

跌坎消力池脉动压强试验

杨敏,李会平,缙文娟,尹红霞

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为了对跌坎消力池的水动力特性作更深入的研究,为跌坎消力池的设计防护提供参考,基于模型试验对跌坎消力池脉动压强的分布规律、幅值特性和频谱特性进行了系统研究。结果表明:水流条件是影响脉动压强的主要因素,跌坎消力池底板脉动压强系数沿程呈先增大后减小并逐渐趋于稳定的趋势;跌坎消力池底板中线和靠近边墙的脉动压强相当,脉动压强最大达到总水头的5.1%;跌坎消力池前端位于泄槽边墙延长线附近区域的脉动压强最大,最大达到总水头的11.5%;跌坎消力池前端中线的脉动压强比传统消力池有明显降低,最大降幅达55.2%。

关键词:跌坎消力池;水动力特性;脉动压强;功率谱;总水头

中图分类号:TV135.2;TV653⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)02-0024-06

Experimental study on fluctuating pressure of stilling basin with drop sill//YANG Min, LI Huiping, GOU Wenjuan, YIN Hongxia(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: In order to thoroughly research the hydrodynamic characteristics of a stilling basin with a drop sill, and provide a reference for its design and protection, the distribution characteristics, amplitude, and spectral features of the fluctuating pressure were studied based on physical model experiments. The experimental results show that the flow condition is the main factor influencing the fluctuating pressure, and the fluctuating pressure coefficient of the stilling basin slab increases and then decreases in the direction of streamflow, before finally stabilizing. The fluctuating pressure of the middle line of the slab is close to that of the side wall, and the maximum fluctuating pressure at these two locations reaches 5.1% of the total water head. The maximum fluctuating pressure occurs in the region near the chute sidewall extension line in the front of the stilling basin, and it reaches 11.5% of the total water head. Compared with a traditional stilling basin, the fluctuating pressure of the middle line in the front of the stilling basin significantly decreases, and the maximum difference reaches 55.2%.

Key words: stilling basin with drop sill; hydrodynamic characteristic; fluctuating pressure; power spectrum; total water head

水流脉动压强的存在增大了消力池底板所承受的瞬时荷载,提高了对消力池底板强度和稳定性的要求^[1],设计荷载时必须考虑脉动压强的影响以保证消力池的安全运行。跌坎消力池^[2]作为一种新型消能工,其水流形态^[3-4]与传统底流消力池相比有明显不同。跌坎的体型、上游来流条件、消力池内水深对水流流态的影响都非常明显,从而导致消力池的水动力特性发生变化^[5-7]。因此,深入研究跌坎消力池的脉动压强具有重要的理论意义和工程应用价值。罗永钦等^[8]对“陡坡+跌坎”式消力池中线脉动压强进行了研究,秦翠翠等^[9-10]对跌扩型消力池中线脉动压强进行了研究,但都没有涉及脉动压强沿

消力池横向的分布规律,其他有关跌坎消力池脉动压强沿横向分布规律的研究也较少。本文通过大比尺($L_r=50$)水工模型试验重点研究跌坎消力池底板上表面脉动压强的幅值特性、相关特性、空间积分尺度、频谱特性,以找出跌坎消力池脉动压强沿纵向和横向的分布规律;通过对脉动压强的纵向和横向对比以寻找消力池中脉动压强最大的区域,并与传统消力池进行对比来分析跌坎消力池脉动压强相对于传统消力池的降低幅度。

1 模型布置

以梨园水电站为原型进行跌坎消力池脉动压强

试验,梨园水电站的主要泄洪建筑物为布置于右岸的溢洪道,出口采用跌坎消力池消能。溢洪道最大泄洪落差为 100.0 m,最大单宽流量 $258.0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;溢洪道堰顶距消力池底板高差 118.0 m;溢洪道坡度为 22.2%,宽度为 73.5 m;跌坎高度为 15.7 m;消力池左右对称布置,长度为 131.0 m,深度为 24.0 m,底部宽度为 84.0 m,边墙坡度为 1:0.30,尾坎迎水面坡度为 1:2.5;消力池底部宽度与溢洪道泄槽宽度的比值约为 1.14。

模型按重力相似律设计,模型几何比尺 $L_r=50$,模型布置如图 1 所示,跌坎体型如图 2 中“体型 1”所示。消力池底板中心线共布置 26 个脉动压强测点,间隔 10.0 cm(原型 5.0 m);位于泄槽边墙延长线附近的 A 列和靠近边墙的 B 列各布置 15 个脉动压强测点,在消力池上游 1/3 范围内测点间隔 10.0 cm(原型 5.0 m)、下游 2/3 范围内测点间隔 20.0 cm(原型 10.0 m),脉动压强测点布置如图 3 所示。采用中国水利科学研究院提供的硅压阻式差压传感器和 64 通道 DJ800 采集系统对各测点的脉动压强进



图 1 模型布置

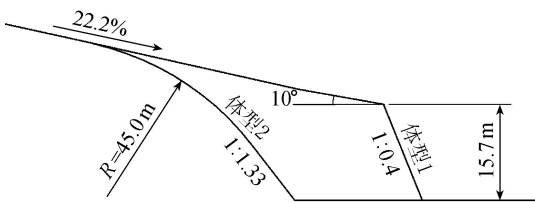


图 2 消力池跌坎体型

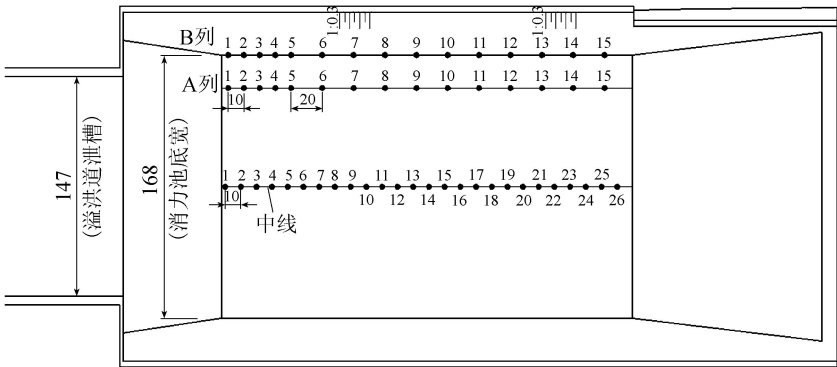


图 3 模型脉动压强测点布置(单位:cm)

行同步测量、数据采集和分析,采样频率 $f=50 \text{ Hz}$,样本容量 $N=8192$ 。

2 脉动压强的幅值特性

2.1 脉动压强系数

跌坎消力池跌坎高度与坝高的比值 $a/H=0.13$ (a 为跌坎高度,即跌坎至消力池底板的高度; H 为坝高,即溢流坝顶至消力池底板的高度)。引入无量纲化参数——反映水流条件的流能比 k 、表征脉动压强强度的脉动压强系数 ξ 、测点相对位置 η ,计算公式分别为

$$k = q/(g^{0.5}h^{1.5}) \tag{1}$$

$$\xi = \sigma_p/(\rho gh) \tag{2}$$

$$\eta = x/l \tag{3}$$

式中: q 为单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; h 为上下游水位差, m ; σ_p 为水流脉动压强, kPa ; x 为测点与消力池首端的距离, m ; l 为消力池长度, m 。

同步测量跌坎消力池底板上表面的水流脉动压强,脉动压强的幅值特性可以用脉动压强系数 ξ 来表示,其沿程分布如图 4 所示。

由图 4 可见,脉动压强系数 ξ 及最大脉动压强系数 $\xi_{\max}$ ($\xi_{\max}$ 为同一水流条件下沿程最大测点的脉动压强系数) 均随流能比 k 的增大而增大。① $k=0.044 \sim 0.054$ 范围内,中线、A 列、B 列上表面脉动压强幅值基本相当,随流能比的增大各列脉动压强的增幅很小,且基本呈沿程减小的趋势但沿程变化幅度不大。A 列 $\xi_{\max}$ 略高于中线和 B 列,A 列相对于 B 列的增幅在 13.7% ~ 32.4%。② 在消力池上游约 1/3 范围内,流能比从 0.054 增大到 0.056 时脉动压强系数大幅增大且 A 列脉动压强增幅尤为明显:A 列 $\eta=0.10$ 测点的脉动压强系数增幅达 217.4%;B 列 $\eta=0.14$ 测点的脉动压强系数增幅达 51.4%。A 列 $\xi_{\max}$ 远高于中线和 B 列, $k=0.056$ 时 A 列相对于 B 列的增幅达到最大,为 177.8%。

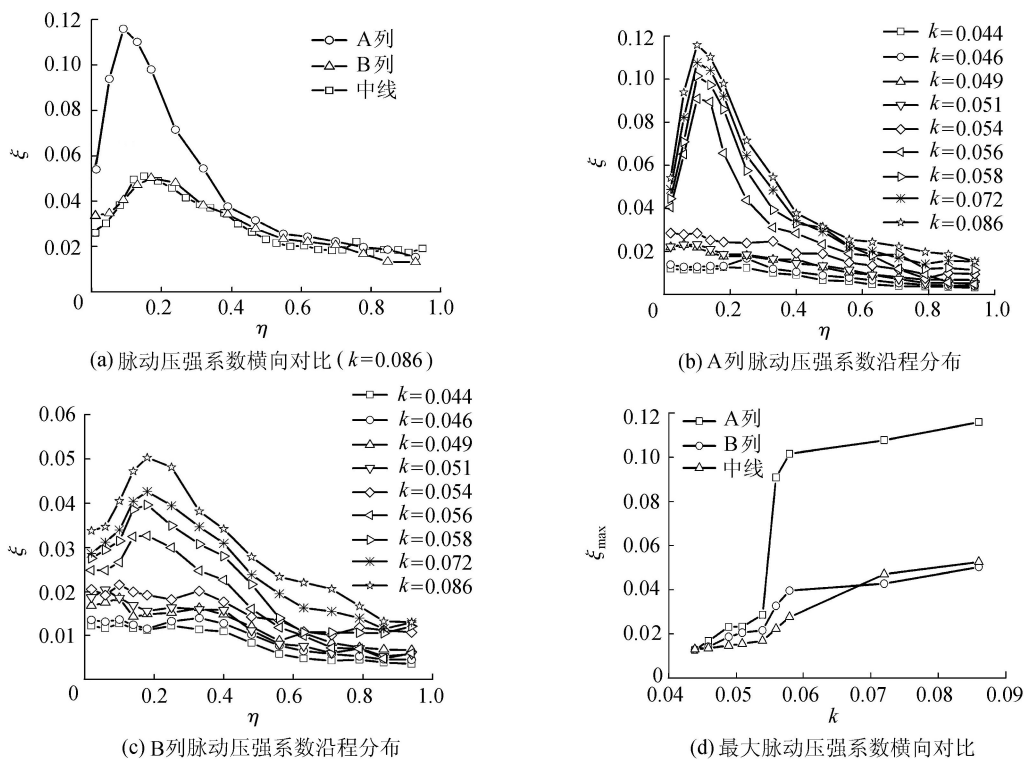


图4 脉动压强系数沿程分布及横向对比

③在 $k=0.056 \sim 0.086$ 范围内,各列脉动压强系数沿程先增大后减小,随流能比的增大各列脉动压强的增幅相对较小。在消力池上游约 $1/3$ 范围内,A 列脉动压强系数明显大于中线和 B 列,中线和 B 列上表面脉动压强幅值相当; $k=0.086$ 时 A 列脉动压强最大达到总水头的 11.5% ,中线和 B 列脉动压强相当,最大达到总水头的 5.1% 。在消力池下游约 $2/3$ 范围内,脉动压强系数随流能比增大的增幅趋于平稳且各列脉动压强系数基本相当。

从 $k=0.054$ 增大到 $k=0.056$ 的过程中脉动压强大幅增大主要是在该过程中消力池内水流流态发生了变化, $k=0.044 \sim 0.051$ 时水流流态为面流, $k=0.054$ 时水流流态为面流向底流过渡,由跌坎顶部射出的水流不能弯曲向下潜入池底,主流大体上沿着水平方向逐渐扩展,流速较高的部分始终位于水流的表面,消力池底板脉动压强较小。 $k=0.056 \sim 0.086$ 时水流流态为底流,由跌坎顶部射出的水流受重力作用弯曲向下跌入消力池中形成底流型的衔接,在消力池上游约 $1/3$ 范围内形成剧烈的漩滚,从而导致消力池底板脉动压强急剧增大。A 列脉动压强系数明显大于中线和 B 列主要是由于在突扩处存在回流引起的,由于存在突扩和主流的卷吸作用,水流进入消力池后在主流两侧形成两个对称的存在立轴漩涡的回流区。A 列脉动压强测点布置在泄槽边墙延长线的附近,正好处于主流区和回流区的交界面上,存在较大的流速梯度,从而引起强烈的紊动

掺混现象,导致该列脉动压强明显增大。在消力池下游约 $2/3$ 范围内,水流流速和紊动程度沿程减小且两侧回流的影响减弱,消力池底部水流平顺,从而导致消力池底板脉动压强随水流条件、沿程及横向的变化不大。因此从脉动压强的角度考虑,消力池前端位于泄槽边墙延长线附近的区域是消力池中脉动压强最大的区域,应该加强防护。

2.2 脉动压强的概率密度

水流脉动压强的幅值特性可以用其概率密度函数来表示,概率密度是否正态分布是研究脉动压强所关心的问题。通过计算脉动压强的偏态系数和峰度系数也可以判别其概率密度的正态性。

A 列脉动压强标准化后的概率密度如图 5 所示,偏态系数和峰度系数如图 6 所示。

由图 5 可知,脉动压强概率密度分布基本一致

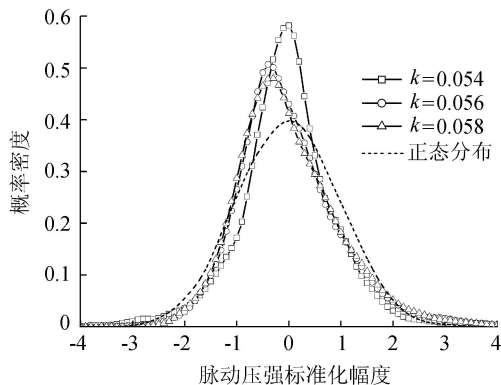


图5 A 列典型测点 ($\eta=0.13$) 概率密度

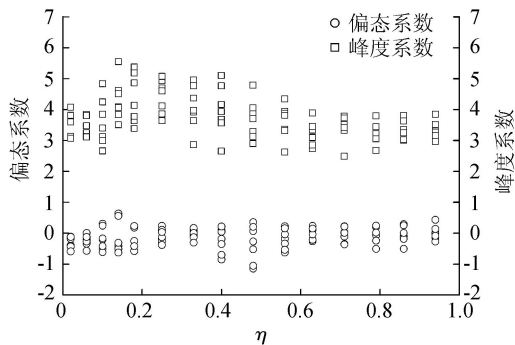


图6 A列偏态系数和峰度系数

且基本符合正态分布,但都比标准正态分布高瘦;概率密度分布随流能比的增大变得更加平缓,更加接近标准正态分布;在 $k=0.054$ 时与 $k=0.056$ 时 A 列概率密度差别较大, $k=0.054$ 时的概率密度明显高瘦,而 $k=0.056$ 与 $k=0.058$ 时的概率密度比较平缓且非常接近,说明 $k=0.056$ 时比 $k=0.054$ 时脉动幅值范围有明显的增加,脉动的剧烈程度明显加剧,脉动压强大幅增强。中线和 B 列在各水流条件下概率密度都基本相当且基本符合正态分布。由图 6 可知,脉动压强的偏态系数集中在 0 附近 ($-1.0 \sim 1.0$ 之间),说明脉动压强出现正偏和负偏的几率均等;峰度系数多数超过 3.0,说明在多数水流条件下底板上表面脉动压强的概率密度比标准正态分布更加高瘦。

3 脉动压强的相关特性及空间积分尺度

3.1 相关系数

消力池底板脉动压强的时空相关系数表示在不同时刻不同位置测点脉动压强之间的相互依存关系,同时反映大尺度涡旋在一定空间范围内保持其尺度随水流向下游传播的特性。自相关系数反映同一测点在不同时刻的相关性;互相关系数反映同一时刻不同测点之间的相关性,同时反映该位置涡旋尺度的大小。典型测点的自相关系数如图 7 所示, A、B 两列沿程和 A-B 列横向的互相关系数如图 8 所示。

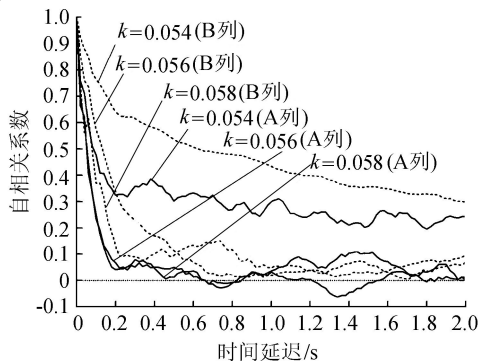


图7 典型测点 ($\eta=0.13$) 自相关系数

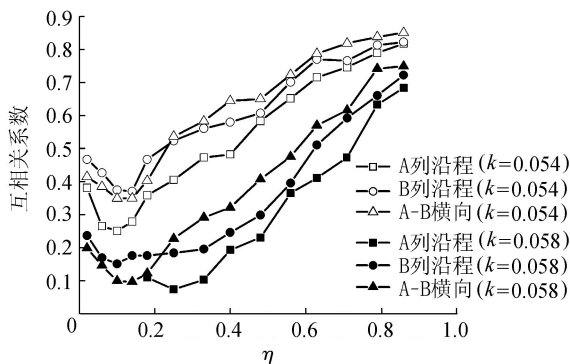


图8 互相关系数沿程分布

由图 7 可知, B 列自相关系数曲线高于 A 列; A、B 列自相关系数曲线均随流能比的增大而降低, $k=0.056$ 相比 $k=0.054$ 降幅明显; $k=0.086$ 相比 $k=0.056$ 自相关系数变化幅度不大。

由图 8 可知, A、B 两列沿程和 A-B 列横向的互相关系数变化趋势一致,随着流能比的增大而降低且沿程先略微降低后增大,消力池前端 $\eta=0.06 \sim 0.18$ 范围内测点的互相关系数最小,消力池末端测点的互相关系数最大,最大约为 0.8; B 列及 A-B 列横向 (同桩号测点原型横向间距 10.0 m) 互相关系数基本相当, A 列互相关系数低于 B 列但相差很小。

3.2 空间积分尺度

脉动压强的空间积分尺度可以表示紊流大涡旋的平均尺度,且能够决定脉动压强保持相同相位向下游传递区间的大小。消力池底板脉动压强的空间积分尺度与坎高的比值的沿程分布如图 9 所示。

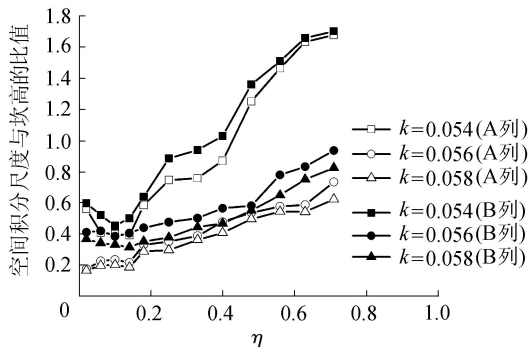


图9 空间积分尺度与坎高的比值的沿程分布

由图 9 可知, A 列脉动压强空间积分尺度略小于 B 列且分布趋势基本一致; $k=0.054$ 时脉动压强空间积分尺度沿程先减小,在 $\eta=0.10 \sim 0.14$ 之间达到最小而后沿程增大; $k=0.056$ 与 $k=0.058$ 时脉动压强空间积分尺度变化趋势一致且基本沿程增大。在消力池上游约 1/5 范围内脉动压强空间积分尺度基本相当,在消力池下游约 4/5 范围内 $k=0.054$ 时较 $k=0.056$ 时脉动压强空间积分尺度有明显增大。脉动压强空间积分尺度随流能比的增大而减小;空间积分尺度与脉动压强系数分布趋势相反。

4 脉动压强的频谱特性

在频域范围内脉动能量的分布情况可以用脉动压强功率谱密度表示。A 列典型测点脉动压强归一化功率谱密度如图 10 所示。

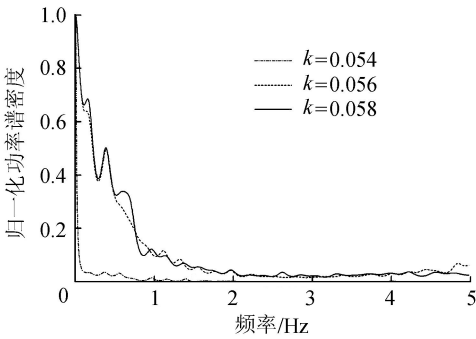


图 10 A 列典型测点 ($\eta=0.10$) 归一化功率谱密度

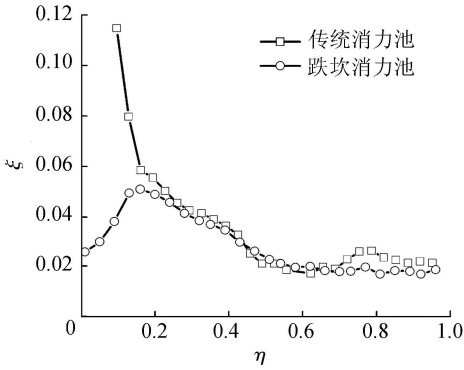
由图 10 可知,归一化功率谱密度分布曲线基本随流能比的增大而增大,且随流能比的增大其频率范围扩大并向高频转化。脉动能量主要由低频大尺度涡旋决定,在消力池上游约 1/3 范围内, $k=0.054$ 时 A 列能量集中在 1.0 Hz 以内; $k=0.056$ 与 $k=0.058$ 时 A 列能量集中在 3.0 Hz 以内,B 列能量集中在 2.0 Hz 以内(图略);在消力池下游约 2/3 范围内,各水流条件下脉动能量都集中在 0.5 Hz 以内。A、B 两列归一化功率谱密度曲线分布规律基本一致,在 $k=0.044 \sim 0.054$ 时 A 列的归一化功率谱密度略高于 B 列,在 $k=0.056 \sim 0.086$ 时 A 列的归一化功率谱密度明显高于 B 列。

5 跌坎消力池与传统消力池脉动压强对比

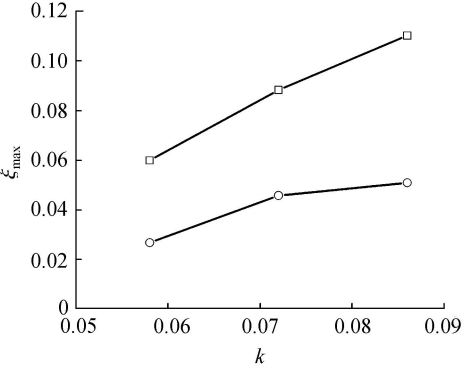
为了研究跌坎对消力池脉动压强的影响,保持其他结构不变仅改变跌坎体型,溢洪道末端用“圆弧段+直线段”与消力池衔接构成传统消力池,圆弧段半径为 45.0 m(原型)、直线段坡度为 1 : 1.33,如图 2 中“体型 2”所示。

将相同水流条件下跌坎消力池和传统消力池中线上表面的脉动压强系数进行对比,如图 11 所示,图 11(a)为流能比 $k=0.086$ 时脉动压强系数的沿程分布对比,图 11(b)为各种水流条件下最大脉动压强系数 $\xi_{\max}$ 对比。流能比 $k=0.086$ 时消力池 A、B 两列脉动压强系数的沿程分布对比如图 12 所示。

由图 11 可知,传统消力池与跌坎消力池底板中线的脉动压强沿程分布不同。传统消力池脉动压强峰值出现在消力池首端,脉动压强呈沿程衰减的趋势,在消力池前半段衰减较快,消力池后半段衰减缓慢最终趋于稳定;跌坎消力池底板脉动压强在冲击点附近存在一个脉动压强强度和强度梯度都比较大

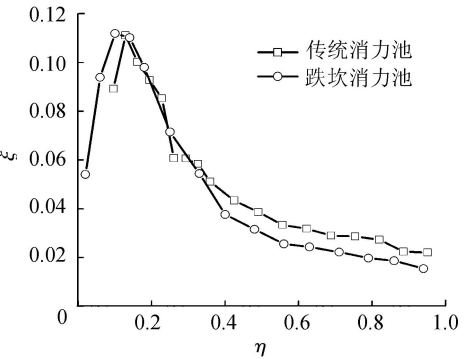


(a) 脉动压强系数沿程分布 ($k=0.086$)

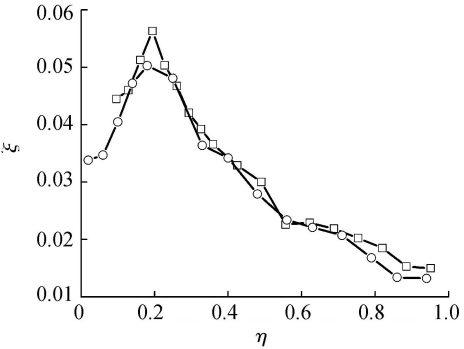


(b) 最大脉动压强系数

图 11 消力池中脉动压强系数对比



(a) A 列



(b) B 列

图 12 消力池 A、B 两列脉动压强系数沿程分布对比 ($k=0.086$)

的区域,脉动压强强度在冲击点最大,沿程呈先增大后减小的趋势。

由图 11 和图 12 可知:跌坎消力池前端中线上表面的脉动压强比传统消力池有明显降低,最大脉

动压强降幅达到 55.2% ;在消力池的中后部跌坎消力池与传统消力池的脉动压强相当;A、B 两列跌坎消力池与传统消力池的脉动压强相当。可见,跌坎消力池能有效地降低消力池前端中线上表面的脉动压强,对于底板安全运行有利;而对消力池中后部以及 A、B 两列的脉动压强影响较小。

6 结 论

- a. 水流条件是影响脉动压强的主要因素,脉动压强系数随流能比的增大而增大。
- b. 跌坎消力池上游约 1/3 范围内,消力池底板中线和靠近边墙的 B 列的脉动压强相当,最大脉动压强达到总水头的 5.1% ;位于泄槽边墙延长线附近的 A 列脉动压强在 $k=0.056$ 与 $k=0.086$ 时远大于中线和 B 列,最大达到总水头的 11.5% ;在流能比 $k=0.054$ 增大至 $k=0.056$ 时各列脉动压强大幅增加,A 列增幅尤为明显,最大增幅超过 200%。在消力池下游约 2/3 范围内,消力池底部水流平顺,上游水流条件及测点位置的变化对脉动压强的影响不大。
- c. 跌坎消力池前端位于泄槽边墙延长线附近区域的脉动压强最大,应该加强防护。
- d. 跌坎消力池前端中线的脉动压强比传统消力池有明显降低,最大脉动压强降幅达到 55.2% 。

参考文献:

[1] 刘沛清,刘心爱,李福田. 消力池底板块的失稳破坏机理及其防护措施[J]. 水利学报,2001(9):1-9. (LIU Peiqing, LIU Xinai, LI Futian. Failure mechanism of bottom plate in stilling basin and counter measure for protection[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(9): 1-9. (in Chinese))

[2] 王丽杰,杨文俊,陈辉,等. 跌坎型底流消能工研究综述[J]. 人民长江,2013,44(3):59-62. (WANG Lijie, YANG Wenjun, CHEN Hui, et al. Research review of step-down floor underflow energy dissipater[J]. Yangtze River, 2013, 44(3): 59-62. (in Chinese))

[3] 陈朝,王立辉,王海军. 跌扩型底流消能工消能的试验研究[J]. 水力发电学报,2012,31(4):145-149. (CHEN Zhao, WANG Lihui, WANG Haijun. Experimental study on energy dissipation of expanding falling-sill bottom-flow energy dissipater [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 145-149. (in Chinese))

[4] 毛舒娅,张强,王立辉. 跌扩型底流消能工坎后立轴漩

涡水力特性分析[J]. 中国农村水利水电,2010(11): 107-110. (MAO Shuya, ZHANG Qiang, WANG Lihui. Research on hydraulic characteristics of vertical vortexes behind sills of energy dissipaters with the step-down floor [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010 (11): 107-110. (in Chinese))

[5] 王海军,张强,唐涛. 跌坎式底流消能工的消能机理与水力计算[J]. 水利水电技术,2008,39(4):46-48. (WANG Haijun, ZHANG Qiang, TANG Tao. Energy dissipation mechanism and hydraulic calculation of falling-sill bottom-flow energy dissipater [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(4): 46-48. (in Chinese))

[6] 孙双科,柳海涛,夏庆福,等. 跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J]. 水利学报,2005,36(10):1-7. (SUN Shuangke, LIU Haitao, XIA Qingfu, et al. Study on stilling basin with down floor for energy dissipation of hydraulic jump in high dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1-7. (in Chinese))

[7] 张功育,汤健,王海军,等. 跌坎式底流消能工的消能机理分析与研究[J]. 南水北调与水利科技,2005,3(6):43-45. (ZHANG Gongyu, TANG Jian, WANG Haijun, et al. Analysis and research of energy dissipation for falling-sill bottom-flow[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(6): 43-45. (in Chinese))

[8] 罗永钦,何大明,张绍春,等. “陡坡+跌坎”式消力池板块稳定特性试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2012,20(2):228-236. (LUO Yongqin, HE Daming, ZHANG Shaochun, et al. Experimental study on stilling basin with step-down for floor slab stability characteristics [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 228-236. (in Chinese))

[9] 秦翠翠,杨敏,董天松. 跌坎消力池水力特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(6):119-122. (QIN Cuicui, YANG Min, DONG Tiansong. Hydraulic characteristics of stilling basin with drop sill[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 119-122. (in Chinese))

[10] 李树宁,杨敏,董天松,等. 跌坎消力池水动力荷载特性试验研究[J]. 水力发电学报,2014,33(3):138-142. (LI Shuning, YANG Min, DONG Tiansong, et al. Experimental study on characteristics of hydrodynamic load in stilling basin with drop sill [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 138-142. (in Chinese))

(收稿日期:2014 - 12 - 26 编辑:熊水斌)