



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.024

蒋健楠, 牧振伟, 位静静, 等. 悬栅消力池内水流冲刷过程中悬栅抗冲刷研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 156-162. JIANG Jian nan, MU Zhen wei, WEI Jing jing, et al. Anti scouring ability of suspended bars during water scouring of suspended bar stilling basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 156-162. (in Chinese)

悬栅消力池内水流冲刷过程中悬栅抗冲刷研究

蒋健楠, 牧振伟, 位静静, 牛涛

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 悬栅布置在消力池内, 提高消力池消能效果的同时又受水流的冲刷和破坏, 为研究水流对悬栅的稳定性影响情况, 通过模型试验得到单、双层悬栅较优布置型式, 并在较优布置型式下进行冲刷试验, 同时采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型进行数值模拟计算, 对比验证试验结果, 得到在单宽流量设计值 $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$ 所对应的消力池内单层悬栅较优布置型式为栅条数为 11 根、栅距为 5.5 cm、栅高为 10 cm, 第 1 根悬栅受水流冲刷严重, 稳定性影响较大; 双层悬栅较优布置型式为栅条数为 11 根、栅距为 12 cm、层距为 4 cm, 第 1 根悬栅和下层悬栅受水流冲刷严重, 稳定性影响较大, 可以为悬栅的结构设计提高依据。

关键词: 悬栅; 较优布置型式; 冲刷; 数值模拟; RNG $k-\epsilon$; 压强差

中图分类号: TV 653.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0156-07

Anti scouring ability of suspended bars during water scouring of suspended bar stilling basin

JIANG Jian nan, MU Zhen wei, WEI Jing jing, NIU Tao

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

Abstract: The suspended bars in the stilling basin can improve the energy dissipation effect of the stilling basin but are eroded and damaged by water currents. To study the effect of water currents on the stability of the suspended bars, we obtained the optimal layout patterns of the single or double layer suspended bars. We conducted washout tests with the optimal layout patterns. At the same time, we used the RNG $k-\epsilon$ double equation turbulence model to do numerical simulation computation and compared the test results. We found that when the design value of per unit width discharge $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$, the optimal layout pattern of single layer suspended bars is 11 bars with a bar spacing of 5.5 cm and a height of 10 cm. In this model, the first bar was scoured seriously, with its stability greatly compromised. The optimal layout pattern of double layer bars is 11 bars with a bar spacing of 12 cm and a height of 4 cm. In this model, the first bar and the bottom layer were scoured seriously with their stability greatly compromised. The study results can be used to improve the structure of the suspended bars.

Key words: suspended bar; optimal layout pattern; scour; numerical simulation; RNG $k-\epsilon$; pressure difference

悬栅^[1-6]作为一种新型辅助消能工应用到消力池内, 提高了消力池的消能效果, 是一种适用性较强的辅助消能工。李凤兰^[7]通过在消力池内布置不同排列方式的悬栅进行模型试验, 得到了悬栅消力池

消能率最大提高幅度为 15.10%, 最高消能率达 95.14%; 吴战营^[8]借助模型试验和数值模拟手段, 以新疆迪那河五一水库为例, 得到导流洞出口消力池内悬栅最佳体型、布置型式; 朱玲玲等^[9,10]通过均匀正

收稿日期: 2016-04-26 修回日期: 2016-05-24 网络出版时间:
网络出版地址:

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)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51469031); Xinjiang graduate research innovation project (XJGR12015094)

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

交设计及投影寻踪回归试验, 得出了悬栅消力池内最大水深影响因子排序。通过试验研究表明, 消力池内布置悬栅后, 水流流态改变, 消力池下游段水流平稳。但悬栅在提高消力池内消能效果的同时, 也会受到水流的作用。由于悬栅消力池是通过水流与悬栅碰撞进行掺气消能, 掺气水流对悬栅进行冲击, 悬栅极易受到水流的冲刷和破坏, 稳定性亦会受到影响。因此, 研究消力池内水流冲刷过程中悬栅抗冲刷性具有重要意义。本文通过在单宽流量设计值 $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$ 所对应的模型进行试验, 得到消力池内单、双层悬栅较优布置型式; 并在该布置型式下, 在悬栅表面均匀涂抹细沙, 进行冲刷试验, 观察悬栅表面受水流冲刷情况。压强是反映悬栅受水流作用的重要水力参数, 但在模型试验中, 悬栅周围水流运动情况复杂, 不易测量悬栅周围详细的压强场, 采用数值模拟方法^[11-17] 可以有效地解决该问题, 对消力池内单、双层悬栅较优布置型式进行数值模拟计算, 可以得到悬栅周围详细的压强场数据, 与模型试验结果进行对比验证, 为消力池内水流冲刷过程中悬栅抗冲刷性研究提供帮助。

1 模型试验

1.1 模型试验设计

试验采用 $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$ 作为单宽流量设计值, 通过相关水力计算^[18] 得到消力池尺寸, 其中消力池池长 120 cm、池宽 18 cm、池深 10 cm、边墙高 39.5 cm; 试验采用矩形悬栅, 其中悬栅尺寸长 18 cm, 宽 1 cm, 高 2 cm。为便于在模型试验进行观测, 试验模型均采用有机玻璃板制作。布置悬栅时, 在消力池渥奇段布置 4 根悬栅, 取栅高(即悬栅中心点距消力池底板高度) $h = 7 \text{ cm}$ 、栅距(即相邻两根悬栅水平之间的距离) $b_1 = 3.5 \text{ cm}$; 为使水流更好地进入消力池, 在消力池前端布置 1 根悬栅, 取栅高 $h = 8.5 \text{ cm}$, 与渥奇段悬栅栅距 $b_1 = 3.5 \text{ cm}$ 。单层悬栅布置见图 1, 双层悬栅布置时, 采用“W”型布置, 见图 2。

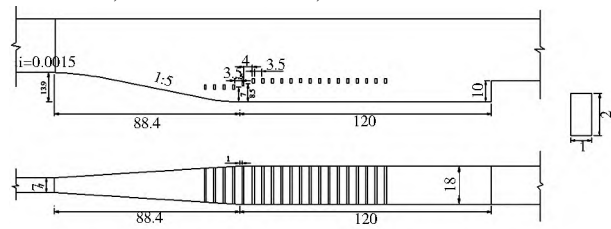


图 1 消力池内布置单层悬栅

Fig. 1 Layout of single layer suspended bars in the stilling basin

1.2 单层悬栅较优布置型式试验

根据单宽流量设计值 $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$ 所对应的

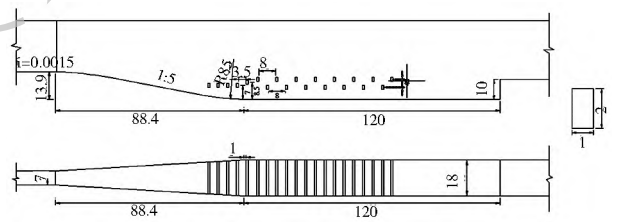


图 2 消力池内布置双层悬栅

Fig. 2 Layout of double layer suspended bars in the stilling basin

消力池模型, 在消力池内布置单层悬栅进行模型试验, 其中布置单层时, 悬栅栅距 b_1 取 3.5 cm、5.5 cm, 栅条数 n 取 7 根、11 根、15 根, 由于栅高与尾坎等高时消能效果较优, 故栅高 h 取 10 cm。在单宽流量设计值 $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$ 下, 通过试验测量记录并计算得到在未布置悬栅、布置单层悬栅时, 消力池内最大水深及消能率情况(见表 1)。未布置单层悬栅时, 消力池内最大水深 $H_1 = 31.40 \text{ cm}$, 消能率 $\eta = 74.29\%$; 消力池内布置单层悬栅时, 改变悬栅布置型式, 最大水深削减值即下降水深 H_2 的变化幅度为 23.76%, 消能率的变化幅度为 0.81%, 可以得到下降水深 H_2 的变化幅度远大于消能率的变化幅度。由于当单层悬栅布置型式为栅距 $b_1 = 3.5 \text{ cm}$ 、栅条数(悬栅的数量) $n = 7$ 根、栅高 $h = 10 \text{ cm}$ 和栅距 $b_1 = 5.5 \text{ cm}$ 、栅条数 $n = 7$ 根、栅高 $h = 10 \text{ cm}$ 时, 水流在消力池内形成远驱式水跃, 消能效果不好, 不作考虑。在消能率 η 变化不大时, 单层悬栅布置型式为栅距 $b_1 = 5.5 \text{ cm}$ 、栅条数 $n = 11$ 根、栅高 $h = 10 \text{ cm}$ 时, 消力池内下降水深 H_2 的值最大, 消能效果较优。

表 1 单层悬栅消力池内最大水深和消能率

Tab. 1 Max water depth and energy dissipation ratio in the stilling basin with single layer suspended bars

试验序号	悬栅布置情况	栅距 b_1/cm	栅条数 n (根)	栅高 h/cm	最大水深 H_1/cm	下降水深 H_2/cm	消能率 $\eta(\%)$
1	无栅	-	-	-	31.40	-	74.29
2	有栅	3.5	7	10	27.07	4.33	76.07
3	有栅	3.5	11	10	27.70	3.70	76.28
4	有栅	3.5	15	10	28.37	3.03	76.44
5	有栅	5.5	7	10	26.40	5.00	76.45
6	有栅	5.5	11	10	27.65	3.75	76.45
7	有栅	5.5	15	10	28.02	3.38	76.90

1.3 双层悬栅较优布置型式试验

由于消力池内布置双层悬栅研究较少, 在单层悬栅研究基础上, 改变双层悬栅的层距(双层悬栅相邻两根悬栅垂直之间的距离)、栅距和栅条数, 在单宽流量 $q_0 = 21.43 \text{ L/s}$ 下进行模型试验, 得到双层

悬栅较优布置型式。参考单层悬栅布置型式, 双层悬栅布置时, 层距 b_2 取 2 cm、3 cm、4 cm, 栅距 b_1 取 8 cm、10 cm、12 cm, 栅条数 n 取 7 根、11 根、15 根。通过试验测量记录并计算得到在未布置悬栅、布置双层悬栅时, 消力池内最大水深及消能率情况(见表 2)。未布置单层悬栅时, 消力池内最大水深 $H_1 = 31.40$ cm, 消能率 $\eta = 74.29\%$; 消力池内布置双层悬栅时, 改变双层悬栅布置型式, 最大水深削减值即下降水深 H_2 的变化幅度为 13.57%, 消能率的变化幅度为 1.30%, 可以得到下降水深 H_2 的变化幅度远大于消能率的变化幅度。在消能率变化不大的情况下, 对比试验 2、3、4 三个方案, 可以得到改变双层悬栅层距时, 层距 $b_2 = 4$ cm 时下降水深 H_2 最大; 对比试验 4、5、6 三个方案, 可以得到改变双层悬栅栅距时, 栅距 $b_1 = 12$ cm 时下降水深 H_2 最大; 对比试验 4、7、8 三个方案, 可以得到改变双层悬栅栅条数时, 栅条数 $n = 11$ 根时下降水深 H_2 最大。因此, 在消能率 η 变化不大时, 双层悬栅布置型式为栅距 $b_1 = 12$ cm, 栅条数 $n = 11$ 根, 层距 $b_2 = 4$ cm 时, 消力池内下降水深 H_2 的值最大, 消能效果较优。

1.4 单、双层悬栅较优布置型式冲刷试验

1.4.1 单层悬栅较优布置型式冲刷试验

通过消力池内布置单层悬栅模型试验, 得到单层悬栅布置型式为栅距 $b_1 = 5.5$ cm、栅条数 $n = 11$

表 2 双层悬栅消力池内最大水深和消能率

Tab. 2 Max water depth and energy dissipation ratio in the stilling basin with double layer suspended bars

试验序号	悬栅布置情况	栅距 b_1 /cm	栅条数 n (根)	层距 b_2 /cm	最大水深 H_1 /cm	下降水深 H_2 /cm	消能率 η (%)
1	无栅	-	-	-	31.40	-	74.29
2	有栅	12	11	2	27.84	3.56	75.74
3	有栅	12	11	3	28.01	3.39	75.70
4	有栅	12	11	4	27.55	3.85	75.62
5	有栅	8	11	4	27.64	3.76	75.17
6	有栅	10	11	4	27.69	3.71	75.46
7	有栅	12	7	4	28.01	3.39	75.32

根、栅高 $h = 10$ cm 时, 消能效果较优。为研究水流对悬栅稳定性影响情况, 在悬栅表面均匀粘上细沙, 然后进行放水冲刷, 观察冲刷效果。通过冲刷试验, 得到消力池内布置单层悬栅时, 悬栅表面受冲刷情况, 见图 3, 可以发现, 悬栅经过水流冲刷后, 消力池上游段悬栅(见图 3(a)), 即第 1 根悬栅表面所粘的细沙被水流冲走较多, 悬栅裸露面积较大, 说明第 1 根悬栅受水流冲击较大, 水流对其稳定性影响较大, 在悬栅结构设计时应增加其抗冲刷强度; 消力池下游段悬栅(见图 3(b))表面所粘的细沙被水流冲走较少, 悬栅裸露面积较小, 说明消力池下游段悬栅受水流冲击较小, 水流对其稳定性影响较小。

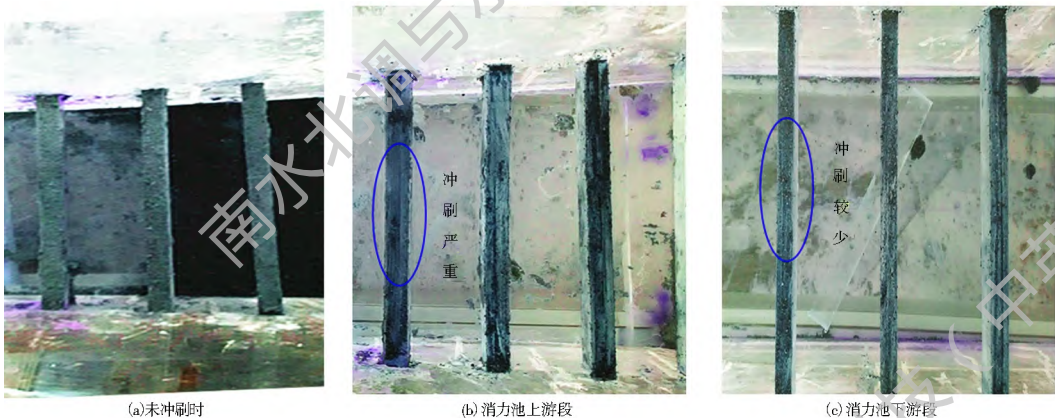


图 3 消力池内单层悬栅受水流冲刷情况

Fig. 3 Scour of single layer suspended bars by water currents in the stilling basin

1.4.2 双层悬栅较优布置型式冲刷试验

通过消力池内布置双层悬栅模型试验, 得到双层悬栅布置型式为层距 $b_2 = 4$ cm、栅距 $b_1 = 12$ cm、栅条数 $n = 11$ 根时, 消能效果较优。为研究水流对双层悬栅稳定性影响情况, 在悬栅表面均匀粘上细沙, 然后进行放水冲刷, 观察双层悬栅受水流冲刷效果。通过冲刷试验, 得到消力池内布置单层悬栅时, 悬栅表面受冲刷情况, 见图 4, 可以发现, 悬栅经过水流冲刷

后, 消力池上游段悬栅(见图 4(a)), 即第 1 根悬栅表面所粘的细沙被水流冲走较多, 悬栅裸露面积较大, 说明第 1 根悬栅受水流冲击较大, 水流对其稳定性影响较大, 在悬栅结构设计时应增加其抗压强度; 消力池下游段悬栅(见图 4(b))表面所粘的细沙被水流冲走较少, 悬栅裸露面积较小, 说明消力池下游段悬栅受水流冲击较小, 水流对其稳定性影响较小。对消力池内上层悬栅与下层悬栅的冲刷情况(见图 4(c)), 可

以得到下层悬栅表面所粘的细沙被水流冲走较多,悬栅裸露面积较大,而上层悬栅表面所粘的细沙被水流冲走较少,悬栅裸露面积较小,说明下层悬栅受水流冲击较大,在悬栅结构设计时应增加其抗冲刷强度。

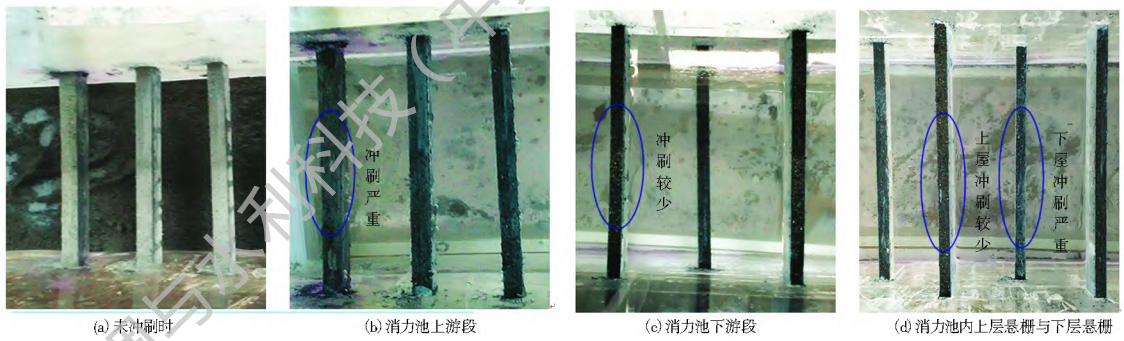


图4 消力池内双层悬栅受水流冲刷情况

Fig. 4 Scour of double layer suspended bars by water currents in the stilling basin

2 数值模拟

2.1 控制方程

由于悬栅消力池内有水流旋转及旋流流动,由 Yakhot 和 Orszag^[19] 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:

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_\tau \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程:

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

ϵ 方程:

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

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 $C_{\mu}=0.09, C_{\epsilon 1}=1.44, C_{\epsilon 2}=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3$ 。

由于模型涉及自由液面的处理,而 VOF 法能较好地处理该问题。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^[20],与 SIMPLE 算法相比, PISO 增加了一个修正步,能更好地同时满足动量方程和连续方程,并且计算精度高,收敛所需时间少。

2.2 网格划分与边界条件设定

根据试验模型,数值模拟建模在对悬栅消力池

进行网格划分时,均采用六面体结构化网格(见图5),网格尺寸范围为 2~2.5 cm;由于消力池内布置双层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,网格尺寸范围为 0.8~1.5 cm,由于不同计算方案时悬栅的栅条数、栅距以及层距均不一样,因此网格划分的疏密程度均不同,各方案模型网格总数量大约为 29 000 个。

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;出口边界和上边界均采用压力进口,其压强值均为大气压强;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。

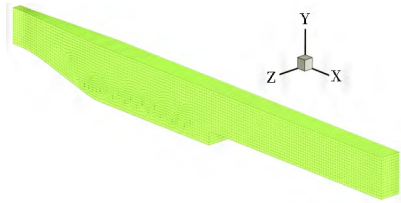


图5 网格划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of grid division

2.3 单、双层悬栅较优布置时计算结果分析

通过数值模拟计算得到单、双层悬栅较优布置时消力池内流速分布(见图6、图7)和压强分布(见图8、图9),可以得知,悬栅较优布置时消力池上游段(见图6(a)、图7(a)),水流刚进入消力池内,流速较大,引起的动水压强较大,因此消力池上游段的总压强较大(见图8(a)、图9(a));水流与悬栅相互作用之后,到消力池下游段(见图6(b)、图7(b)),水流流速减小,引起的动水压强较小,因此消力池上游段的总压强较小(见图8(b)、图9(b)),与模型试验相吻合。

2.4 单、双层悬栅较优布置时悬栅周围压强差分析

悬栅的稳定性受到极大影响,悬栅四面以迎水

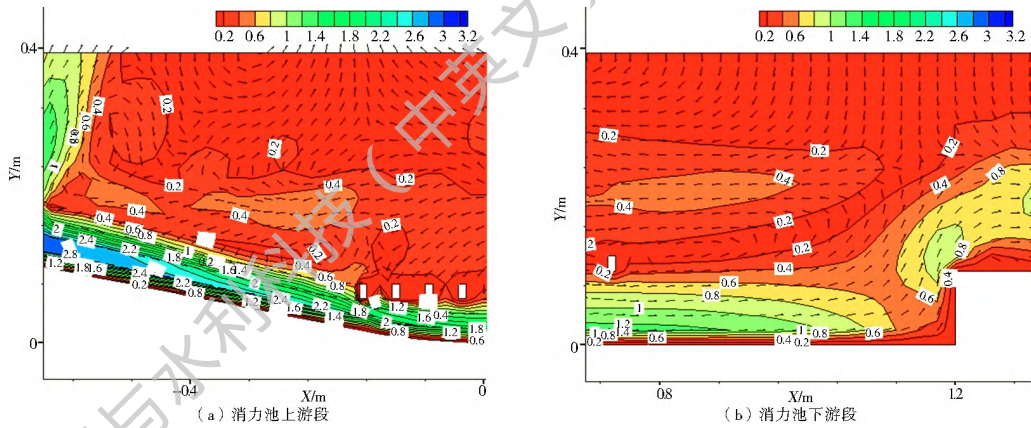


图 6 单层悬栅较优布置时消力池内流速分布(单位: m/s)

Fig. 6 Velocity distribution in the stilling basin with optimal layout of single layer suspended bars (unit: m/s)

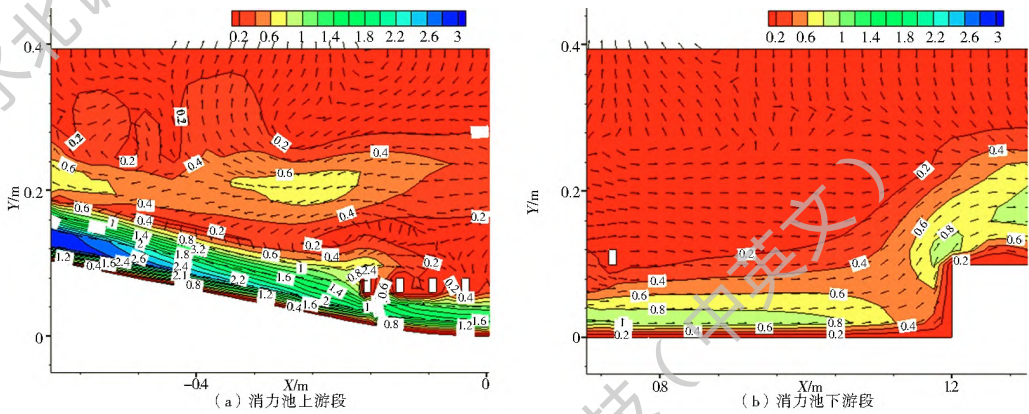


图 7 双层悬栅较优布置时消力池内流速分布(单位: m/s)

Fig. 7 Velocity distribution in the stilling basin with optimal layout of double layer suspended bars (unit: m/s)

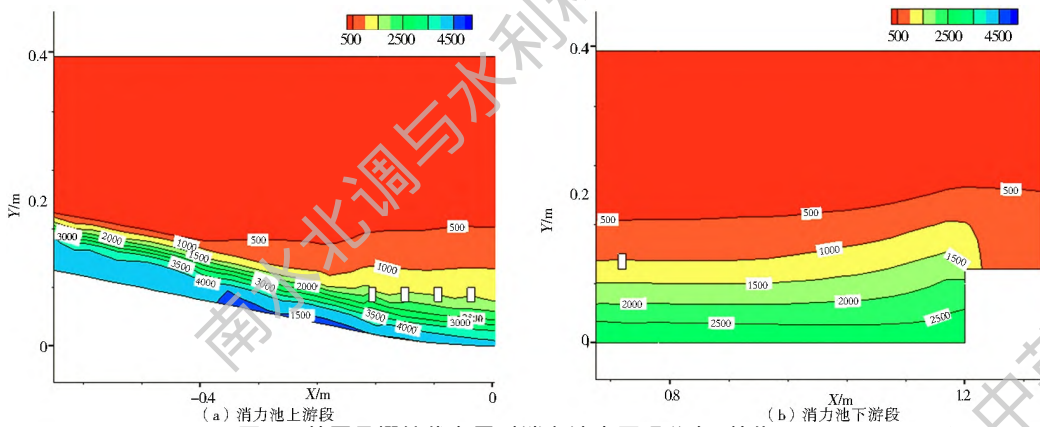


图 8 单层悬栅较优布置时消力池内压强分布(单位: Pa)

Fig. 8 Pressure distribution in the stilling basin with optimal layout of single layer suspended bars (unit: Pa)

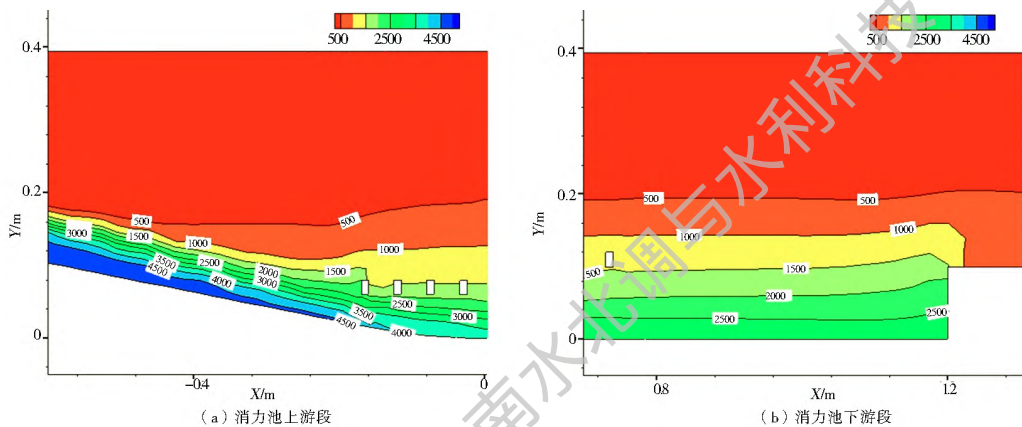


图 9 双层悬栅较优布置时消力池内压强分布(单位: Pa)

Fig. 9 Pressure distribution in the stilling basin with optimal layout of double layer suspended bars (unit: Pa)

面和背水面受到水流作用更为明显,因此以悬栅迎水面 p_1 与背水面 p_2 所受到的时均压强差 Δp (下面简称:压强差)来表征悬栅受到水流作用的大小,但不论压强差值是正还是负,均会对悬栅结构稳定产生影响,为便于分析,取时均压强差 Δp 的绝对值 $|\Delta p|$ 进行数据处理,其中 $|\Delta p|$ 由式5计算。

$$|\Delta p| = |p_1 - p_2| \quad (5)$$

通过数值模拟计算,得到消力池内布置单、双层悬栅时,各个悬栅迎水面与背水面所受到的压强差 $|\Delta p|$,见表3。可知,消力池内布置单层悬栅后,每根悬栅的压强差均不同,但1号悬栅所受压强差最大 $|\Delta p|$,1号悬栅的压强差为397.32 Pa,该值远大于其它悬栅所受到压强差值,这是因为水流刚进入消力池时,水流动能较大,动能水头所形成的动水压强较大,1号悬栅直接受到水流冲击,同一水深处静水压强相差不大,悬栅迎水面与背水面动水压强差别较大,则所受压强差较大,而其它悬栅并未直接受到水流冲击,悬栅动水压强差别较小,则所受压强差较小,因此在1号悬栅结构设计时应提高其抗冲刷强度,与模型试验结果相吻合。

消力池内布置双层悬栅后,每根悬栅的压强

差均不同,但1号悬栅所受压强差 Δp 均为最大,1号悬栅的压强差为703.79 Pa,该值远大于其它悬栅所受到压强差值,这是因为水流刚进入消力池时,水流动能较大,动能水头所形成的动水压强较大,1号悬栅直接受到水流冲击,同一水深处静水压强相差不大,悬栅迎水面与背水面动水压强差别较大,则所受压强差较大,而其它悬栅并未直接受到水流冲击,悬栅动水压强差别较小,则所受压强差较小,因此在1号悬栅结构设计时应提高其抗冲刷强度。表4中1号~5号为保持渥奇段4根和消力池前端1根固定悬栅,6号~16号为消力池内随计算方案变化的悬栅,其中6号、8号、10号、12号、14号、16号、为上层悬栅,7号、9号、11号、13号、15号为下层悬栅,对比上、下层悬栅压强差可知,下层悬栅所受压强差均比相邻上层悬栅大,由于上层悬栅离底板距离较大,迎水面和背水面静水压强差与动水压强差均相差不大,则压强差较小;而下层悬栅离底板距离较小,静水压强差较小,动水压强差较大,则压强差较大,与模型试验结果相吻合。因此悬栅结构稳定性设计时,需增加下层悬栅的抗冲刷强度。

表3(a) 单、双层悬栅布置时各个悬栅压强差 $|\Delta p|$

Tab. 3(a) Pressure difference between suspended bars in single layer and double layer layouts of suspended bars /Pa

布置型式	悬栅编号							
	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号
单层悬栅	397.32	61.09	49.30	8.11	4.93	14.83	4.52	0.72
双层悬栅	703.79	9.66	34.02	12.82	55.61	16.44	101.69	45.06
布置型式	悬栅编号							
	9号	10号	11号	12号	13号	14号	15号	16号
单层悬栅	3.90	7.26	13.29	41.45	74.72	12.21	25.71	12.58
双层悬栅	198.51	7.05	126.51	5.06	70.86	39.14	117.43	12.45

3 结论

为研究在消力池内布置悬栅后水流对悬栅稳定性影响情况,通过模型试验和数值模拟计算,对比分析结果得到以下结论。

(1) 根据在单宽流量设计值下,消力池内悬栅不同布置型式的消能效果,得到单层悬栅较优布置型式为栅条数为11根、栅距为5.5 cm、栅高为10 cm;双层悬栅较优布置型式为栅条数为11根、栅距为12 cm、层距为4 cm。

(2) 通过模型试验,得到单层悬栅布置时,第1根悬栅冲刷比较严重;双层悬栅布置时,第1根悬栅和下层悬栅冲刷比较严重。根据数值模拟,得到计算结果与模型试验结果相吻合;并提取消力池内单、

双层悬栅周围的压强差,得到单层悬栅布置时,第1根悬栅压强差较大;双层悬栅布置时,第1根悬栅和下层悬栅压强差较大。说明在单层悬栅布置时,第1根悬栅在结构设计时需要提高其抗冲刷强度;在双层悬栅布置时,第1根悬栅和下层悬栅在结构设计时需要提高其抗冲刷强度。

参考文献(References):

- [1] 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 dissipator in stilling basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 27-31. (in Chinese))
- [2] 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 Zhaarying. Experimental study and numerical simulation of auxiliary energy dissipater in stilling pool [D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [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, 104. (WU Zhaarying, MU Zherwei, PAN Guang lei. Experimental study on energy dissipation after setting suspended grids in plunge pool of diversion tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(4): 39-41, 104. (in Chinese))
- [4] 蒋健楠, 牧振伟, 张佳伟. 消力池内双层悬栅对消能效果影响试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 157-160. (JIANG Jian nan, MU Zherwei, ZHANG Jiayi. Experiment on impact of double suspended grid on energy dissipation effect in stilling pool [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(3): 157-160. (in Chinese))
- [5] 蒋健楠, 牧振伟, 张佳伟, 等. 基于均匀正交试验的消力池内双层悬栅布置优化试验[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(5): 357-362. (JIANG Jian nan, MU Zherwei, ZHANG Jiayi, et al. Double suspended grid layout optimization test in the absorption basin based on the uniform orthogonal design [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5): 357-362. (in Chinese))
- [6] 蒋健楠, 牧振伟, 贾萍阳, 等. 消力池内双层悬栅层距对消能特性影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015, (11): 156-160. (JIANG Jian nan, MU Zherwei, JIA Ping yang, et al. Research on the layer distance of double Suspended Grid impact on energy dissipation character effect in stilling pool [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (11): 156-160. (in Chinese))
- [7] 李凤兰. 悬栅消力池消能特性的试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2006. (LI Feng lan. Experimental Research on characteristic of suspended grid plunge pool energy dissipation [D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2006. (in Chinese))
- [8] 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 Zhaarying, MU Zherwei. 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))
- [9] 朱玲玲. 底流消力池内悬栅消能工布置型式对消能效果影响研究[D]. 新疆: 新疆农业大学, 2014. (ZHU Ling ling. Energy dissipation influence on arrangement type of energy dissipater suspension grid in underflow energy dissipation basin [D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2014. (in Chinese))
- [10] 朱玲玲, 牧振伟, 杨力行. 悬栅消能工均匀正交设计及投影寻踪回归试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 210-214. (ZHU Ling ling, MU Zherwei, YANG Lixing. Experiment on uniform orthogonal design and projection pursuit regression of energy dissipater of suspension grid in stilling pool [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(6): 210-214. (in Chinese))
- [11] 蒋健楠, 牧振伟, 张佳伟, 等. 双层悬栅消力池的水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 124-130. (JIANG Jian nan, MU Zherwei, ZHANG Jiayi. Numerical simulation for hydraulic characteristics of double suspended grid in the stilling basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 124-130. (in Chinese))
- [12] 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 Huayong, XU Weilin, 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))
- [13] 邱春, 刘承兰. 宽尾墩消力池非恒定流动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 Chenglan. 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))
- [14] 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 Kai lin, 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))
- [15] 苏东朋, 郝霞. 齿墩式内消能工的水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 79-81, 13. (SU Dong peng, HAO Ruixia. Numerical simulation of hydraulic characteristic of tooth block inner energy dissipaters [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 79-81, 13. (in Chinese))
- [16] 程飞, 白瑞迪, 刘善均, 等. 数值模拟对研究微挑消力池水力特性[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 71-78. (CHENG Fei, BAI Ruodi, LIU Shan jun, et al. Comparative numerical simulation of hydraulic characteristics of deflecting stilling basin [J]. Journal of Hydroelectric engineering, 2012, 31(2): 71-78. (in Chinese))
- [17] 史志鹏, 张广根, 何婷婷. 低水头辅助消能工水力特性数值模拟计算研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 106-108, 123. (SHI Zhipeng, ZHANG Guanggen, HE Tingting. Numerical simulation of hydraulic performance of low head auxiliary energy dissipater [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 106-108, 123. (in Chinese))
- [18] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐: 新疆电子出版社, 2008. (QIU Xiuyun. Hydraulics [M]. Urumchi: Xinjiang Electronic Press, 2008. (in Chinese))
- [19] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence I. Basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51.
- [20] 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))