



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.021

蒋健楠, 牧振伟, 张佳祎, 等. 双层悬栅消力池的水力特性数值模拟[J]. 2016, 14(1): 124-130.

JIANG Jian nan, MU Zhen wei, ZHANG Jia yi, et al. Numerical simulation for hydraulic characteristics of double suspended grid in the stilling basin[J]. 2016, 14(1): 124-130. (in Chinese)

双层悬栅消力池的水力特性数值模拟

蒋健楠, 牧振伟, 张佳祎, 牛涛, 贾萍阳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对物理模型试验难以得到详细的流速、压强等水力参数数据问题, 利用流体动力学软件 FLUENT 建立 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型进行数值模拟, 得到消力池内最大水深、流态、流速以及压强等水力参数, 通过数学模型计算值与物理模型试验值对比分析以及数值模拟计算值之间对比分析, 结果表明: 数学模型计算值与物理模型试验值吻合较好, 且布置双层悬栅时, 计算值与试验值误差较小; 双层悬栅使水流产生漩涡的能力较强, 从而使水流对护坦冲击较小, 护坦处涌浪降低, 对压强变化影响较大, 说明双层悬栅具有更好的消波稳流作用。

关键词: 双层悬栅; 数值模拟; RNG $k-\epsilon$; 最大水深; 流态; 流速; 压强

中图分类号: TV 653.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0124-07

Numerical simulation for hydraulic characteristics of double suspended grid in the stilling basin

JIANG Jian nan, MU Zhen wei, ZHANG Jia yi, NIU Tao, JIA Ping yang

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

Abstract: Through physical model experiment, it is hard to get detailed hydraulic parameter data such as velocity, pressure, etc. To cope, the paper uses fluid dynamics software FLUENT to set up RNG $k-\epsilon$ double equation turbulence model to make numerical simulation, so as to get hydraulic parameters such as maximal water depth, flow pattern, velocity and pressure, etc. Then makes analysis of comparison between mathematical model calculated value and physical model experimental value, and makes analysis of comparison among numerical model calculated values. The result shows the mathematical model calculated value and physical model experimental value are roughly identical, and the error between calculated value and experimental value is small when double suspended grid is arranged. The double suspended grid has strong capacity to make current generate swirl, hence small impact on apron slab by current, and lowered surge at the apron slab, larger effect on the pressure change, which shows double suspended grid has better performance in eliminating wave and stabilizing current.

Key words: double suspended grid; numerical simulation; RNG $k-\epsilon$; maximal water depth; flow pattern; velocity; pressure

底流消能具有流态稳定、消能效率高以及尾水波动小等优点^[1], 广泛应用于泄流消能之中, 其中消力池是底流消能常见的消能工。但在地形、地质等

条件的限制下, 消力池在不能满足消能效果时无法加深或加长, 此时在消力池内布置辅助消能工^[2,5]能较好地解决该问题。悬栅消能工作为一种新型的辅

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2016-01-27 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1653.017.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469031); 新疆研究生科研创新项目(XJGR12015094); 国家级大学生创新训练计划项目(201510758029)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51469031); Xinjiang Graduate Research Innovation Project(XJGR12015094); National College Students Innovation Training Program(201510758029)

作者简介: 蒋健楠(1991-), 男, 江苏江阴人, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: 841157334@qq.com

通讯作者: 牧振伟(1973-), 男(回族), 河南南阳人, 教授, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: xjmzw@163.com

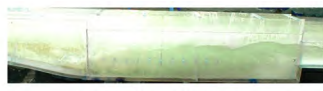
助消能工布置到消力池内,有消波效果好以及环境影响小等优点^[6],现已成功应用到新疆五一水库^[7]、小石峡水电站^[8]等工程中。在科研工作中,通常采用原型观测和模型试验来对比研究消能工的水力特性,但是物理模型试验不仅制作耗时耗力,还存在一定的测量误差;而采用数值模拟方法,不仅能节省人力物力,还能设计更加全面的试验方案进行模拟计算,得到较详细的流速、压强等数据,从而进行较全面地分析。随着计算机技术的进步,流体力学计算软件 FLUENT 开发日益成熟,数值模拟方法^[9-14]在国内外得到广泛使用,国外如 McGuirk 和 Rodi^[15]用刚盖假定的方法模拟了自由面;国内如王玲玲等^[16]采用半隐式的控制体积法离散紊流控制方程,数值模拟了石梁河水库工程泄流工程,得到的计算结果与物理模型试验成果吻合良好;刘达等^[17]借助大涡模拟方法对浅水消力池进行数值模拟计算,得到消力池内水力参数。根据前人研究经验,借助数值模拟方法对悬栅消能工进行研究,吴战营等^[18]对新疆五一水库梯形墩消力池进行数值模拟,得到悬栅——梯形墩消力池内详细的流场。本文在物理模型试验基础之上,建立相应的数学模型,进行数值模拟计算,对比分析相关水力参数,探究消力池内布置悬栅前后对消能效果的影响。

1 物理模型试验

通过模型试验分析消力池内未布置悬栅、布置单层悬栅以及双层悬栅对消能效果的影响,试验采用 $Q=21.43 \text{ L/s}$ 作为单宽流量设计值,通过相关水力计算^[19]得到消力池尺寸,见图 1。在单



(a) 未布置悬栅
(a) Not arranging suspended grid



(b) 布置单层悬栅
(b) Arranging single suspended grid



(c) 布置双层悬栅
(c) Arranging double suspended grid

图 2 布置悬栅前后消力池内流态

Fig. 2 The flow pattern before and after arranging suspended grid in the stilling basin

2 数值模拟方法

在物理模型试验时,水流在消力池内形成水跃,掺气量较大,流态非常紊乱,直接观察水流与悬栅的相互作用相当困难,水跃段测量具有一定难度。为深入了解消力池内布置悬栅后水流流场以及压强场的变化,利用流体力学软件 FLUENT 对布置悬栅前后的消力池建立数学模型,进行数值模拟计算。

2.1 控制方程

在紊流模型中,根据补充的微分方程数目,将紊

流模型划分为零方程模型、单方程模型、双方程模型和多方程模型^[20]。本文采用 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型,由于悬栅消力池内有水流旋转及旋流流动,由 Yakhot 和 Orszag 建立的 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型考虑到该问题,能更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大流动,具有较高的可靠性和准确性。该紊流模型的连续方程、动量方程以及 k 、 ϵ 方程分别表示如下。

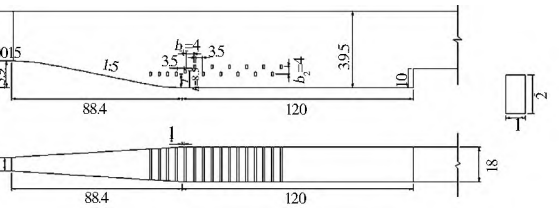


图 1 消力池结构示意图(单位: cm)

Fig. 1 The schematic diagram of the stilling basin

在消力池内布置单层和双层悬栅时,保持渥奇段 4 根和消力池前端 1 根悬栅位置不变,只改变消力池内悬栅水平间距 b_1 (简称: 栅距)、栅条数 n 以及悬栅垂直间距 b_2 (简称: 层距)。为保证布置单层和双层时悬栅第 1 根和最后 1 根之间总间距一定,布置单层时,悬栅栅距 b_1 取 5.5 cm, 栅条数 n 取 7、11、15 根, 栅高 h (即悬栅中心距消力池底板的距离) 取 11 cm; 布置双层时, 栅距 b_1 取 12 cm, 栅条数 n 取 7、11、15 根, 层距 b_2 取 4 cm。

通过模型试验得到,未布置悬栅时(见图 2(a)),消力池流态紊乱程度较高,水面波动剧烈,消能效果并不理想;布置悬栅后,消力池内流态紊乱程度降低,消能效果得到改善,且在同一流量下,栅条数相同时,布置双层悬栅(见图 2(b)),消力池内流态更加平稳,水面波动较小,较布置单层悬栅方案更优(见图 2(c))。

连续方程:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\alpha u_j}{\alpha t} + u_j \frac{\alpha k}{\alpha x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\alpha p}{\alpha x_i} + v \frac{\alpha^2 u_j}{\alpha x_j^2} + \frac{\alpha}{\alpha x_j} \left[v_c \left(\frac{\alpha u_i}{\alpha x_j} + \frac{\alpha u_j}{\alpha x_i} \right) \right] - g_i \quad (2)$$

k 方程:

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

ε 方程:

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

上述表达式中,下标 $i=1, 2, 3; j$ 为求和下标;方程中通用常数取值见表 1。

表 1 各通用常数的取值

Tab. 1 The value of each general constant

常数	C_μ	C_a	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
取值	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

由于模型涉及自由液面的处理,而 VOF 法是处理复杂自由表面的有效办法,是目前广泛应用的追踪自由表面的数值方法^[21]。控制方程组的离散采用有限体积法,通过欠松弛迭代方法求解离散控制方程组,数值计算采用 PISO 算法。

2.2 计算模型网格划分与边界条件

根据物理模型建立悬栅消力池三维数学模型,为保证数值模拟结果与模型试验结果相符合,数值模拟建模区域桩号为(0+ 353.5)至(0+ 761.5) cm。数值模拟建模在划分网格时均采用六面体结构化网格(见图 2),网格尺寸为 2~ 2.5 cm;由于消力池内布置悬栅部分是数值模拟计算主要区域,故该区域内网格划分较密,网格尺寸范围大约为 0.8~ 1.5 cm,模型网格总数量大约为 29 000 个。

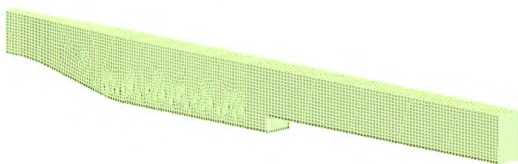


图 3 网格划分示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the grid division

在边界条件设定时,消力池进口边界采用速度进口,进口速度数值根据物理模型试验中实测流量换算而得;出口边界采用压力出口,其压强值为大气压强;上边界采用压力进口,其压强值为大气压强;湍流近壁区采用标准壁面函数进行处理,壁面采用无滑移条件。

2.3 模型验证

通过数值模拟计算得到不同悬栅布置型式下消力池内最大水深,见表 2。根据数学模型计算值和物理模型试验值对比,结果表明两者误差均在 10% 以内,数值模拟结果与模型试验结果吻合相对较好。其中单层悬栅布置型式下计算值与试验值之间的平均误差为 7.85%,双层悬栅布置型式下两者之间的误差为 7.33%,由此可知,双层悬栅布置型式下计算值与试验值之间的误差相对较小。由于单层悬栅布置时,消力池内流态较紊乱,水面波动相对较大,测量最大水深时产生误差较大;双层悬栅布置时,消力池内流态相对稳定,水面波动相对较小,测量时产生误差较小。

表 2 消力池内最大水深及误差

Tab. 2 Maximum depth of the water and error in the stilling basin

栅条数 /根	栅距 b_1 /cm	层距 b_2 /cm	层数	最大水深 H		
				计算值/cm	试验值/cm	误差(%)
7	5.5		1	24.91	26.40	5.64
11	5.5		1	25.27	27.65	8.61
15	5.5		1	25.41	28.02	9.31
7	12	4	2	26.11	28.01	6.78
11	12	4	2	25.69	27.55	6.75
15	12	4	2	25.57	27.93	8.45

3 数值模拟结果对比分析

3.1 消力池内流态分析

根据消力池护坦处水气两相图可知,当消力池内未布置悬栅时,水流的跃前断面水深较小,水跃位置相对靠后,消力池内未布置任何辅助消能工时,水流流速相对较大,则跃后水深相对较小,而消力池护坦处涌浪比较高(见图 4(a))。消力池内布置单层悬栅时,由于悬栅具有一定阻水作用,跃前断面水深增大,水跃位置前移;部分水流由于悬栅作用,流速降低,根据连续方程,流量不变,流速减小,水深增大,但由于跃前断面水深增大,跃后断面水深须减小,而跃后断面水深减小的程度大于因流速减小导致水深增大的程度,所以消力池护坦处涌浪高度降低(见图 4(b))。消力池内布置双层悬栅时,由于双层悬栅呈“W”型布置,悬栅在垂直方向上的阻水断面增加,跃前断面水深更大,水跃位置前移更多;有悬栅垂直阻水断面增大,受到悬栅作用的水流较单层悬栅更多,水流流速减小的幅度增大,水深上升的幅度也随之增大,而由于跃前断面水深增大导致跃

后断面水深降低的幅度较小,因此消力池内水深较大,但由于流速减小,水流相对较稳定,水面比较平

稳,没有剧烈波动,消力池护坦处涌浪高度降低较大(见图4(c))。

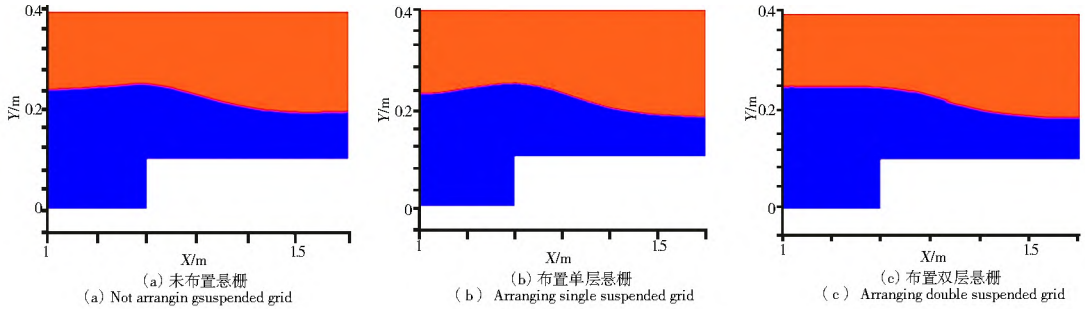


图4 布置悬栅前后消力池护坦处涌浪

Fig. 4 The surge at the apron slab before and after arranging suspended grid in the stilling basin

3.2 消力池内流场分析

根据消力池内未布置悬栅、布置单层悬栅以及布置双层悬栅的流速分布图(图5)可知,未布置悬栅时(图5(a)),消力池内水跃的形成是水流经过消力池护坦时(图5(b)),水流对护坦的冲击很大,由于护坦的阻碍作用,一部分水回流到消力池前端,与后面的来流相互碰撞掺气而形成的,而回流的水流只有较少的一部分,大部分水流通过泄水渠道流入下游;布置悬栅之后(图6、图7),水流不但通过回流形成水跃进行消能,而且水流在悬栅的作用下,相互碰撞形成漩涡,水流流速减小,水流在消力池能更好地掺气消能,使水流动能减少,能平稳地流向下流。布置单层悬栅(图6(a)),水流经过悬栅时,只受到水平断面上的悬栅作用,悬栅使水流产生漩涡的能力相对较小,水流在悬栅产生较少较小的漩涡,更多的水流还是从悬栅下面通过,水流流速较大,对护坦的冲击较大(图6(b)),悬栅起到的消能稳流作用不是很好;布置双层悬栅(图7(a)),水流经过悬栅时,不但受到水平断面上的悬栅作用,而且还受到垂直断面上的悬栅作用,悬栅使水流产生漩涡的能力相

对较大,水流在悬栅周围产生相对较多较大的漩涡,而且布置双层悬栅后,使悬栅的垂直阻水断面增大,受到悬栅作用的水流相对较多,则有相对较少的水流直接从悬栅下面通过,流向护坦的水流流速减小(图7(b)),对护坦冲击减小,出流就相对平稳,悬栅能起到较好地消能作用。

3.3 消力池内压强分析

对比压强云图可知,布置悬栅前后,消力池内均未产生负压,最大压强值均在护坦底部,消力池内未布置悬栅时(图8),消力池高压区域范围较大,布置悬栅后(图9、图10),消力池内高压区域范围减小。对比图9和图10可知,双层悬栅布置时,消力池底板的压强相对较大,单层悬栅布置时,消力池底板的压强相对较小,由于双层悬栅布置时对水流的作用较单层布置更大,栅下水流流速相对较小,则消力池底板受到压强相对较大。对比图8(a)、图9(a)和图10(a)中压强等值线,可以发现未布置悬栅时,压强等值线比较平顺;布置单层悬栅时,等值线有波动,波动范围较小;布置双层悬栅时,压强等值线波动较大,且波动范围增大,说明双层悬栅对水流作用较大。

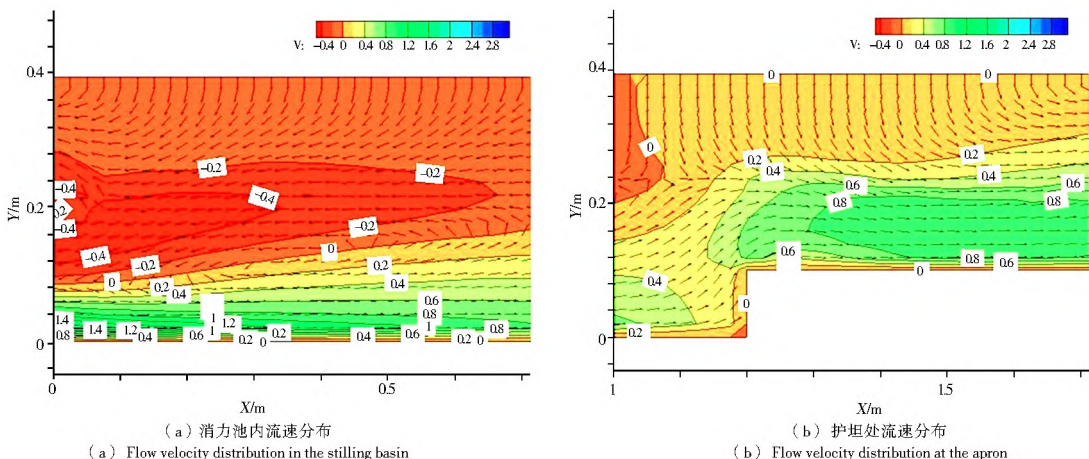


图5 未布置悬栅情况

Fig. 5 The situation of not arranging suspended grid

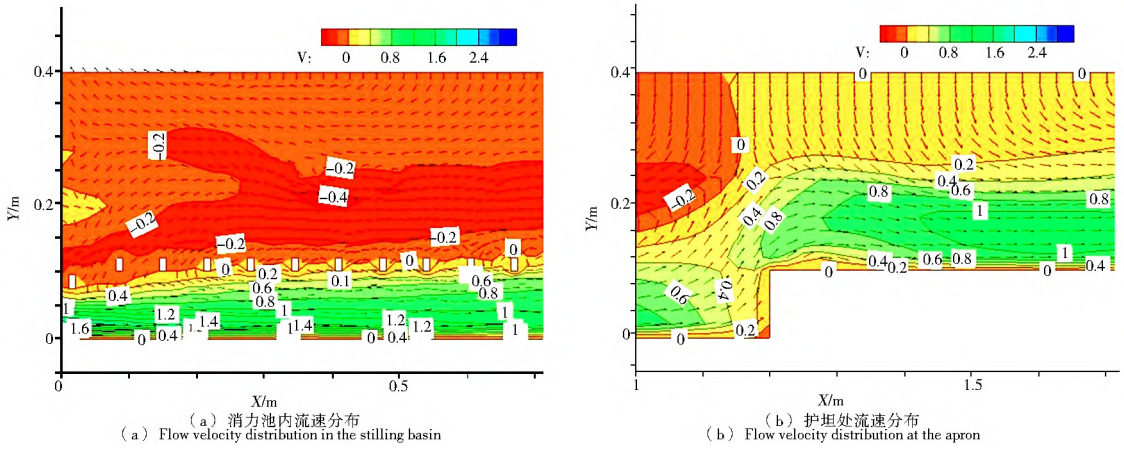


图 6 布置单层悬栅情况

Fig. 6 The situation of arranging single suspended grid

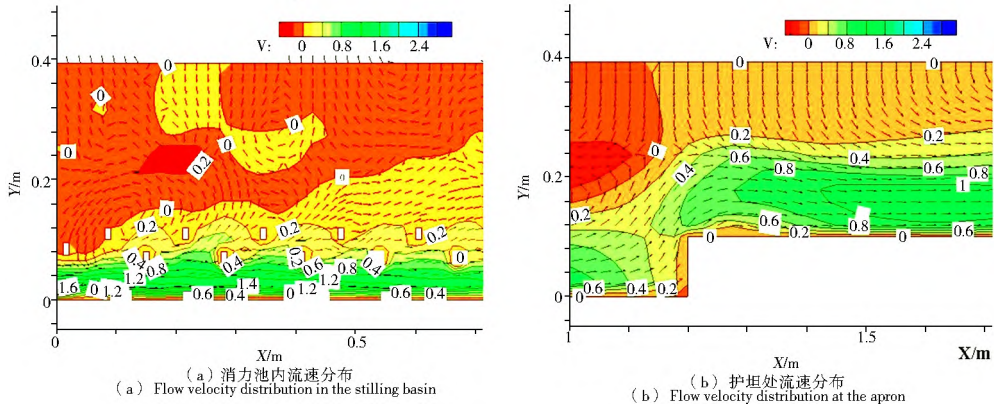


图 7 布置双层悬栅情况

Fig. 7 The situation of arranging double suspended grid

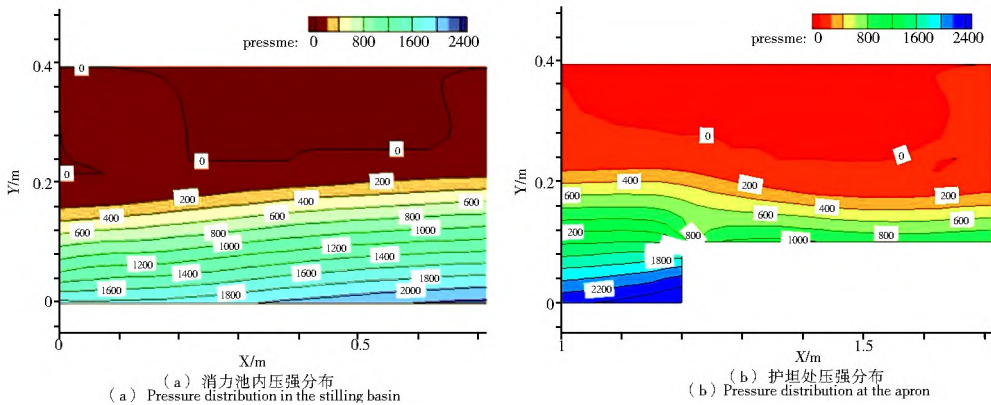


图 8 未布置悬栅情况

Fig. 8 The situation of not arranging suspended grid

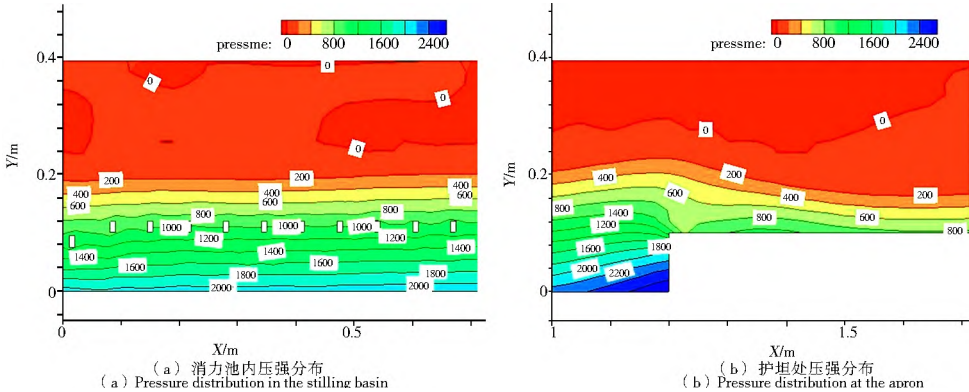


图 9 布置单层悬栅情况

Fig. 9 The situation of arranging single suspended grid

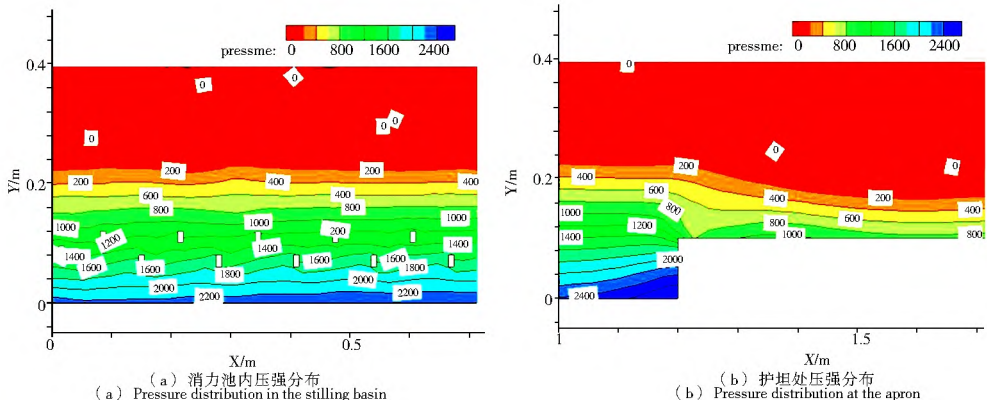


图 10 布置双层悬栅情况

Fig. 10 The situation of arranging double suspended grid

4 结论

(1) 在最大水深计算值与试验值中, 单层悬栅布置时平均误差为 7.85%, 双层悬栅布置时平均误差为 7.33%, 则双层悬栅使消力池内流态稳定, 试验测量误差较小。

(2) 消力池内布置双层悬栅时, 相对未布置悬栅和布置单层悬栅, 护坦处涌浪降低程度较大; 双层悬栅使水流产生漩涡能力加强, 水流流速减小, 对消力池护坦冲击减弱, 出流平稳, 消能效果较好。

(3) 布置悬栅前后, 消力池内均未出现负压, 最大压强均在护坦处, 且布置双层悬栅时压强等值线波动较大, 波动范围增大, 水流作用明显。

参考文献 (References):

[1] 褥勇伸, 廖华胜, 李连侠, 等. 浅水垫消力池的数值模拟与实验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 36-41, 126. (RU Yong shen, LIAO Hua sheng, LI Lian xia, et al. Numerical simulation and experimental investigation on stilling basin with shallow water cushion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 36-41, 126. (in Chinese))

[2] 王均星, 朱祖国, 陈利强. 消力池内辅助消能工对水跃消能效率的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(1): 40-43. (WANG Jun xing, ZHU Zu guo, CHEN Li qiang. Influence of auxiliary energy dissipater in stilling basin on efficiency of energy dissipation in hydraulic jump [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(1): 40-43. (in Chinese))

[3] 尹进步, 梁宗祥, 龚红林. 宽尾墩三元水跃特性试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1333-1338. (YIN Ji bu, LIANG Zong xiang, GONG Hong lin. Experimental study on flow characteristics of 3D hydraulic jump of flaring gate piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1333-1338. (in Chinese))

[4] 张志昌, 孙建, 阎晋垣. 掺气分流墩设施水力特性的试验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2005, 20(1): 56-64. (ZHANG Zhi chang, SUN Jian, YAN Jin yuan. Experimental research on the hydraulic characteristics of aerated flow splitting piers [J]. Journal

of Hydrodynamics, Ser. A, 2005, 20(1): 56-64. (in Chinese))

[5] 邱春, 刘承兰. 宽尾墩消力池非恒定流动水压强特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 20-24. (QIU Chun, LIU Cheng lan. Numerical simulation of unsteady hydrodynamic pressure in the stilling basin of flaring gate pier [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(4): 20-24. (in Chinese))

[6] 吴战营. 消力池内辅助消能工试验研究及数值模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013. (WU Zhan ying. Experimental study and numerical simulation of auxiliary energy dissipater in stilling pool [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese))

[7] 吴战营, 牧振伟. 消力池内悬栅辅助消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 27-31. (WU Zhan ying, MU zhen wei. An experimental study on optimization of suspended grid auxiliary energy dissipater in stilling basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 27-31. (in Chinese))

[8] 李琳, 鲁克恩, 邱秀云, 等. 小石峡水电站导流兼深孔泄洪洞消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 34(2): 5-8. (LI Lin, LU Ke en, QIU Xiuyun, et al. Optimization tests on energy dissipater of diversion and deep flood discharge Tunnel of Xiaoshixia Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 34(2): 5-8. (in Chinese))

[9] 陈华勇, 许唯临, 邓军, 等. 窄缝消能工水力特性的数值模拟与试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 445-451. (CHEN Hua yong, XU Wei lin, DENG Jun, et al. Numerical simulation and experimental study on the characteristics of slit type energy dissipater in high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 445-451. (in Chinese))

[10] 冯国一, 王海军, 唐涛. 坎深和入池能量对跌坎型底流消能工流态影响的数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(2): 69-71. (FENG Guo yi, WANG Hai jun, TANG TAO. Numerical simulation on the influence of step down depth and intake energy to the flow pattern of step down hydraulic jump dissipater [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(2): 69-71. (in Chinese))

[11] 王俊, 符晓, 王道吉, 等. 基于接触理论的水垫塘底板数值模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 88-90. (WANG Jun, FU Xiao, WANG Dao ji, et al. Numerical simulation of the bottom slab in plunge pool based on the contact theory [J]. South to North

- Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 88-90. (in Chinese)
- [12] 施春蓉, 郭新蕾, 杨开林, 等. 旋流环形堰竖井泄洪洞三维流场数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 1035-1039. (SHI Chunrong, GUO Xinlei, Yang KaiLin, et al. Three dimensional numerical simulation of morning glory shaft spillway with swirling flow[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 1035-1039. (in Chinese))
- [13] 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. (XUE Hongcheng, DIAO Mingjun, YUE Shubo, et al. 3D numerical simulation of the jet nappe in the beveled flip bucket of the spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 703-709. (in Chinese))
- [14] 王玲玲, 严忠民. 石梁河水库消力池强紊动水流的数值模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 363-367. (WANG Lingling, YAN Zhongmin. Numerical simulation of energy dissipator flow field for shilianghe reservoir[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 363-367. (in Chinese))
- [15] McGuirk J, Rodi W. A mathematical model for a vertical jet discharging into a shallow lakes[A]. Proceedings of the 17th IAHR Congress[C]. Baden Baden, A72, 1977.
- [16] 栗金钊, 罗文彪, 陈剑. 某斜向涵管进水泵站前池流态数值模拟与整流措施研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 123-126, 153. (LI Jinzhao, LUO Wenbiao, CHEN Jian. Numerical simulation and study on modification of flow pattern at the forebay of a side inlet pump station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 123-126, 153. (in Chinese))
- [17] 刘达, 廖华胜, 李连侠, 等. 浅水垫消力池的大涡模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(5): 28-34. (LIU Da, LI AOHuasheng, LI Lianxia, et al. Large eddy simulation on stilling basin with shallow water cushion[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(5): 28-34. (in Chinese))
- [18] 吴战营, 牧振伟. 辅助消能工联合运用试验研究及数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2013, (7): 111-117. (WU Zhan Ying, MU Zhenwei. Numerical simulation and experimental investigation on the joint use of auxiliary energy dissipater[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (7): 111-117. (in Chinese))
- [19] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐: 新疆电子出版社, 2008. (QIU Xiuyun. Hydraulics[M]. Urumqi, Xinjiang Electronic Press, 2008. (in Chinese))
- [20] 张挺, 伍超, 卢红, 等. X型宽尾墩与阶梯溢流坝联合消能的三维流场数值模拟[J]. 水利学报, 2004, (8): 15-20. (ZHANG Ting, WU Chao, LU Hong, et al. 3D numerical simulation of flow on stepped spillway combined with X shape flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (8): 15-20. (in Chinese))
- [21] 王月华, 包中进, 王斌. 基于 Flow-3D 软件的消力池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 45(4): 454-457, 476. (WANG Yuehua, BAO Zhongjin, WANG Bin. Three dimensional numerical simulation of flow in stilling basin based on Flow-3D[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(4): 454-457, 476. (in Chinese))

(上接第 123 页)

- [14] 周丽萍, 申向东, 白忠强. 外掺剂对水泥土改性效果的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(7): 74-78. (ZHOU Liping, SHEN Xiangdong, BAI Zhongqiang. The experimental study on change in property of cement soil by added additives[J]. Industrial Construction, 2009, 39(7): 74-78. (in Chinese))
- [15] 王凤池, 燕晓, 刘涛, 等. 橡胶水泥土强度特性与机理研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(2): 46-51. (WANG Fengchi, YAN Xiao, LIU Tao, et al. Research on strength characteristics and mechanism of rubberized cement-soil[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 46-51. (in Chinese))
- [16] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477. (LI Jianjun, LIANG Renwang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 473-477. (in Chinese))
- [17] 庞文台, 申向东. 复合水泥土抗渗性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1617-1620. (PANG Wentai, SHEN Xiangdong. Study on impervious performance of cement-soil[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1617-1620. (in Chinese))
- [18] 苏玉杰, 何耀辉, 陈式华. 夯实水泥土抗渗性能试验研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 126-128. (SU Yujie, HE Yaohui, Chen Shihua. Experimental study of the permeability resistance of compacted cement soil[J]. Yellow River, 2011, 33(12): 126-128. (in Chinese))
- [19] GB 50025-2004, 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. GB 50025-2004, Code for building construction in collapsible loess regions[S]. (in Chinese))
- [20] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. GB/T 50123-1999, Standard for soil test method[S]. (in Chinese))
- [21] JGJ 79-2002, 建筑地基处理规范[S]. JGJ 79-2002, code for ground treatment of buildings[S]. (in Chinese))