

平底水垫塘泄洪振动的相关性特征研究

彭文祥, 马 斌

(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: 水垫塘底板在泄洪产生的水动力荷载作用下产生振动,其振动的整体性可以在一定程度上反映底板结构的完整性。研究底板在泄洪条件下振动的相关性特征可以为识别底板结构的完整性提供重要的参考依据。文章以某底流消能水垫塘原型观测数据为依据,分析了底板泄洪振动的相关性特征。研究表明,底板结构完好时,其泄洪振动的相关性较好,相邻两点振动的相关系数高于0.8;同种工况下,中轴线附近底板振动的纵向空间积分尺度最大,同桩号横向空间积分尺度次之,右岸纵向空间积分尺度最小。

关键词: 水利水电工程;平底水垫塘;原型观测;相关系数;空间积分尺度

中图分类号:TV131.33

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)02-0174-04

Research on correlation characteristics of flood discharge vibration of flat-bottom plunge pool

PENG Wenxiang, MA Bin

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

Abstract: The vibrating integrity of slabs of plunge pool under the hydrodynamic loads during flood discharge can reflect the integrity of the bottom structure to certain extent. Study on the correlation characteristics of the bottom during flood discharge can provide important reference for identification of the integrity of plate structure. Based on the prototype observation data of slabs with energy dissipation by hydraulic jump, the paper analyzed the correlation characteristics of vibration during flood discharge. The results show that the correlation of flood discharge vibration of slabs is better when the structure of slabs is best. The correlation coefficient between adjacent points is more than 0.8. Under the same spillway condition, the longitudinal spatial scale in axis bottom is the largest and the transverse spatial scale takes the second place, while the longitudinal spatial scale on the right bank is the least.

Key words: hydraulic and hydropower engineering; flat-bottom plunge pool; prototype observation; correlation coefficient; spatial scale

1 研究背景

水垫塘作为下游河床的保护结构,其自身在高速水流作用下的稳定性是实现消能和防冲目的的关键^[1]。国内外水电站水垫塘遭受严重破坏的工程实例时有发生,例如前苏联著名的萨扬水电站,其底流消能工代表了当今世界最高的水平,然而泄洪产生的巨大水动力荷载将近8m厚的底板掀起,发生底板失稳破坏的严重事故,引起了工程界和学术界的震惊。我国的五强溪、安康以及贵州的鱼塘水电站等也都在泄洪时发生了严重的底板破坏的事故。大量研究成果表明^[1],底板失稳破坏绝大部分是由于底板板块的止水破坏、产生裂缝或者抽排设备工作不正常等情况下,水流的脉动压力沿止水缝隙传播至底板下表面缝

隙中,产生巨大的脉动上举力引起底板的揭底破坏。底板止水完好,水流脉动压力无法传播至底板下表面,也就无法产生上举力破坏,因此底板止水结构的完好与否直接关系到底板的运行安全。水垫塘底板在高速水流的作用下产生振动,其振动的整体性在一定程度上可以反映底板结构的完整性,底板在泄洪下振动的整体性又可以通过分析其振动的相关性特征来进行判断。振动的相关性越好,整体性也就越好,反映底板结构的完整性也越好。因此,分析水垫塘底板在泄洪下振动的相关性特征,可以作为判断底板结构是否完整的一个依据。

梁在潮^[2]基于对紊流的研究,得出紊流运动的空间范围内存在状态相关联的大尺度涡旋,即所谓的相干结构;林继镛和练继建^[3],基于模型试验的研究,得

收稿日期:2012-12-11

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究计划(青年基金项目)(12JCQNJC04600)

作者简介:彭文祥(1987-),男,湖北武汉人,硕士研究生,水利水电工程专业。

通讯作者:马 斌(1979-),男,安徽宿州市人,博士,副教授,主要从事水利水电工程研究。

到在二元淹没射流作用下冲击区点的脉动壁压空间相关系数主要受到下游水深的影响,其它水力参数的对其影响较小的结论;张少济等^[4]基于模型试验,研究了水垫塘透水平底板脉动压力特性,得出了缝隙内脉动压强系数高于底板表面的结论,证实了缝隙内脉动压力来源于底板表面;杨敏和李树宁^[5],基于模型试验的研究,研究了平底水垫塘透水底板下表面的脉动压力特性,得出了在冲击区,脉动压力的空间积分尺度随着开孔率的增大而增大;而在壁射流区,脉动压力的空间积分尺度随着开孔率的增大而减小的结论;杨弘^[6]基于原型观测和模型试验的研究,对水垫塘底板泄洪振动的相关性进行了分析,得出水垫塘内相邻点的互相关系数都很大,相关性好,并且水垫塘内涡旋尺度远远大于板块的尺度的结论。以上关于底板所受水动力荷载的相关性研究较多,但底板振动的相关性研究较少,大多基于模型试验的研究,缺乏实测资料的验证。基于此,研究水垫塘底板在泄洪条件下振动的相关性特征能够为判断底板结构的完整性以及完善工程设计提供一定的参考依据。

2 测点布置及工况

文章以国内某高坝水垫塘为研究背景。该坝为

碾压混凝土重力坝,最大坝高 168 m,坝顶高程 1 334.00 m;溢流坝段布置于河床中部,溢流堰顶高程 1 311.00 m,水垫塘底板高程 1 188.0 m。坝身 5 个表孔,两个中孔坝段分别布置于溢流坝段两侧,其功能为放空水库与特大洪水时参与泄洪,中孔进口底高程 1 240.00 m。溢流坝表孔泄流采用宽尾墩 + 底流泄洪消能方式,两中孔泄流采用侧向挑流进入消力池的消能方式,下游采用斜坡边墙消力池底流消能。校核洪水位 1 330.44 m,设计洪水位 1 330.18 m。水垫塘底板尺寸为 135 m(长)×95 m(宽)。

水垫塘底板上布置垂直型动位移传感器,基本布满整个消力池板块,在重点位置上,每个板块布置 2 个传感器。测点布置图见图 2,典型工况见表 1。

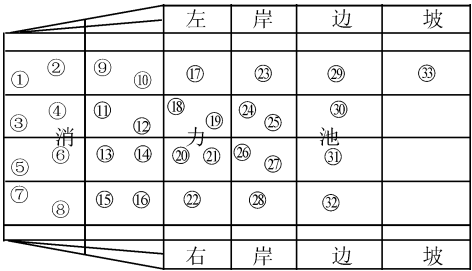


图 1 水垫塘底板泄洪振动测点布置图

表 1 水垫塘底板振动测试工况				m, m ³ /s	
工况	开孔及开度情况(表孔)	上游水位	下游水位	上下游水位差	泄流量
1	1 [#] (1m)+2 [#] (2m)+3 [#] (2 m)+4 [#] (2m)+5 [#] (1m)	1327.68	1209.45	118.23	1345
2	1 [#] (2m)+2 [#] (2.5m)+3 [#] (3m)+4 [#] (2.5m)+5 [#] (2m)	1327.77	1210.68	117.09	2014
3	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 、5 [#] 表孔均为 2.5m	1328.72	1210.43	118.29	2417
4	1 [#] (4m)+2 [#] (4m)+3 [#] (5m)+4 [#] (4m)+5 [#] (4m)	1327.72	1213.63	114.09	3442
5	2 [#] (2m)+3 [#] (3m)+4 [#] (2m)	1329.18	1209.15	120.03	1227
6	2 [#] (4m)+3 [#] (4.5m)+4 [#] (4m)	1326.05	1211.00	115.05	2059
7	2 [#] (6.7m)+3 [#] (8.5m)+4 [#] (6.7m)	1327.09	1211.57	115.52	3177
8	2 [#] (9m)+3 [#] (10m)+4 [#] (9m)	1324.83	1212.13	112.70	3675

3 水垫塘平底板振动测试结果分析

3.1 底板振动的时空相关关系

脉动压强的时空相关函数表征在不同时刻不同空间点脉动压强间的相互依赖关系,反映出大相干涡旋在一定空间范围内保持其尺度随时均流向下游传播。此概念可以借用到振动响应问题的研究中,用振动位移脉动部分的时空相关函数来描述不同时刻不同空间点底板振动位移的相互依赖关系。振动位移函数可以由下式表示:

$$s = \bar{s} + s'$$
 (1)

式中: $\bar{s}$ 为振动位移时均值, s' 为振动位移脉动值。振动位移的时空相关函数可以定义为振动位移脉动函数 $s'(x, t)$ 在位置 $x_1, x_2(x_1 + l)$ 的乘积的统计平均值,用 $R(x_1, x_2, t)$ 表示,对于平稳随机振动, $R(x_1, x_2, t)$ 可表示为 $R(x_1, l)$:

$$R(x_1, l) = \int s'_{x_1} s'_{x_1+l} \rho(s'_{x_1}, s'_{x_1+l}; x_1, x_2) ds'_{x_1} ds'_{x_1+l}$$
$$= \overline{s'_{x_1} s'_{x_1+l}}$$
 (2)

定义时空相关系数为:

$$\rho(x, l, \tau) = \frac{\overline{s'(x, t) s'(x + l, t + \tau)}}{\sqrt{s'^2(x, t) s'^2(x + l, t + \tau)}} \quad (3)$$

对于顺水流方向(纵向)相距 ξ , 垂直水流方向(横向)相距 η 的两点, 其时空相关系数可表示为:

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \frac{s'(x, y, t) s'(x + \xi, y + \eta, t + \tau)}{\sqrt{s'^2(x, y, t) s'^2(x + \xi, y + \eta, t + \tau)}} \quad (4)$$

$\tau = 0$ 时即为瞬时空间相关系数, 用 $\rho(x, l)$ 表示:

$$\rho(x, l) = \frac{s'(x) s'(x + l)}{\sqrt{s'^2(x) s'^2(x + l)}} \quad (5)$$

在相关分析中, 一般根据 $|\rho|$ 的数值大小, 将相关性的密切程度分为 4 个等级: $0 < |\rho| < 0.3$ 的微弱相关; $0.3 < |\rho| < 0.5$ 的低度相关; $0.5 < |\rho| < 0.8$ 中度相关; $0.8 < |\rho| < 1$ 的高度相关。

3.2 相邻两点振动的互相关性分析

表 2~表 5 给出了 4 号工况下左岸、右岸、中轴线以及同桩号横向相邻两点的相关系数。由表 2~表 5 可以看出相邻板块上测点的振动位移相关系数都较大, 都在 0.8 以上, 属于高度相关, 表明相邻两个测点之间的相关性较好。而位置不相邻点的相关系数则要小得多。并且从表中可以看出水垫塘中轴线附近测点的互相关系数稍大些。左侧底板上测点振动的幅值比右侧稍小, 复杂程度也要小一些。

表 2 中轴线相邻测点相关系数

测点	14	20	21	26
相关系数	0.9452	0.9262	0.9690	

表 3 左岸相邻测点相关系数

测点	2	10	23	33
相关系数	0.9027	0.6271	0.4537	

表 4 右岸相邻测点的相关系数

测点	8	15	16
相关系数	0.8810	0.8556	

表 5 同桩号横向相邻测点的相关系数

测点	10	11	14	16
相关系数	0.8511	0.8810	0.8335	

3.3 底板振动的空间积分尺度

振动的空间积分尺度可以反映底板不同位置振动的整体性。由于底板振动是在水流涡旋作用下的响应, 因此其空间积分尺度在一定程度也可以反映水流涡旋特征尺度的大小。定义空间积分尺度 L_x 为:

$$L_x = \int_0^{l_0} \rho(x, l) dl \quad (6)$$

式中: $\rho(x, l)$ 为瞬时空间相关系数; l_0 为瞬时空间相关系数第一个使 $\rho(x, l)$ 为零的 l 值。

图 2~5 是基于底板泄洪振动的工程实测数据进行计算得到的各种工况下的底板振动的空间积分尺度变化规律情况。

3.3.1 左岸底板振动的空间积分尺度 由图 2a 和图 2b 可以看出左岸底板泄洪振动的空间积分尺度都比较大, 底板振动的整体性比较好, 说明底板结构完好, 整体性较好。纵向空间积分尺度都在 50 m 以上。在同一种开孔方式下, 随着流量的增加, 左岸底板泄洪振动的空间积分尺度基本也会增大。但 4 号工况虽然流量较大, 但是下游水位最高, 水垫深度最大, 上下游水位差最小, 在底流消能的情况下, 底板的振动空间积分尺度反而较小, 但仍然大于低流量的开 3 孔情况下的空间积分尺度。

3.3.2 右岸底板振动的空间积分尺度 由图 3a 和图 3b 可看出右岸底板泄洪振动的空间积分尺度都比较大, 底板振动整体性比较好, 说明底板结构完好, 整体性较好。右岸纵向空间积分尺度都在 40 m 以上, 略高于同种工况下左岸底板纵向空间积分尺度。在同一种开孔方式下, 随着流量的增加, 右岸底板泄洪振动的空间积分尺度基本在减小。相同流量下, 开 5 孔时候右岸纵向空间积分尺度比开 3 孔时候的纵向空间积分尺度略微大些。分析其原因可能是因为开 5 孔时候水流入池后流态比较均匀, 带动底板振动整体性较好。另外 4 号工况下右岸底板的纵向尺度也较其他工况小, 可能是因为水流能量过大, 在底流消能情况下该区域的水流旋滚剧烈, 水跃区流态复杂, 导致底板的振动的相关性和整体性没有其他区域强。

3.3.3 中轴线底板振动的空间积分尺度 由图 4a 和图 4b 可以看出中轴线处底板泄洪振动的空间积分尺度非常大, 纵向空间积分尺度都在 60 m 以上, 典型工况下最大空间积分尺度达到 113 m, 均高于同种工况下左岸和右岸底板的纵向空间积分尺度, 表明底板振动的相关性和整体性较好, 结构的整体性也比较好。在 3 孔开孔方式下, 随着流量的增加, 中轴线底板泄洪振动的空间积分尺度基本成增加的趋势。但是在 5 孔开孔方式下, 随着流量的增加, 中轴线底板泄洪振动的空间积分尺度变化规律不强, 呈上下震荡的变化趋势。分析其原因可能是因为中轴线附近底板处于水流发生旋滚, 水流能量最为集中的地带。

3.3.4 同桩号横向底板振动的空间积分尺度 由图 5a 和图 5b 可以看出同桩号底板泄洪振动的横向空间积分尺度也比较大, 横向空间积分尺度都在 40

m 以上,典型工况下最大空间积分尺度达到 102 m,均高于同种工况下左岸和右岸底板的纵向空间积分尺度,略低于中轴线处底板纵向空间积分尺度。在同一种开孔方式下,随着流量的增加,同桩号底板泄洪振动的横向空间积分尺度基本呈减小趋势。相同流量下,开 5 孔时候横向空间积分尺度不如开 3 孔

时候的横向空间积分尺度。

3.4 底板振动的自相关性分析

从大量的自相关图中任意选取了 2 个,如图 6a 和图 6b 所示,可以看出水垫塘底板的振动虽然是随机的,但仍然包含着周期的成分。在基本相同的延迟时间差内,均出现了峰值。

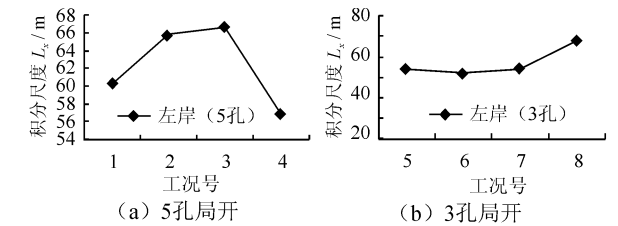


图 2 左岸纵向空间积分尺度变化情况

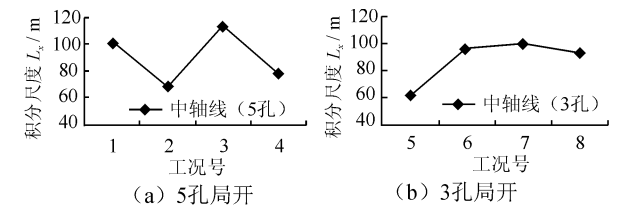


图 4 中轴线附近纵向空间积分尺度变化情况

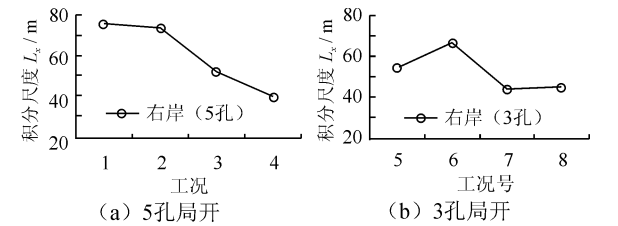


图 3 右岸纵向空间积分尺度变化情况

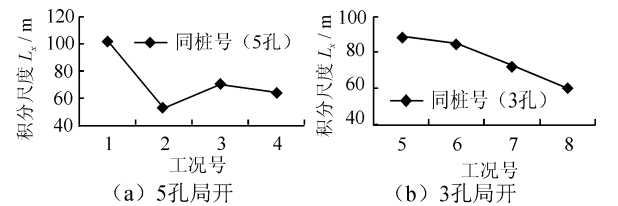


图 5 同桩号横向空间积分尺度变化情况

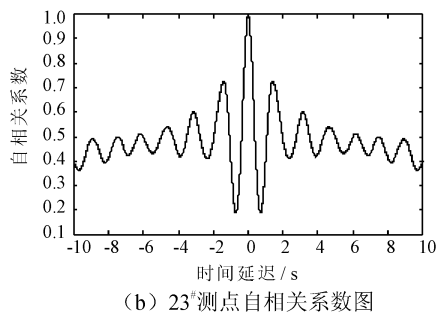
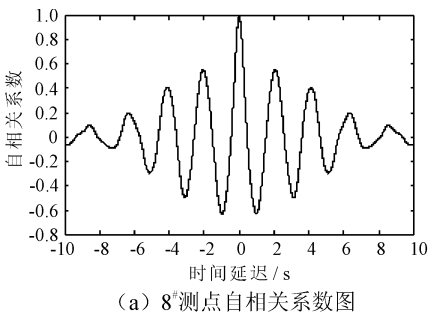


图 6 2[#]、3[#]、4[#]表孔局开时测点的自相关系数图

4 结 语

(1)泄洪条件下底板上相邻测点的相关性较好,振动位移的互相关系数都较大,都在 0.8 以上,属于高度相关。而位置不相邻点的相关系数则要小得多。水垫塘中轴线附近测点的互相关系数稍大些。左侧底板上测点振动的幅值比右侧稍小,复杂程度也要小一些。

(2)振动的空间积分尺度可以反映底板不同位置振动的整体性以及结构的完整性。振动的空间积分尺度计算结果表明,水垫塘内漩涡的运动形态为三元形式,引起底板振动的分布也不对称变化。随着泄流量的增加,左岸和中轴线附近的振动空间积分尺度基本呈增加的趋势,右岸和同桩号横向的振动空间积分尺度基本呈减小的趋势。同种工况下,中轴线附近底板振动的纵向空间积分尺度最大,同桩号横向空间

积分尺度次之,右岸纵向空间积分尺度最小。

(3)水垫塘底板的振动虽然是随机的,但仍然包含着周期的成分,在基本相同的延迟时间差内,均出现了峰值。

参考文献:

[1] 杨 敏,董天松.高坝消力塘防护结构稳定性研究进展[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2010,11(3):77-81.

[2] 梁在潮.紊流相干结构与脉动壁压[J].水利学报,1985,16(8):12-17.

[3] 林继堃,练继建.二元射流作用下点面脉动壁压的幅值计算[J].水利学报,1988,19(12):34-40.

[4] 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.

[5] 杨 敏,李树宁.平底水垫塘透水底板下表面脉动压力试验研究[J].水利学报,2011,42(11):1368-1371.

[6] 杨 弘.高坝消力塘防护结构耦合动力分析与健康诊断研究[D].天津大学,2007.