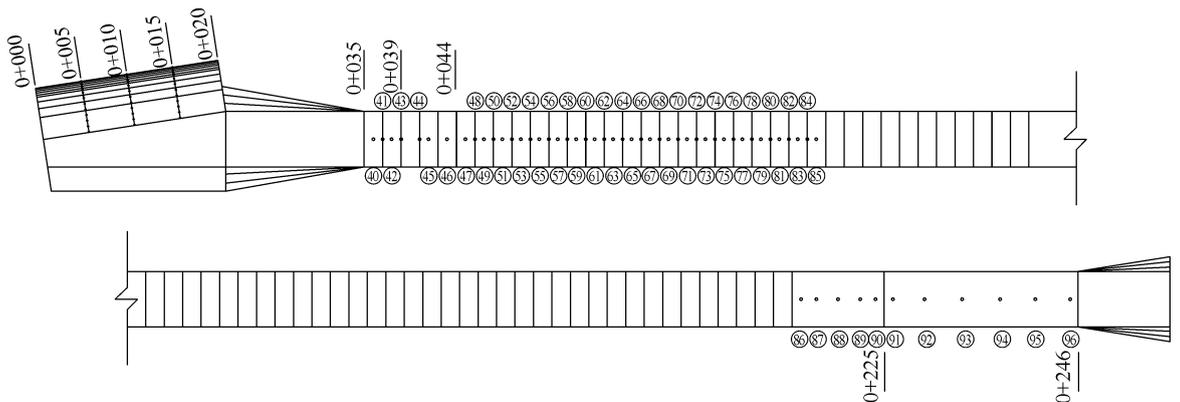


图 1 模型平面布置图及压强测点布置图

## 1.2 原设计方案试验结果及分析

1.2.1 侧堰泄流能力 经实测流量和设计流量比较,设计洪水时实测泄流量较设计值大 9.38%;校核洪水时实测泄流量较设计值大 4.53%,试验表明侧堰的泄流能力满足设计要求。

### 1.2.2 溢洪道水流流态与水面线

(1)当水流为设计洪水时,堰前水流平稳,水面波动较小,堰上水流平顺。水流经过堰顶进入到侧堰段,由于溢洪道轴线与堰轴线呈  $99^\circ$ ,水流受到边墙的影响,在与右岸边墙碰撞后在侧槽内产生横向环流并在右岸形成水墙。在同一断面,右岸水深大于左岸水深,且右岸水墙高度和宽度随着流量的增

大而增加。

校核洪水位时,由于流量较大,并受到堰前进口的收缩作用,堰前水面有波动现象,水流进入到侧堰段,与横向环流相互碰撞击起水花,水流波动剧烈。

(2)在设计洪水位时,泄槽阶梯消能段进口水流流态平稳,随着流量的增大,开始出现掺气的台阶位置向下游推移。校核洪水时,由于水深增大,台阶凹角处掺气旋滚较小,旋滚上端距离水面有一定距离。

试验所测溢洪道水面线见图 2 和图 3。

试验表明,校核洪水和设计洪水时,侧堰段、调整段和泄槽阶梯消能段掺气水深均小于边墙高度,原设计边墙高度满足泄流要求。

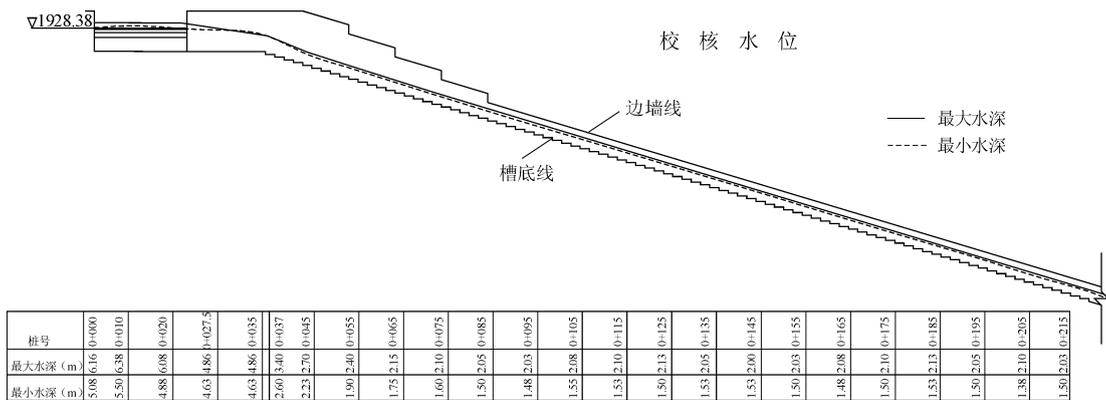


图 2 校核洪水溢洪道水面线

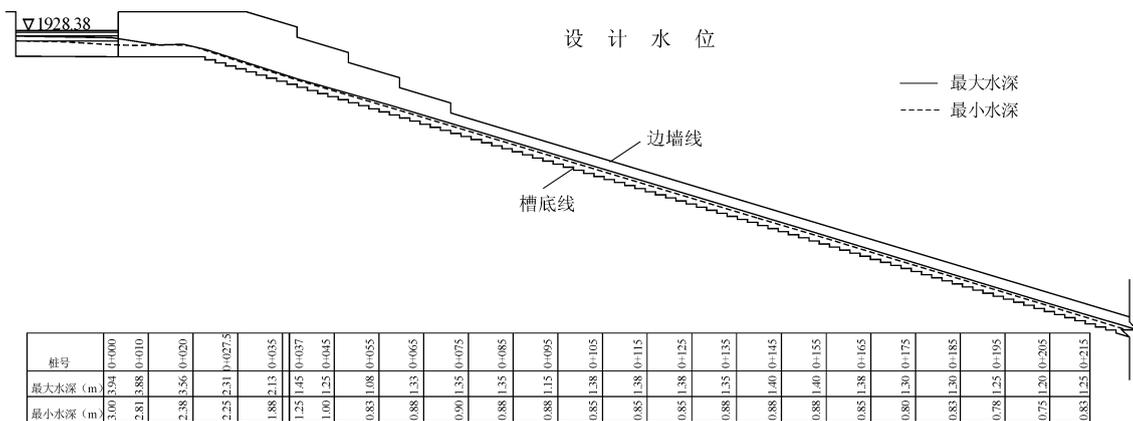


图 3 设计洪水溢洪道水面线

1.2.3 溢洪道流速与压力 校核洪水时,台阶末端流速为 14.38 m/s,设计洪水时,台阶末端流速为 11.07 m/s。

校核水位下,侧堰段未出现负压,最小压强为 0.00m 水柱,位于 0+010 和 0+015(25、39 测点)断面;泄槽阶梯消能段最小压强值为 -0.05 m 水柱,位于 0+078(79 测点)断面。

设计水位下,侧堰段最小压强为 0.05 m 水柱,位于 0+015(31 测点)断面;泄槽阶梯消能段在部分立面台阶附近产生负压,最小压强值为 -0.07 m 水柱,位于 0+78(79 测点)、0+82(83 测点)、0+084(85 测点)断面。测压位置见图 1。

## 2 阶梯溢洪道数值模拟试验

### 2.1 数学模型

本文以连续方程、动量方程、紊动能方程及紊动能耗散率方程为基本控制方程组(公式 4),选择 RNG  $k - \epsilon$  模型对溢洪道整体进行三维数值模拟计算。RNG  $k - \epsilon$  模型是由 Yakhot 和 Orzak 于 1986 年<sup>[12]</sup>应用重整化群理论提出的一种改进的  $k - \epsilon$  模

型选用 RNG  $k - \epsilon$  紊流计算模型,RNG  $k - \epsilon$  湍流模型包括的方程见式(6)及式(7),为了能够达到有效地求解阶梯溢洪道上的复杂自由水面的目的,紊流模型中引入可以用于分层流求解自由表面的流体体积分数模型,即 VOF 模型。VOF 模型于 1974 年 De-Bar 的文章中首次出现,在上世纪,VOF 理论被 NicholsH 和 Hirt 第一次正是提出<sup>[6-7]</sup>。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{5}$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \tag{6}$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中： $\rho$ 为体积分平均密度； $\mu$ 为分子粘性系数； $G$ 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项； $\mu_t$ 为紊流粘性系数； $p$ 为压力； $u$ 为速度； $i = 1, 2, 3, \{x_i = x, y, z\}, \{u_i = u, v, w\}$ ；常数值  $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \delta_k = 1.0, \delta_\varepsilon = 1.3$ 。

## 2.2 边界条件及初始条件

水流入口、气体入口采用压力进口边界条件，气体入口边界处压力均为大气压，水流入口根据设计洪水位和校核洪水位对应的静压力分布，编写自定义函数给定进口边界；出口边界处侧槽段较远，且下泄槽较顺直，受侧槽内水流紊动影响很小，已处于紊流充分发展段，因此采用充分发展条件  $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ ，即各物理量沿程变化趋于均匀；壁面采用无滑移边界条件，对黏性底层采用标准壁面函数法处理。

模拟计算用非恒定流算法逼近恒定流稳定解，时间步长的选取与空间网格的尺寸和流速有关，取  $0.0001 \sim 0.005$  s。计算模拟了库水位为校核洪水位  $1\ 930.51$  m 和设计洪水位  $1\ 929.52$  m 时侧槽式溢洪道的水流流场。

## 2.3 计算区域和网格划分

计算区域包括侧堰段、控制调整段、泄槽阶梯消能段，如图4所示。图中  $X$  轴为顺水流方向， $Z$  轴为垂直水流流向， $Y$  轴为垂直  $XOZ$  平面的水深方向。 $X$  坐标与溢洪道的桩号相对应， $Y$  坐标代表高程。数值模拟采用原型尺寸，为了准确地模拟溢洪道进出口

流态，计算模型上游以 WES 堰向前延伸  $20$  m 作为进流起始断面，下游模拟至渠道出口。

网格类型包括结构化和非结构化两种。非结构化网格虽然容易构造，但计算的稳定性不如结构化网格；在网格节点间距相同的情况下，网格数量远多于结构化网格，计算时间也较长，所以在划分网格时应优先选用结构化网格。考虑到泄水陡坡的体型比较规则，划分结构化网格易于实现，因此采用结构化网格，网格总数为  $178\ 474$  个。

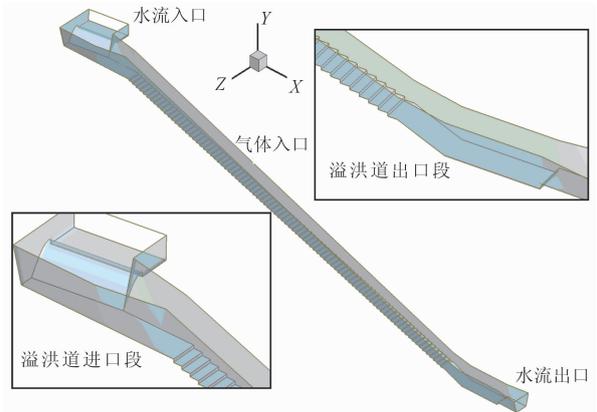


图4 计算区域三维模型及边界条件

## 2.4 结果与分析

2.4.1 侧堰泄流能力 经数值模拟计算，溢洪道 WES 侧堰的泄流能力见表2。从表中可以看出，数值计算结果和实测结果十分接近，变化规律相同。设计洪水时，数值结果较实测值大  $4.17\%$ 。校核洪水时，数值结果较实测值大  $1.43\%$ 。数值模拟与实测结果二者十分相近。由此说明，数值模拟方法是正确的，方法是可行的，由此得到的结果是可信的。

表2 不同工况下侧堰的泄流量

工况	泄流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )			相对误差/%	
	设计值	数值模拟值	实测值	数模与设计结果误差	数模与实测结果误差
10年一遇	16.94	16.00	16.81	5.54	4.81
20年一遇	31.14	30.02	30.63	3.60	1.99
30年一遇	38.37	37.20	37.34	3.05	0.37
50年一遇(设计洪水)	48.00	54.00	52.80	12.50	4.17
1000年一遇(校核洪水)	124.30	131.80	129.94	6.19	1.43

2.4.2 流态分析及水面线 校核洪水工况下，水流从溢流堰流入侧槽后，水流潜底并冲向侧槽底板，受底板约束而顶冲下游堰面，并在下游堰面形成回旋，水流冲向侧槽右边墙，受右边墙约束而顶冲向水面，到达表层后向左侧回旋，并在水面卷入空气形成明

显的横向漩涡，该漩涡的最大尺度与侧槽段的横向尺寸相同，水体紊动剧烈，表层水流掺气。在宣泄校核洪水时，水面大幅动荡，侧槽左右边墙水面高程相差较大。侧槽内流态数模结果与物模结果一致。

WES 堰下游侧槽段水面高于堰顶，受侧堰过流

和收缩段水流折冲的影响,侧槽内右岸水面明显高于左岸。最大水位差接近 1 m。由于侧槽段断面面积沿程增加,侧槽段水面线沿程降低。进入调整段后,左、右边墙处水位差逐渐减小,至调整段末端,左、右边墙水面基本相同,进入泄槽段后,左、右边墙水位相同(数据标记点重合),且与实测的最小水深值基本重合。

设计洪水工况下,水流从溢流堰流入侧槽后,水流潜底并冲向侧槽右边墙,受右边墙约束而顶冲向水面,到达表层后又折向右岸,并在水面卷入空气形成明显的横向漩涡,该漩涡的最大尺度与侧槽段的横向尺寸相同,水体紊动剧烈,表层水流掺气。在宣泄设计洪水时,侧堰溢流属于自由溢流,未出现侧向进流的水舌不进入水下,而由表面掠过产生反向螺旋运动,激起水面波动。水流经调整段到泄槽段,逐渐平稳。

由于试验中,泄流流速大,水流脉动剧烈,水面波动较大,因此试验过程中实测了各典型断面右边墙处(试验中泄槽段左右边墙处的水深相同)的最大水深值和最小水深值。各典型断面水深的计算值基本位于实测最大水深值和最小水深之间。表明计

算结果与实测结果基本一致,其中阶梯泄槽段的水深计

2.4.3 流速与压力 溢洪道沿程流速模拟结果表明,侧槽中水流流场较紊乱。泄槽段纵向流速分布基本规则,大小沿程逐渐增加。数值结果与实测值相接近。

校核洪水和设计洪水工况下压力值与模型试验结果一致,溢洪道控制段 WES 堰上未出现负压,压强最小值分别约为 0.6 和 0.45 kPa,受离心力作用,反弧段压强急剧增大,最大值出现在反弧段末端,约 60 和 38 kPa。在侧槽段和调整段,最大压强出现于侧槽段前端,约 56 和 38 kPa。

计算结果表明:溢洪道压强沿程分布和体型特征变化是相应的。校核洪水和设计洪水工况堰面均无负压产生。校核洪水时,阶梯段最大负压值出现在最后一级阶梯的竖直面,负压值为  $-0.93\text{m}$  水柱,对应的空化数为 0.77。该空化数大于初生空化数,理论上说阶梯段不会发生空蚀破坏。各工况时底板压强沿程分布图见图 5 和 6 所示。溢洪道各典型断面特征点的水流空化数计算见表 3,计算值与实测的最小水深值较吻合。

表 3 溢洪道各特征点的压强水头、断面平均流速及空化数

工况	位置	动水压力 水头 $h_a$ /m	水深 $h$ / m	大气压力 水头 $h_a$ /m	水的气化压力 水头 $h_v$ /m	平均流速 $V_o /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	水流空 化数 $\sigma$
校核洪水	0+055	0.38	1.90	8.19	0.24	11.57	1.22
	0+075	-0.28	1.60	8.19	0.24	13.39	0.84
	0+095	0.18	1.48	8.19	0.24	14.23	0.79
	0+115	-0.50	1.53	8.19	0.24	14.28	0.72
	0+135	-0.02	1.53	8.19	0.24	14.78	0.71
	0+155	-0.33	1.50	8.19	0.24	14.92	0.67
	0+175	-0.62	1.50	8.19	0.24	14.97	0.64
	0+195	-0.69	1.50	8.19	0.24	15.13	0.62
	0+216	-0.18	1.50	8.19	0.24	15.32	0.65
	设计洪水	0+055	0.08	0.83	8.19	0.24	9.60
0+075		-0.28	0.90	8.19	0.24	10.25	1.43
0+095		-0.31	0.88	8.19	0.24	10.47	1.37
0+115		-0.26	0.85	8.19	0.24	10.41	1.39
0+135		-0.54	0.88	8.19	0.24	10.33	1.36
0+155		-0.05	0.88	8.19	0.24	10.38	1.44
0+175		-0.39	0.80	8.19	0.24	10.68	1.30
0+195	0.20	0.78	8.19	0.24	10.93	1.34	
0+216	0.23	0.83	8.19	0.24	11.29	1.26	

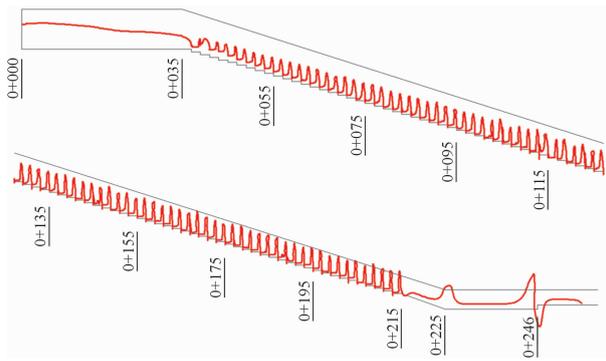


图5 校核洪水时底板压强沿程分布图

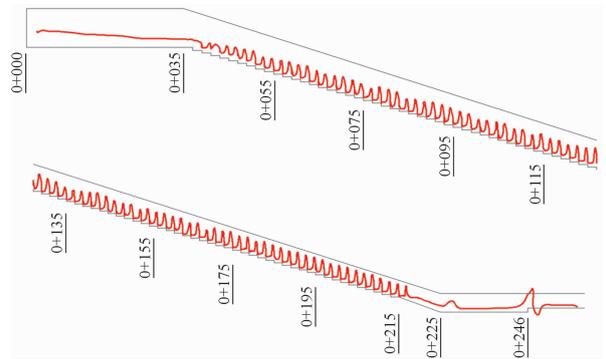


图6 设计洪水时底板压强沿程分布

### 3 结论

(1)原设计方案泄流能力满足泄洪要求。侧堰泄流量的数值模拟结果略小于设计值和实测值。溢洪道各段设计边墙高度满足校核洪水和设计洪水的泄水要求。溢洪道沿程流速模拟结果表明,侧槽中水流流场较紊乱。泄槽段纵向流速分布基本规则,大小沿程逐渐增加。溢洪道压强沿程分布和体型特征变化是相应的。校核洪水和设计洪水工况堰面均无负压产生。

(2)采用物理模型试验及 FLUENT 软件进行数值模拟运算的方法,能够清晰地分析各工况下的水力特性数值,较之物理模型试验数据,数值模拟计算所得结果更为准确,连续,有更高的利用价值。

试验结果表明,数值模拟水力特性数值在不同工况下与物理模型结果较为吻合,原设计方案满足工程设计实际要求。数值模拟计算也是行之有效的办法。

(3)本文中利用 Fluent 软件对阶梯溢洪道进行了三维模拟数值计算,通过与物理模型试验的对比分析,验证了数学模型的可靠性,受到诸多因素的影响,本文尚存在以下不足之处且需要更进一步的深入研究与探索:

在进行三维数值模拟计算时,文章只采用  $RNGk-\varepsilon$  模型对阶梯溢洪道进行数值模拟,虽然模拟结果与实测结果吻合较好,但是为了更准确的反映阶梯溢洪道水力特性,还应采用不同紊流模型进行数值计算,优选出最佳紊流模型,从而更好的研究阶梯溢洪道压力、速度及消能效果的变化规律。

### 参考文献:

- [1] 聂梦喜,段兵,李琳琳. 泄水建筑物中突扩突跌体型侧墙上的水力特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006,46(12):1969-1972.
- [2] 葛旭峰. 陡坡后消力池内水跃特性的研究[D]. 新疆:新疆农业大学,2011.
- [3] 党彦. 九甸峡水电站泄水建筑物的流场模拟与体型优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [4] 刘晶. 南康河水电站泄水建筑物水力特性数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [5] 戎贵文,魏文礼,张宗孝,等. 泄水建筑物紊流水力特性数值模拟研究进展趋势[J]. 水利水电科技,2008,34(2):46-48.
- [6] Issa R I. Solution of the implicity discretised fluid flow equations by operator splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986,62(1):40-65.
- [7] 马福喜,王金瑞. 三维紊流数值研究[J]. 水动力学研究与进展,1992,10(2):115-124.
- [8] 刘善均,朱利,张法星,等. 前置掺气坎阶梯溢洪道近壁掺气特性[J]. 水科学进展,2014,25(3):401-406.
- [9] 伍平,王波,陈云良,等. 阶梯溢洪道不同坡比消能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):24-29.
- [10] 周勤,伍超. 陡坡弯道水流条件改善数值模拟研究[J]. 陕西水利,2011(2):94-96.
- [11] 王新丽. 正槽溢洪道整体水力特性试验研究和数值模拟[D]. 山西:太原理工大学,2012.
- [12] 槐文信,梁爱国,杨中华,等. 非对称式复式断面明渠水流特性试验与数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2001,35(12):95-98.