

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.011

马斌, 马永磊, 李昕尧. 带键槽透水底板脉动压力试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 76-82. (MA Bin, MA Yonglei, LI Xinyao. Experimental studies of pulsating pressures on pervious base slab with keyway[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 76-82. (in Chinese))

带键槽透水底板脉动压力试验研究

马 斌, 马永磊, 李昕尧

(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: 消力塘防护结构是大坝安全的第一道防线, 消力塘的安全是高坝泄洪安全的前提与保障。依托向家坝物理模型, 以将“主动防护”与“被动防护”相结合的带键槽的透水底板为试验对象进行试验, 主要针对带键槽透水底板的脉缝隙水流压力特性、下表面的脉动压力分布规律、时空相关性、空间相关性和压力频谱特性进行试验分析。结果表明, 在水跃稳定区, 增设透水孔后, 带键槽底板下表面及垂直缝隙处各测点脉动压强最大值和脉动压强系数有所减小; 带键槽底板下表面各测点间的相关性有所减小, 同时涡漩的空间积分尺度与保持性减小; 底板下表面及键槽处各测点的功率谱密度有所减小, 并趋于低频。

关 键 词: 键槽; 透水底板; 脉动压力; 模型试验

中图分类号: TV653

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)04-0076-07

我国有一大批坝高接近或超过 300 m 的高坝或超高坝正在或将要建设, 这些高坝多集中于高山峡谷地带, 例如溪洛渡、白鹤滩, 面临的泄流安全问题有流量大、泄流功率大、水头高、河谷狭窄等^[1]。大坝下游河床的消能防冲设计成为一个难题, 高坝泄洪消能防护安全问题十分突出。为了保护高坝下游河床和岸坡不受泄洪高速水流的严重冲刷, 需修建各类消力塘防护结构构建大坝安全的第一道防线, 消力塘安全因此成为高坝泄洪安全的前提保障。然而, 消力塘毁坏事故时有发生。1961 年建成的卡娜拂例工程, 在同年 8 月泄水后发现其溢洪道消力池跃首处底板完全破坏^[2]; 萨扬舒申斯克水电站消力池底板两次发生破坏^[3]; 刘家峡水电站底板发生溢洪道冲毁事故, 底板被掀起冲走, 底板下基岩被冲刷成深坑; 五强溪水电站右消力池部分底板块被水流掀起冲走, 基岩冲坑深度超过 30 m, 威胁大坝安全^[4]。通过对这些事故的调查, 发现底板上的脉动压力是造成底板发生破坏的主要原因^[5], 大量模型试验也证实了这一点。

国内外学者通过对消力塘失稳机理以及对水力学特性的研究, 提出从优化设计的角度出发, 可通过改进防护结构造型来提高消力塘底板的整体抗力以减少其发生失稳破坏的风险。彭彬等^[6]利用有限元分析计算百色消力池设置键槽对消力塘底板应力与变形的影响, 计算结果表明设置键槽可以有效消除板块间的不均匀沉降及错台现象, 增强底板块的安全。许翔^[7]分析了消力塘底板增设键槽对上举力特性的影响, 分析表明增加键槽之后, 板块整体性得到加强, 且上举力明显减小, 提高了底板的稳定安全性。马斌等^[8]通过建立有限元模型, 模拟键槽的工作机理, 得出了在底板设置键槽可以保证消力塘稳定的结论。

随着对高坝下游防护工程研究的不断深入和对一些水利工程破坏的实例分析, 消力塘稳定性的研究逐渐从“被动防护”模式向“主动防护”模式转变。^[9-10] 本文主要对“主动防护”与“被动防护”相结合的带键槽透水底板进行模型试验研究, 基于模型试验结果, 研究分析了带键槽透水底板缝隙水流脉动压力特性, 对比

收稿日期: 2016-07-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401705); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51309177); 高等学校学科创新引智计划(B14012); 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20120032120051)

作者简介: 马 斌(1979—), 男, 安徽宿州人, 副教授, 博士, 主要从事高坝泄流安全研究。E-mail: mabin97@tju.edu.cn
通信作者: 马永磊(E-mail: mayonglei_arly@qq.com)

分析带键槽底板增加透水孔后底板下表面脉动压力的分布规律。

1 模型试验及测试方法

试验以向家坝物理模型为研究对象,其最大坝高 161 m,最大泄量 $48\,660\text{ m}^3/\text{s}$,消能工为中-表孔交叉间隔布置的底流消能形式,共有 12 个表孔和 10 个中孔。消力塘长 228 m,分左右两区为平底板结构。

试验模型比尺采用重力相似准则,比尺为 1:80。主要针对左半区消力塘的 6 个表孔和 5 个中孔同时泄水进行试验测量。由于要保证模型相似性,底板的模型材料要满足结构的动力相似要求,故底板采用加重橡胶材料,其重度和弹性模量能满足结构动力相似准则,能在承受水动力荷载后保证变形相似,反映实际工程的特征。在底板中间位置布置 9 块 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 12\text{ cm}$ 的加重橡胶板块,其他地方采用有机玻璃填平,试验板块布置如图 1。在顺水流方向上,板块沿垂直方向增设键槽,键槽布置如图 2。在板块上均匀布置贯穿板块的孔径为 0.35 cm 的透水孔 36 个,开孔率为 3.5% [11]。由于缝隙水流比较复杂,这种缝隙水流属于层流范畴。弗劳德准则已不再适用,原型中的缝隙与模型缝隙大小属于同量级,因此,满足了模型与原型缝隙的流场相似,也就满足了压力脉动相似 [12]。所有板块之间保留 2 mm 的间隙以保证动水压力传递的相似性。

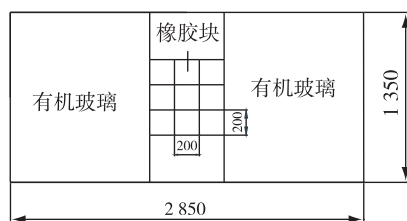


图 1 试验板块布置 (单位:mm)

Fig. 1 Test plate layout (unit: mm)

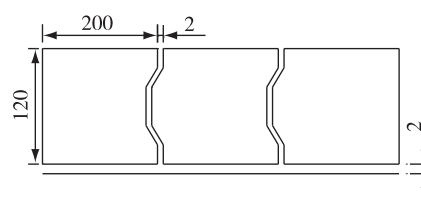


图 2 键槽布置 (单位:mm)

Fig. 2 Key groove layout (unit: mm)

由于条件所限,试验采用 16 通道 DJ800 脉动压力测试系统,其压力传感器测点布置为:上表面测点 1~4,下表面测点 5~8,缝隙一侧测点 9~13,另一侧 14~16,且脉动压力传感器都布置在板块各表面中心轴线上。带键槽底板各测点的脉动压力传感器布置见图 3。在保证缝隙边界条件不改变的情况下,计算出不同弗劳德数下脉动压力传播特性,每组试验均进行 3 次数据采集,以避免偶然因素引起的试验误差,增加试验可信度。工况设计为:工况 1, $Fr=6.30$,上游水位 352 m,下游水位 285 m;工况 2, $Fr=6.05$,上游水位 360 m,下游水位 287 m;工况 3, $Fr=5.06$,上游水位 370 m,下游水位 290 m;工况 4, $Fr=4.60$,上游水位 380 m,下游水位 293 m。

图 4 为测得的板块下表面测点 6 时程图。由图可见,透水前后脉动压力幅值发生了变化。透水前带键槽板块脉动压力波动幅值在 $\pm 0.18\text{ kPa}$ 之间,透水后带键槽底板下表面测点脉动压力波动幅值在 $\pm 0.06\text{ kPa}$ 之间。

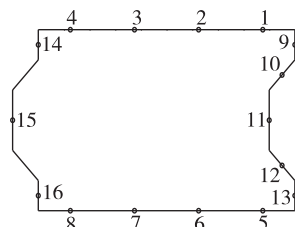


图 3 测量传感器布置

Fig. 3 Measuring sensors layout

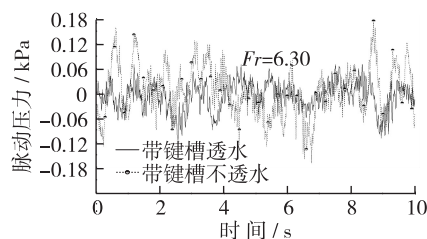


图 4 板块下表面测点 6 时程图

Fig. 4 Chart of lower surface measurement point 6

2 脉动压力幅值变化分析

将点脉动传感器分别布置在稳定水跃区底板上下表面,测得 4 种工况下各测点脉动压力信号。其目的是研究带键槽底板透水前后其上下表面以及键槽缝隙间的脉动压力幅值特性,通过分析透水前后底板的上下表面以及板块缝隙间脉动压力的极值大小来研究透水孔的增设对带键槽底板脉动压力幅值变化的影响。通过分析脉动压力各特征值,可以深入了解脉动上举力形成的特点。

图 5 中 1~8 测点分别表示带键槽底板透水前后上下表面各测点脉动压力的最大值分布。可见,透水前后底板上下表面相邻 4 个测点之间数值相差不大,没有出现较大波动,且随着 Fr 的增大,底板上下表面各测点的最大值也增大。分析认为:由于上下表面 4 个测点位置比较接近,并且该模型设有二道坝,测点位置处于水跃稳定区,很可能受到同一涡漩的影响,导致其脉压变化较小,即最大值的变化比较平缓。而 Fr 的增大,会相应增大涡漩的紊动效果,从而影响脉动压力的大小。

对比分析上下表面 4 个测点最大值可以看出,不论是否透水,底板下表面脉动压力最大值都小于上表面最大值,当 $Fr=6.30$ 时,不透水带键槽底板上表面最大值约为 2.2,下表面 4 个测点最大值约为 2.0,而透水带键槽底板上表面 4 个测点最大值约为 2.2,下表面 4 个测点最大值约为 1.6。同时,透水后的下表面脉动压力最大值有所减小,说明透水孔的增设有助于减小底板下表面的脉动压力最大值。这可能是因为上表面是涡漩主要产生的区域,紊动能量比较大,从而导致脉动压力的最大值也较大,而底板下表面是由上表面的脉动源透过缝隙传递引起的,传递过程中受到阻尼等作用,故下表面脉动压力最大值较小。

总体来说,透水与否对底板上表面脉动压力的影响不大,但透水的增设会减小底板下表面脉动压力的最大值。分析认为:当脉动压力沿着底板缝隙向前传递时,透水孔的增设能够使脉动压力沿着透水孔传播出去,使紊动能量得到释放,透水孔能够起到“均化降压”的作用,从而平衡底板上下表面压力差,使底板的脉动压力减小,有助于底板的稳定。

图 5 中 9~13 测点为底板缝隙处脉动压力的最大值,可见 5 个测点的值从上到下逐渐减小,而透水底板的 5 个测点值要小于不透水底板相应位置的测值。当 $Fr=6.30$ 时,带键槽不透水底板缝隙处脉动压力的最大值由 9 号测点到 13 号测点减小了 16.8%,而带键槽透水底板缝隙处脉动压力的最大值由 9 到 13 号测点减小了 33.7%。说明由于缝隙键槽的作用,使紊动能在传播过程发生衰减,从而导致脉动压力最大值不断减小。而透水孔增加了涡漩的进入,使涡漩紊动更加剧烈,能量损耗也更多,从而导致脉动压力最大值衰减。

图 6 为透水前后底板上下表面 4 个测点脉动压力最小值,可以看出,4 个测点的数值基本接近,说明增设透水孔对最小值的影响不大,而且随着 Fr 的增大,无论是否透水,相应测点的脉动压力最小值都随之增大,和最大值的特性基本一致。通过对比上下表面对应测点的最小值可以看出,带键槽底板在透水前后,下表面测点的最小值均比上表面相应点的最小值略大。分析认为:由于下表面脉动压力是由上表面脉动压力通过缝隙传播的,水流脉动压力由于受到底板和键槽等的影响,脉动压力不能得到很好的释放,导致下表面水流脉动压力衰减较小,所以最小值比上表面的略大。

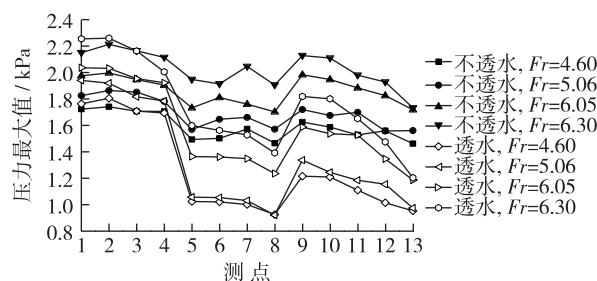


图 5 底板各测点脉动压力最大值

Fig. 5 Maximum pressure pulsation values of measuring points on pervious floor

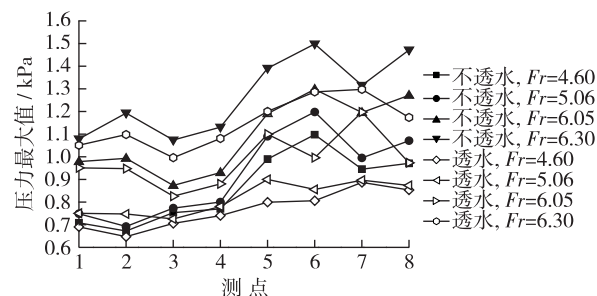


图 6 上表面脉动压力最小值

Fig. 6 Minimum pressure pulsation values of measuring points on upper surface of pervious floor

3 脉动压强的变化分析

在水利工程上,通常分析试验数据的无量纲化脉动压强系数来表征脉动压强的大小,并定义为:

$$C_p = \frac{\sigma_p}{H} \quad (1)$$

式中: σ_p 为脉动压强标准差; H 为上下游水位差。

通过分析所监测的脉动信号求得各测点的脉动压强系数,结果见图7。从图7中测点1~8可见,透水前后上表面脉动压强系数基本不变,而透水后的下表面脉动压强系数要比透水前的小很多,透水前底板下表面测点的

脉动压强系数约为0.006,透水后底板下表面测点脉动压强系数约为0.004,可见透水孔的增设有利于减小底板下表面的脉动压强系数。在 $Fr=6.30$ 时,增设透水孔后,5、6、7和8号测点减幅分别为42.0%、37.3%、38.8%和29.5%。分析认为:一是透水孔的增设扩大了上部水流对缝隙脉动压强的影响范围,增强了缝隙内脉动压强的均化作用;二是脉动压力在沿着缝隙向前传递过程中,会沿着增设的透水孔向外传递,从而使脉动压力得到释放。所以透水孔在脉动压力传递过程中,起到了减压卸载的作用,有助于底板稳定。

键槽缝隙处脉动压强系数也有上述相似特性。图7中测点9~13表示的是 $Fr=6.30$ 和 $Fr=5.06$ 时缝隙测点脉动压强系数,以 $Fr=6.30$ 时的工况为例,可以看出,带键槽透水缝隙各测点的脉动压强系数小于带键槽不透水的脉动压强系数,透水底板从缝隙上部9号测点到缝隙底部13号测点脉动压强减小了41.7%,而带键槽不透水底板减小了19.8%,这也论证了脉动压强源自底板上表面,且透水孔的增设有利于减小底板缝隙的脉动压强,使底板更加稳定可靠。

4 时空相关特性分析

时空相关系数表征的是不同空间点在不同时刻脉动压力之间的相互关系,是大尺度涡旋能够保持其尺度随流体向下游传播的反映。表1为以 $Fr=6.30$ 和 $Fr=5.03$ 为例列出的板块上下表面以及键槽缝隙各测点互相关系数。

表1 各测点互相关系数

Tab. 1 Cross-correlation coefficients of each point

互相关测点	透水底板		不透水底板		互相关测点	透水底板		不透水底板	
	$Fr=6.30$	$Fr=5.06$	$Fr=6.30$	$Fr=5.06$		$Fr=6.30$	$Fr=5.06$	$Fr=6.30$	$Fr=5.06$
1-2	0.586 2	0.562 9	0.656 1	0.623 3	5-8	0.769 5	0.796 3	0.853 0	0.824 4
1-3	0.510 1	0.491 1	0.550 1	0.517 5	6-7	0.816 6	0.819 5	0.963 6	0.964 4
1-4	0.457 3	0.450 6	0.480 5	0.419 9	7-8	0.928 5	0.933 9	0.929 1	0.916 7
2-3	0.608 6	0.581 1	0.701 2	0.669 3	9-10	0.898 3	0.896 5	0.899 8	0.890 5
3-4	0.671 3	0.693 6	0.688 7	0.694 8	9-11	0.859 5	0.831 6	0.783 7	0.769 4
5-6	0.855 9	0.849 1	0.971 7	0.948 0	9-12	0.827 9	0.785 1	0.653 5	0.635 3
5-7	0.805 4	0.833 8	0.926 8	0.906 3	9-13	0.777 8	0.718 0	0.535 6	0.531 9

如表1所示,不管弗劳德数如何变化,下表面各测点的互相关系数明显优于上表面各测点的互相关系数,并且透水底板下表面测点的互相关系数都在0.8以上,不透水底板下表面测点的互相关系数都在0.9以上,可见下表面各测点之间都呈现良好的相关性,说明脉动水流能在缝隙处迅速传播,图8为上下表面典型测点间的互相关曲线。可见,带键槽透水底板下表面测点的互相关特性要小于带键槽的不透水底板。这是

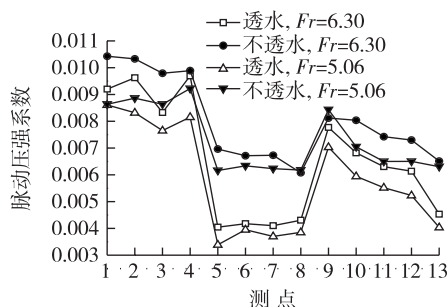


图7 底板上表面各测点脉动压强系数

Fig. 7 Fluctuating pressure coefficients of measuring points on base plate

由于透水孔的影响,上表面脉动源通过透水孔更容易传递到下表面,使下表面的脉动源增多,从而导致下表面脉动压强系数有所减小。

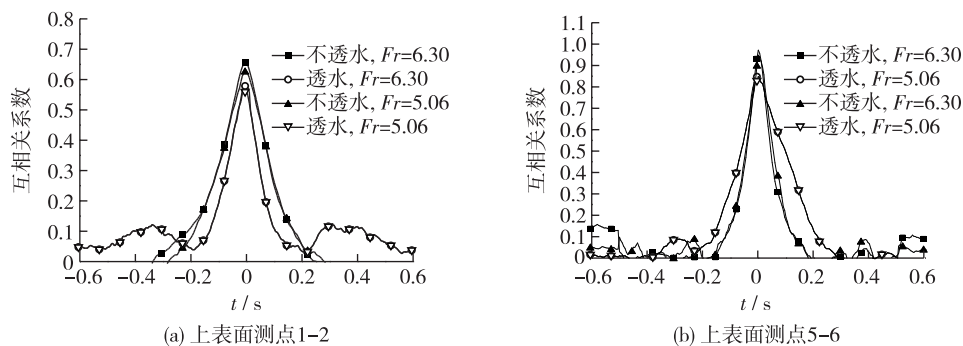


图 8 上下表面典型测点互相关曲线

Fig. 8 Cross-correlation curves of typical measuring points on upper and lower surface

5 空间相关特性分析

空间积分尺度表征的意义是大涡流结构在紊流运动中的空间平均尺度,它能够以某种意义上反映紊流中不同涡流尺度的大小特征,定义空间积分尺度为:

$$L_x = \int_0^{l_0} \rho(x, l) dl \quad (2)$$

表 2 表示的是透水前后带键槽底板下表面测点的脉动压力空间积分尺度值的大小,从表中可以看出,在底板上增设直径为 3.6% 的透水孔后,底板下表面的空间积分尺度略有减小,分析认为:底板在增设透水孔后,底板上表面的涡流更容易快速进入下表面,下表面受上表面涡流的影响增大,从而减小了下表面测点之间的相关性,所以涡流空间积分尺度也会减小。

表 2 水跃区下表面各测点脉动压力空间积分尺度

Tab. 2 Spatial integral scales of pulsating pressures of each measuring point on lower surface in water jump area

测点	Fr = 6.30		Fr = 5.06	
	透水	不透水	透水	不透水
5	2.037	2.234	2.004	2.210
6	1.535	1.676	1.476	1.659
7	1.119	1.132	1.115	1.126
8	0.090	0.093	0.090	0.093

6 脉动压力频谱特性

功率谱密度表征信号功率在某一频域内随频率 f 的分布,常用自功率谱密度函数来表示脉动压力的频率特性。图 9 为 $Fr=6.30$ 和 $Fr=5.06$ 时带键槽透水底板与带键槽不透水底板下表面典型测点的功率谱密度分布。

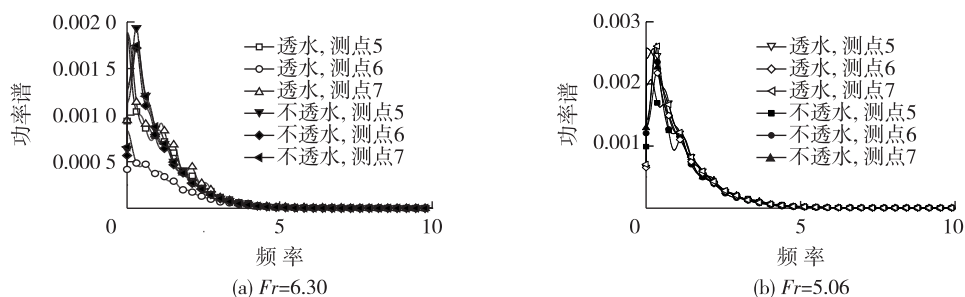


图 9 底板下表面各测点功率谱密度

Fig. 9 Power spectral density on lower surface of each measuring point

由图9可以看出透水前后,带键槽底板下表面的能量分布主要集中在0~5 Hz,带键槽透水底板的脉动压力能量总体上略低于带键槽不透水底板的能量,带键槽透水底板下表面各测点的频谱特性更趋向低频。这表明透水后带键槽底板下表面脉动能量有所减小,其原因可能是底板开孔后,底板脉动压力在沿着缝隙向前传递的过程中,遇到透水孔时会沿着透水孔向上传递,使底板脉动能量得到一定的释放,从而降低底板下表面的脉动能量。

图10为 $Fr=6.30$ 和 $Fr=5.06$ 两种工况下的键槽缝隙测点功率谱密度,可以看出透水底板和不透水底板键槽缝隙测点的脉动能量都集中在0~5 Hz,并且可以看出透水对于带键槽底板缝隙测点的功率谱分布影响不大,且缝隙下部测点的脉动能量小于上部测点的脉动能量。因此,可见透水前后底板键槽缝隙测点的脉动能量仍然集中于低频,随着缝隙测点的深入,测点的脉动能量不断减小。

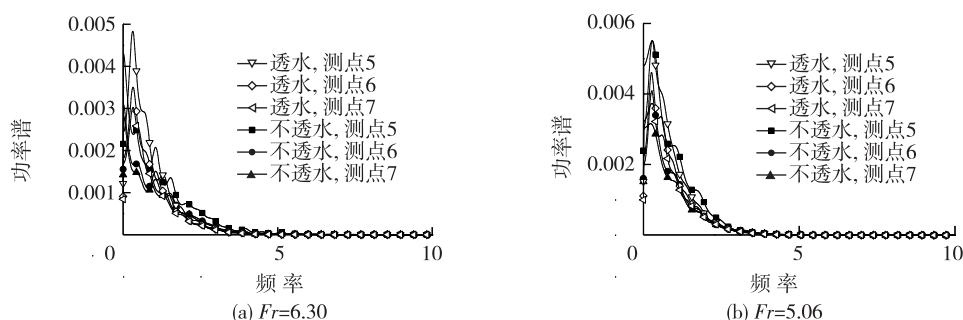


图10 底板键槽缝隙测点功率谱密度

Fig. 10 Power spectral density of measurement points on floor keyway slot

7 结 语

依托向家坝水物理模型试验,研究了带键槽透水底板的脉动压力传播特性,以及在同一水力条件下,透水前后带键槽底板上下表面及键槽处脉动压力特性的变化,从而分析透水对带键槽底板缝隙脉动压力传播特性的影响,由此得出以下结论:

(1)在水跃稳定区,增设透水孔后,带键槽底板下表面及垂直缝隙处各测点脉动压强最大值有所减小。相对来说,不透水带键槽底板虽也有减小趋势,但变化平缓。

(2)透水孔的增设减小了带键槽底板下表面测点脉动压强系数。

(3)增设透水孔后,带键槽底板下表面各测点间的相关性有所减小,带键槽底板键槽内测点与键槽口测点的互相关系数随测点距离的增大而减小,但是,透水后键槽处各测点的相关性优于透水前的各测点。同时,透水孔的增设,减小了涡旋的空间积分尺度,降低了涡旋的保持性。

(4)增设透水孔后,底板下表面及键槽处各测点的脉动压力频谱特性有所变化;代表脉动能量大小的功率谱密度有所减小,且趋于低频,脉动能量集中且趋于低频,可以减少高频脉动能量作用,从而增加消力塘稳定性。

参 考 文 献:

- [1] 练继建. 高坝泄洪安全关键技术研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 80-88. (LIAN Jijian. Key technologies for safety of high dam flood discharge[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 80-88. (in Chinese))
- [2] BOWERS C E, TOSO J. Kanafuli project, model studies of spillway damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(5): 469-483.
- [3] FORTOV V E, FEDOROV M P, ELISTRATOV V V. Scientific and technological problems of hydropower industry after the accident at the Sayano-Shushenskaya hydropower plant[J]. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2011, 81(4): 333-340.

- [4] 刘沛清, 高季章, 李桂芬. 五强溪水电站右消力池底板块失事分析[J]. 水利学报, 1999(1): 9-17. (LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Guifen. Study on failure cause of bottom slabs in stilling basin for Wuqiangxi Hydropower Station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(1): 9-17. (in Chinese))
- [5] 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 Xin'ai, LI Futian. Failure mechanism of bottom plate in stilling basin and countermeasure for protection[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(9): 1-9. (in Chinese))
- [6] 彭彬, 张建海, 蒙承刚, 等. 右江百色重力坝消力池结构缝键槽布置方案优化研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(1): 19-23. (PENG Bin, ZHANG Jianhai, MENG Chenggang, et al. Optimization of key-groove setting for baise stilling basin[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2004, 36(1): 19-23. (in Chinese))
- [7] 许翔. 水垫塘板块结构特性对底板稳定性的影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2012. (XU Xiang. Analysis of influence of structural characteristics of water cushion plate on bottom stability[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [8] 马斌, 练继建, 刘喜珠. 带键槽消力塘底板的安全性分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 66-70. (MA Bin, LIAN Jijian, LIU Xizhu. Safety analysis on bottom slab of plunge pool with key grooves[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 66-70. (in Chinese))
- [9] 哈焕文. 透水护坦上动水荷载及其脉动的研究[J]. 水利学报, 1964(2): 14-26. (HA Huanwen. Study on the hydrodynamic load and the pulsation of the permeable apron[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(2): 14-26. (in Chinese))
- [10] 张少济, 杨敏. 消力塘透水底板脉动压力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 85-89, 94. (ZHANG Shaoji, YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a plunge pool[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 85-89, 94. (in Chinese))
- [11] 杨敏, 孙勉. 水垫塘透水底板上举力试验研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 88-90, 95. (YANG Min, SUN Mian. Experimental study on the uplifting force of the pervious slabs in plunge pool[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(6): 88-90, 95. (in Chinese))
- [12] 杨敏, 彭新民, 崔广涛. 水垫塘底板的试验仿真模拟研究[J]. 水利水电技术, 2002, 33(3): 40-42, 57. (YANG Min, PENG Xinmin, CUI Guangtao. Study on experiment simulation of slabs in plunge pool[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(3): 40-42, 57. (in Chinese))

Experimental studies of pulsating pressures on pervious base slab with keyway

MA Bin, MA Yonglei, LI Xinyao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The stilling basin protection structure plays as a first line of defense for dam safety, and the safety of the stilling basin and spillway becomes a safety premise of the dam. Based on the Xiangjiaba physical model, the model tests on the pervious base slab with keyway have been carried out in this study, in combination with “active protection” and “passive defense”. And the characteristics of the pulsating water pressure from the groove, the distribution law of the pulsating pressure on the lower surface, the spatiotemporal correlation, the spatial correlation and the pressure spectrum characteristics of the pervious base slab with keyway are analyzed in this paper. The model tests results show that the the maximum values of the measured pulsation pressures on the lower surface and vertical groove of the pervious base slab with keyway have slightly decreased after addition of the permeable holes at the water jump stable region; the pulsation pressure coefficients measured at the measuring points located on the lower surface and the vertical groove of the pervious base slab with keyway have slightly decreased; the correlation between the measuring points located on the lower surface have also slightly decreased and at the same time the vortex space integral scale and maintenance have been reduced; and the power spectral density measured at the lower surface and the measuring points on the keyway has been reduced and it tends to have lower frequency.

Key words: keyway; pervious base slab; pulsating pressure; model tests