

官地水垫塘底板泄洪振动响应特性研究

练继建, 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: 利用官地水垫塘底板泄洪振动响应原型观测成果, 分析了不同泄洪工况下底板振动强度的分布特征, 同时应用现代谱分析方法, 从频域的角度分析了底板泄洪振动的频域特征, 并研究了不同泄洪工况及流量对底板振动特性的影响, 以及各测点的相关性。结果表明, 在官地水电站底流消能的情况下, 位于消力池内前段(坝前 0+149 m)这一区域的板块振动响应最为剧烈, 之后沿程减弱。水流的不对称流动和摆动, 引起底板不同区域的板块振动强度分布规律产生显著差别。正常运行下的水垫塘底板是在水流荷载作用下的随机受迫振动, 各测点的振动相关性较好, 底板整体性也较好, 且优势频率非常稳定地分布在 0.6~1.7 Hz 之间。水垫塘内涡旋尺度较大, 底板振动本身有着很好的相似性和明显的同步性。随着泄洪流量的增大, 正常运行下的底板振动强度平稳增强, 优势频率缓慢下降, 且当泄流量高于 1 500 m³/s 后, 优势频率随泄流量增大而下降的速度趋于缓慢, 并最终趋于稳定。

关键词: 水垫塘底板; 原型观测; 振动特性; 相关性分析。

中图分类号: TV 135.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0060-06

Research on Sluice Vibration Response Characteristics of Slabs in Plunge Pool of Guandi Hydropower Station

LIAN Ji jian, PENG Wen xiang, MA Bin

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

Abstract: Based on the prototype observation results of the vibration response of plunge pool slabs in the Guandi hydropower station, the distribution of vibration strength of slabs had been analyzed under different spillway conditions. Meanwhile, the frequency domain characteristics of the sluice vibration of slabs were analyzed from the aspect of frequency domain using the modern spectral analysis method, and the effects of different sluice conditions and flow discharges on the vibration characteristics of slabs in plunge pool were studied. The correlation between different measuring points was also analyzed. The results showed that the most intensive vibration response is located in the forepart (0+149 m) of the power consumption pond under the conditions of underflow energy dissipation in the Guandi hydropower station and the vibration response decreases along the way. The asymmetrical water flow caused different vibration strength distributions in different areas of the slabs. The slabs in the plunge pool vibrated randomly forced by the water flow load under the normal operation. The correlation between each measuring point was remarkable and the dominant frequency was stably distributed between 0.6 and 1.7 Hz. The scale of vortex was very large in the plunge pool and thus the vibration of slabs had good similarity and synchronicity. With the increasing of flow discharge, the vibration strength of the slabs increased as well under the normal operation while the dominant frequency decreased stably. When the flow discharge was more than 1 500 m³/s, the decreasing rate of dominant frequency tended to be slow and eventually stayed stable.

Key words: plunge pool slab; prototype observation; vibration characteristics; correlation analysis

近年来,我国设计的高坝工程大多将下游一定范围内的河床用混凝土防护起来,并在下游一定距离内修建二道坝,形成泄洪消能建筑物的一部分——水垫塘,以达到消能

和防冲的目的。水垫塘作为防护下游河床的主要结构,其底板自身的稳定问题尤为重要^[1-3]。对水垫塘底板的安全监测与预警是实现消能和防冲目的、保证高坝泄洪安全的关键手

收稿日期: 2012-12-14 修回日期: 2013-01-15 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.026.html>

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004); 国家自然科学基金青年基金(51109156); 教育部新教师青年基金(20100032120048)

作者简介: 练继建(1965-),男,福建建瓯人,教授,博士生导师,从事水利水电安全与优化运行、海上新能源开发利用研究。E-mail: jliian@tju.edu.cn

段之一。近几年,随着社会对水土保持和环境保护认识与要求的提高,许多在建和将建工程放弃了挑流消能方案而选择底流消能方案,随之而带来的底流消能形式的高坝水垫塘底板安全问题也越来越突出^[4]。

一直以来,高坝泄洪振动问题的研究范围一直仅限于坝区的水工建筑物本身,人们关注的焦点也是泄洪产生的能量对泄洪建筑物本身的影响,很少关心泄洪建筑物以外区域水流能量耗散的影响。但是最近,向家坝泄洪产生的建筑物振动沿地基传播后在远处软基上引起城市房屋振动强烈的现象受到了广泛关注。其影响作用机理目前尚不明晰,据有关专家分析是由于底板在泄洪状态下产生振动,振动能量在水垫塘内被消耗掉一部分,虽然由于坝区的地基一般都是硬基,其振动的响应非常小,几乎可以忽略,但是泄洪产生的能量能够沿着地基以振动波的形式向远处传播。在传播的过程中如果遇上软基,振动的能量就会得到释放,软基上的振动响应就有可能放大,从而引起软基上的建筑物产生强烈的晃动和振动,即产生所谓的“果冻效应”,对地面上的城市安全产生严重的威胁。在这个过程中,泄洪振动的能量是通过与之偶联接触的底板结构传播给地基的,底板的振动相对于地基来说,是“二次激励源”,因此从激励与响应相对应的角度来说,底板的振动特性对于地基振动响应特性和形式有着直接的影响。由于水垫塘底板结构一般不是整体浇筑的,都是由不同大小的板块组成的,研究水垫塘底板结构的完整性以及各板块振动之间的相关关系,对于分析研究地基的振动问题有着现实的意义。

本文利用官地水电站水垫塘泄洪振动原型观测成果,对官地水垫塘底板泄洪下的振动特性进行了全面分析。

1 官地水电站水垫塘底板泄洪振动监测

1.1 工程简介

官地水电站位于雅砻江中下游四川省盐源县境内,是二滩水电站上游的衔接水库。官地水电站为碾压混凝土重力坝型、坝身5个表孔(加宽尾墩)泄洪+底流消能的泄洪消能布置方案,在溢流坝两侧设置2个放空中孔。

枢纽建筑物主要由挡水坝、表孔溢流坝、坝内泄洪放空中孔、消力池、右岸地下厂房等建筑物组成。碾压混凝土重力坝坝高168 m,坝顶高程1 334.00 m,坝顶全长约529 m;溢流坝段布置于河床中部,溢流堰顶高程1 311.00 m,每孔净宽15 m。两个中孔坝段分别布置于溢流坝段两侧,中孔进口底高程1 240.00 m,孔口出口尺寸5 m×7 m(宽×高),其功能为放空水库与特大洪水时参与泄洪。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。

枢纽泄洪总功率16 118 MW,单位体积消能率32.1 kW/m³。官地水电站属于典型的高坝泄洪底流消能的布置型式,具有落差大、流速高,泄洪功率大的特点,泄洪条件下的水垫塘底板安全问题十分突出^[5]。

1.2 观测分析原理

将振动位移传感器通过水工电缆连接到DMSH-60RP

数据采集仪,通过在采集程序中设置采样频率和采样时间等参数,即可实现对底板和边坡振动的采集与处理工作。官地水垫塘底板振动测试原理见图1。

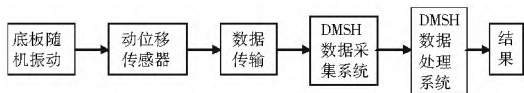


图1 泄洪消能底板随机振动测试原理

Fig. 1 The principle of vibration test for slabs of flood discharge and energy dissipation in the plunge pool

1.3 测点布置

官地水电站水垫塘底板上全部为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。

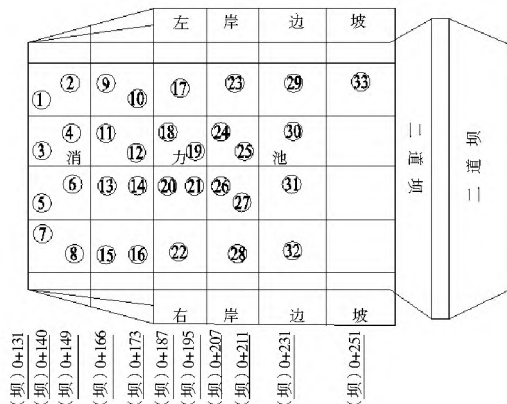


图2 官地水垫塘底板动位移传感器布置

Fig. 2 The layout of displacement sensors in the slabs of the plunge pool in the Guandi Hydropower Station

1.4 观测试验过程及工况

原型观测为官地水电站的施工导流期,以及第一个汛期,对不同泄洪工况下的底板的振动情况进行现场观测。用 $f=200\text{ Hz}$ 的采样频率对每个工况分别进行了采样测试,采样长度为8 192。为了保证样本的可靠性,每种工况都重复采样数次。每个典型工况各选一组代表数据进行分析。具体选取的测试工况见表1。

2 水垫塘底板泄洪振动的强度特征分析

底板振动位移的均方根值直接反映了底板在水流脉动压力作用下的振动响应剧烈程度,对底板的振动强弱状态具有很强的表征能力。因此可以通过分析位移均方根值的分布及变化特征来掌握底板在泄洪条件下的运行性态。

2.1 底板泄洪振动强度顺河向分布特征

取9号工况下底板的振动数据为例进行分析说明。其他工况下具有如下相同的规律和结果。图3给出了9号工况下靠近消力池中心线处底板良好测点(6#、14#、20#、21#和26#)的振动强度顺河向分布情况。图4给出了9号工况下消力池中心线处两侧底板良好测点(左岸2#、10#、23#、33#;右岸8#、15#、16#、28#)振动强度顺河向分布情况。

表 1 水垫塘底板振动测试部分典型工况

Table 1 The typical working conditions of vibration test of the slabs in the plunge pool

工况	开孔及开度情况	上游水位/m	下游水位/m	上下游水位差/m	泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	左中孔(0.3 m)+ 右中孔(0.3 m)	1 252.80	1 211.50	41.30	310
2	左中孔(0.3 m)+ 右中孔(0.3 m)	1 298.92	1 211.76	87.16	300
3	3 [#] (0.3 m) 表孔	1 317.10	1 212.13	104.97	320
4	2 [#] (2 m)+ 3 [#] (3 m)+ 4 [#] (2 m) 表孔	1 328.22	1 208.81	119.41	1028
5	2 [#] (2 m)+ 3 [#] (3 m)+ 4 [#] (2 m) 表孔	1 329.18	1 209.15	120.03	1 227
6	2 [#] (2.5 m)+ 3 [#] (3 m)+ 4 [#] (2.5 m) 表孔	1 328.43	1 209.55	118.88	1 445
7	2 [#] (3 m)+ 3 [#] (3.5 m)+ 4 [#] (3 m) 表孔	1 328.48	1 209.13	119.35	1 595
8	2 [#] (3.5 m)+ 3 [#] (4 m)+ 4 [#] (3.5 m) 表孔	1 328.16	1 210.43	117.73	1 808
9	2 [#] (5 m)+ 3 [#] (5 m)+ 4 [#] (5 m) 表孔	1 328.70	1 211.39	117.31	2 731
10	1 [#] (2 m)+ 2 [#] (2.5 m)+ 3 [#] (3 m)+ 4 [#] (2.5 m)+ 5 [#] (2 m) 表孔	1 327.77	1 210.68	117.09	2 014
11	1 [#] (2 m)+ 2 [#] (2.5 m)+ 3 [#] (3 m)+ 4 [#] (2.5 m)+ 5 [#] (2 m) 表孔	1 329.69	1 211.37	118.32	2 464
12	1 [#] (4 m)+ 2 [#] (4 m)+ 3 [#] (5 m)+ 4 [#] (4 m)+ 5 [#] (4 m) 表孔	1 327.72	1 213.63	114.09	3 420
13	1 [#] (5 m)+ 2 [#] (6 m)+ 3 [#] (6.5 m)+ 4 [#] (6 m)+ 5 [#] (5 m) 表孔	1 323.49	1 212.35	111.14	3 648

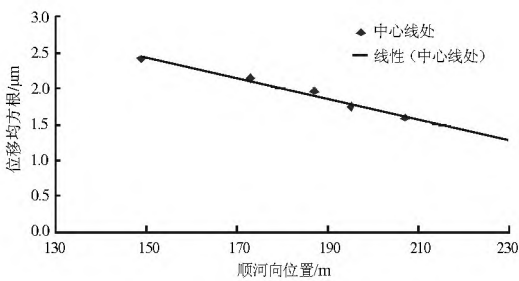


图 3 消力池中心线附近底板振动强度顺河向变化

Fig. 3 Variation of vibration strength along the river in the center line of slabs in the power consumption pond

由图 3 可知: 在 9 号泄洪工况下, 位于消力池中心线附近运行良好的测点处底板振动强度顺河向是沿程减小的。其中位于坝前 0+ 149 m 处的 6[#] 测点振动位移均方根值最大, 为 2.47 μm。然后向下游沿程几乎成线性递减。分析后认为此处应该是溢流水舌经跌坎后与消力池底板附着点, 位于靠近坝前的第一排板块上。在官地水电站底流消能的情况下, 位于消力池内前段这一区域的板块由于承受入池水流强烈冲击荷载和脉动荷载的冲击, 板块的振动响应最为剧烈, 之后沿程减弱。

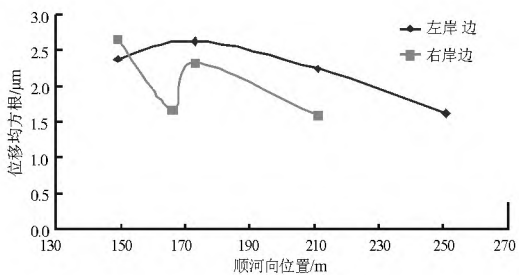


图 4 消力池两侧底板振动强度顺河向变化

Fig. 4 Variation of vibration strength along the river on both sides of slabs in the power consumption pond

由图 4 可知: 位于消力池两侧运行良好的测点处, 底板的振动强度分布规律不一致, 且与中心线附近的振动强度分布规律也不一致。位于靠近左岸上的底板振动强度顺河

向分布特点是“先增强后减弱”; 而位于靠近右岸上的底板振动强度顺河向分布特点却刚好相反, 为“先减弱后增强再减弱”。在消力池前段区域, 底板垂直于河向的振动强度分布比较均匀, 两侧与中心线附近的振动强度都非常接近, 均方根都在 2.5 μm 左右。然后在坝前 0+ 170 m 附近发生转变。左岸上底板的振动强度达到“顶峰”, 然后沿程下降; 而右岸上底板的振动强度在此处先达到“低谷”, 然后沿程上升。分析后认为这是由于水流进入消力池内与底板发生接触后发生折向, 但是这种折向并不是对称的, 而是偏向了左岸。水流到达左岸边墙后反向, 又折向右岸, 使得右岸上的底板所受水流荷载由小变大, 从而引起右岸上底板的振动强度由弱变强。在坝前 0+ 180 m 以后, 两岸以及中线附近底板的振动强度沿程分布规律变为一致, 均为沿程减弱。

在官地水电站底流消能的情况下, 水舌经跌坎后与消力池底板附着后发生水跃, 引起消力池内水流掺混、旋滚强烈, 引起底板强烈振动。由于水舌的不对称流动和摆动, 引起靠近两岸上底板的振动强度分布规律发生改变, 从而形成上述的分布特征。

2.2 底板不同测点的振动过程变化特征

13 号工况的典型测点振动过程变化见图 5。

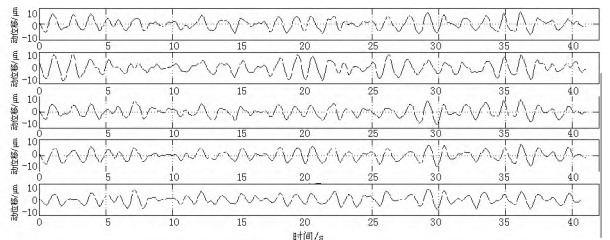


图 5 13 号工况 14[#], 16[#], 21[#], 24[#] 传感器所测振动时程线

Fig. 5 The vibration signals from the 14[#], 16[#], 21[#], and 24[#]

sensors under the No. 13 working condition

泄洪水流经跌坎进入水垫塘内, 造成对底板的强烈冲击, 在水垫塘内形成了复杂的紊流运动, 诱发了水垫塘底板的振动, 紊流涡体的复杂性使底板的振动呈现出高度的随机性⁶⁾。由图 5 这些测点的振动过程时程线可以看出, 官地水垫塘底板的低频、随机、小振幅特性非常明显; 底板测点位置

虽然有所不同,但振动却有着明显的同步性,出现极值的时间基本上是一致的。说明这些测点基本处在同一个大涡旋控制下。由于这些测点分布在水垫塘中间相当大的区域,表明水垫塘内涡旋尺度是相当大的。

2.3 泄洪工况及流量对底板振动强度的影响

图6给出了部分典型测点的底板振动位移均方根值随工况变化规律。图7给出了部分典型测点的底板振动位移均方根值随测点号变化规律。

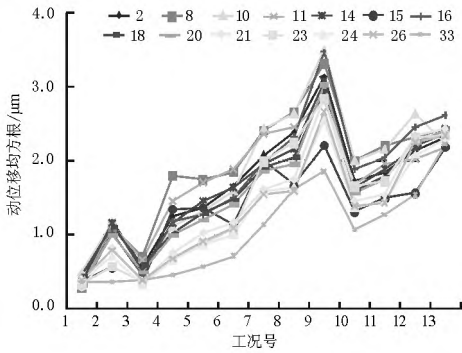


图6 典型测点动位移均方根随工况变化规律

Fig. 6 Variation of root mean square of displacements at typical measuring points with the number of working conditions

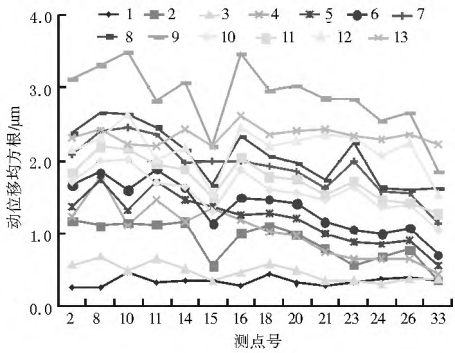


图7 典型测点动位移均方根随测点号分布规律

Fig. 7 Variation of root mean square of displacements at typical measuring points with the number of measuring points

由图6和图7可知,不同位置的测点动位移均方根随工况的变化趋势基本一致,表明底板虽然与水体、基岩和锚固钢筋的耦合结构比较复杂,但是底板振动本身却有着很好的相似性。这说明了官地水垫塘底板结构完好。虽然测点位置不同,但各板块内在结构特征相同,因此不同的工况,不同位置的动位移响应表现出相同的变化趋势。另外由图6和图7可知:在同一种开孔方式以及相同开孔数的情况下,随着泄流量的增加,各个测点的振动位移均方根呈平缓增加的态势。但是在相同泄流量下,开孔越多,底板的振动量越小。如图6所示,9号工况和11号工况泄流量接近,但是由于9号工况只开了中间3个表孔,水流能量分布比较集中,导致底板振动强度比开5个表孔的11号工况下的振动强度大了50%以上。由此看出,开孔方式对于底板的振动强度分布有着非常大的影响。增加开孔数能够显著降低底板的振动强度。从振动能量的空间位置分布来看,官地水垫塘底板的振动强度分布相对比较均匀,各板块之间振动强度相差不是特

别大。振动量较大的区域分布在水舌落点附近或者水跃的强旋滚区,振动量由水舌落水点附近向下游逐渐减小^[7]。从射流冲击区到壁面射流区远端,振动能量减少很快,均方根下降了大约一半左右。

3 底板泄洪振动的频域特征分析

泄洪时底板在水流的作用下做随机振动,其主频在频域的角度反映了底板的随机振动特征。应用现代谱分析法求得各测点实测数据的功率谱密度,分析底板振动的主频分布规律。图8给出了不同工况下官地水垫塘底板泄洪振动典型测点的主频值统计分布图。图9给出了9号工况下典型测点26#测点的功率谱密度图。

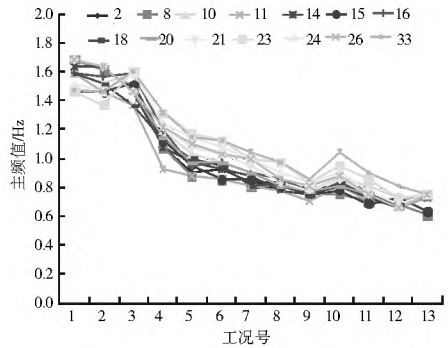


图8 底板振动位移主频值随工况号变化规律

Fig. 8 Variation of dominant frequency of vibration displacement in the slabs with the number of working condition

由图8可知,官地水垫塘底板的振动为低频大幅度振动^[8],受激振动的振型阶数较多,能量集中的频带较窄,分布在0.6~1.7 Hz,而且优势频率明显。测试中典型工况下各测点的优势频率集中在0.6~1.2 Hz和1.4~1.7 Hz两个范围。同一种工况下各测点的主频范围与测点位置、振动的幅值无关,主频基本都稳定在0~2 Hz的范围内,该范围属于水流脉动的频率范围,因此各测点都是在水流荷载作用下做高频微幅的随机受迫振动。由图8可知,随着工况的改变,泄流量的增加,底板的振动优势频率会明显下降。但泄流量增大到1500 m³/s以后底板振动的优势频率下降的速度趋于缓慢,逐渐向0.8 Hz左右稳定。表明大流量下底板的低频振动特征愈加明显。

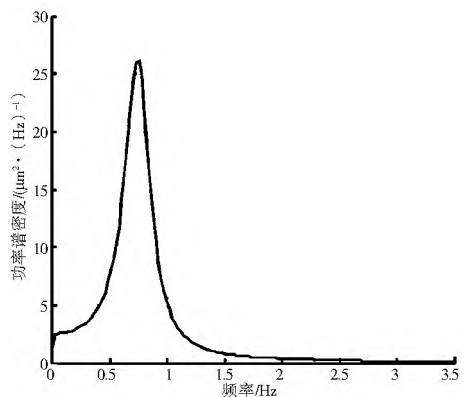


图9 9号工况26#测点功率谱密度

Fig. 9 The power spectral density at the 26# measuring point under the No. 9 working condition

4 底板泄洪振动的相关性分析

水垫塘底板的振动信号是一种符合正态高斯分布的随机过程。对于各个不同位置的测量值可以进行相关分析,来进一步了解不同位置不同工况下振动间的联系与区别。底板不同位置之间振动的相关性反映了底板在水流冲击荷载和脉动荷载作用下产生振动的整体性⁹⁾。振动相关性越好,表明底板的振动整体性越大,反映底板结构的完整性越好。因此可以利用底板振动的相关性特征来辨别底板振动的整体性和结构的完整性。相关系数能够以具体精确的数字描述两个变量之间的相互程度。在实际运用中,最常使用的相关系数是由英国统计学家卡尔皮尔逊提出的简单相关系数。其数学表达式为:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x^*) (y_i - y^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x^*)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y^*)^2}} \quad (1)$$

式中: x 和 y 为两个待研究的变量; $(x_i, y_i) (i= 1, 2, \dots, n)$ 为两变量的 n 个测量值; x^* 和 y^* 分别为 n 个测量值的均值。在相关分析中,一般根据 $|r|$ 的数值大小,将不完全线性相关的密切程度分为 4 个等级: $0 < |r| < 0.3$ 的微弱相关; $0.3 < |r| < 0.5$ 的低度相关; $0.5 < |r| < 0.8$ 中度相关; $0.8 < |r| < 1$ 的高度相关。

图 10(a)、图 10(b) 给出了相邻测点的互相关分析图,它们的互相关系数为 $C_0 = 0.945 2$, $C_0 = 0.902 7$ 。图 11(a) - 图 11(d) 给出了沿水流方向和垂直于水流方向上两点相关系数 R 与相邻点距离 L 的关系。定义两个方向上两点的相关尺度分别为:

$$L_x = \frac{A_x}{R_y} \quad (2)$$

$$L_B = \frac{A_x}{R_B} \quad (3)$$

式中: L_x, L_B 分别为沿水流方向和垂直于水流方向上底板振动的纵向及横向相关尺度; A_x 为相关系数趋势线与坐标轴包围的面积; R_y, R_B 分别为相关系数趋势线在 Y 轴上的截距 ($R_y = R_B = 1$)。

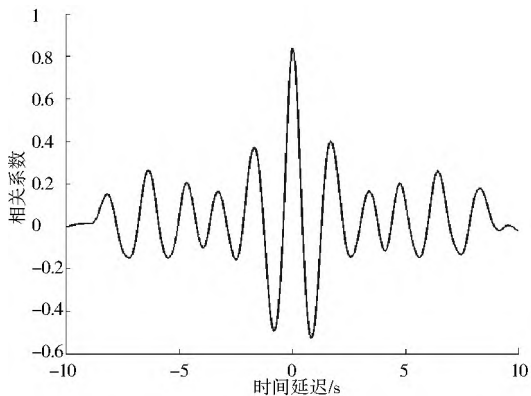


图 10(a) 9 号工况 14[#]、20[#] 测点的相关系数

Fig. 10(a) The correlation coefficient between the 14[#] and 20[#] measuring points under the No. 9 working condition

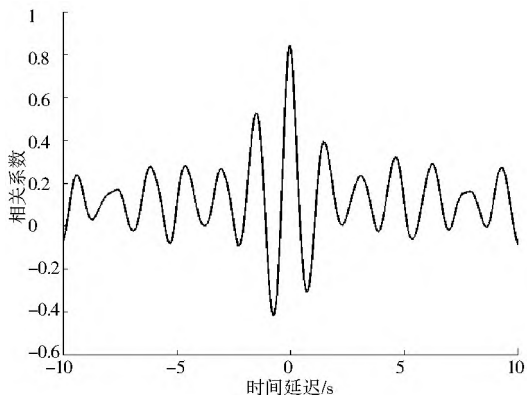


图 10(b) 9 号工况 2[#]、10[#] 测点的相关系数

Fig. 10(b) The correlation coefficient between the 2[#] and 10[#] measuring points under the No. 9 working condition

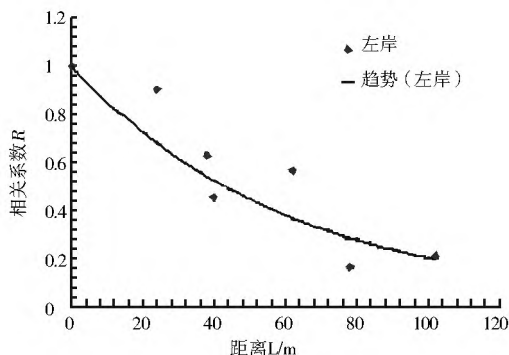


图 11(a) 左岸底板测点的相关系数趋势

Fig. 11(a) The trend of correlation coefficients between the measuring points along the left side of slabs

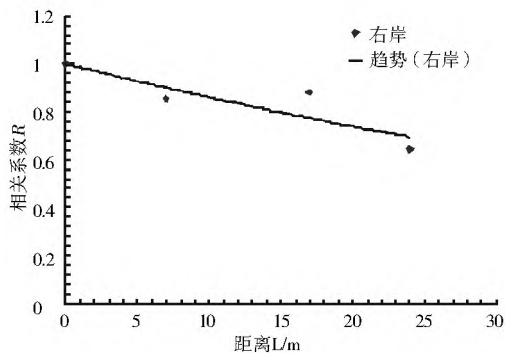


图 11(b) 右岸底板测点的相关系数趋势

Fig. 11(b) The trend of correlation coefficients between the measuring points along the right side of slabs

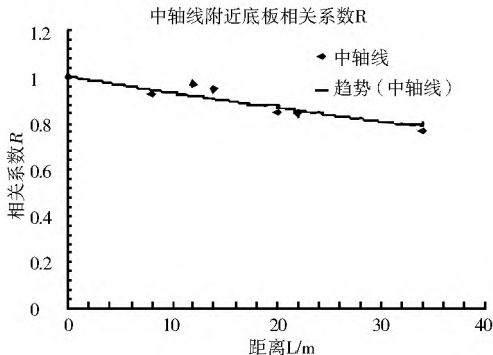


图 11(c) 底板中线测点的相关系数趋势

Fig. 11(c) The trend of correlation coefficients between the measuring points along the center line of slabs

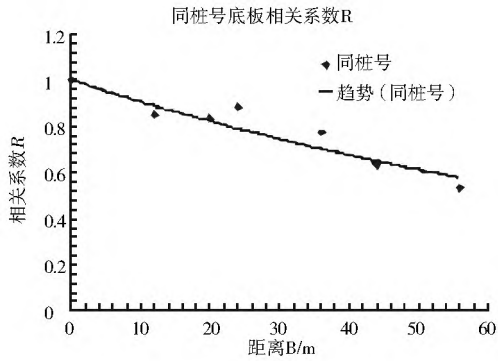


图 11(d) 同桩号底板测点的相关系数趋势

Fig. 11(d) The trend of correlation coefficients between the measuring points along the transverse direction of slabs

由上述计算可得： L_x 左岸 = 52.6 m； L_x 右岸 = 40 m； L_x 中线 = 73.3 m； $L_B = 59.3$ m。从大量相邻两点的相关性分析中可以看出，底板测点的相关性较好，底板的整体性较好。相邻点的互相关系数比位置不相邻点的相关系数要大得多，都大于 0.8，属于高度相关。从振动相关尺度计算结果可以看出，水垫塘中轴线附近测点的相关尺度较大，大于两岸的相关尺度，即中轴线附近的相关性最好；横向相关尺度较大，大于两岸的相关尺度；右岸的相关尺度最小，相关性最差。同桩号的三个测点，水垫塘中轴线上测点与左侧底板测点的相关系数比右侧的要大。

5 结论

对官地水电站水垫塘底板的泄洪振动原型观测成果分析计算结果表明，在官地水电站底流消能的情况下，位于消力池内前段(坝前 0+149)这一区域的板块的振动响应最为剧烈，之后沿程减弱。水舌经跌坎后与消力池底板附着后发生水跃，引起消力池内水流掺混、旋滚强烈，引起底板强烈振动。正常运行下的水垫塘底板是在水流荷载作用下的随机受迫振动，其低频、随机、小振幅特性显著，且优势频率明显。虽然激发水垫塘底板振动的原因较为复杂，但振动本身却有着很好的相关性、相似性以及同步性。改变泄洪方式，扩大水舌入水面积，增加开孔数量是减弱底板振动强度，提高底板运行安全性的一种有效手段。可见，典型工况下水垫塘底板泄洪振动特性的原型观测成果，对于官地水电站的泄洪安全监测、科学诊断与调度以及保障泄洪设施的安全运行具有重要的参考意义。

参考文献(References):

[1] 练继建,杨敏.高坝泄流工程[M].北京:中国水利水电出版社,2008.(LIAN Ji jian, YANG Min. Hydrodynamics for High Dam [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))

[2] 杨敏,催广涛.水垫塘底板稳定性控制指标的探讨[J].水利学报,2003,(8):6-10.(YANG Min, CUI Guang tao. Study on control factors of stability for plunge pool slabs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (8): 6-10. (in Chinese))

[3] 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.(YANG Min, Dong Tian song. Research progress in stability of protecting structure in high dam plunge pool[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2010, 11(3): 77-81. (in Chinese))

[4] 雷中俊.安康水电站表孔消力池破损原因分析及加固处理[J].水力发电,2010(11):48-53.(LEI Zhong jun. Analysis on the damage causes of the stilling basin for the Ankang Hydropower Station and its reinforcement[J]. Water Power, 2010(11): 48-53. (in Chinese))

[5] 李静,姜伯乐,金峰.消力池底板及导墙脉动压力特性试验研究[J].人民长江,2009,40(17):52-54.(LI Jing, JIANG Bo le, JIN Feng. Experimental research on fluctuating pressure characteristics of bottom plate of stilling basin and training wall[J]. Yangtze River, 2009, 40(17): 52-54. (in Chinese))

[6] 王继敏.高坝消力塘防护结构安全问题研究[D].天津:天津大学,2007.(WANG Ji min. Study on the Safety of Protective Structures in Stilling Pool of High Dam[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))

[7] 张声鸣,陈建.水垫塘底板稳定研究[J].长江科学院院报,1997,85-90.(ZHANG Sheng ming, CHEN Jian. Experimental Research on Stability of Concrete Slabs for Plunge Pools[J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 1997, 85-90. (in Chinese))

[8] 崔莉,张廷芳.射流冲击下护坦板块失稳机理的随机分析[J].水动力学研究与进展(A辑),1992,7(2):212-218.(CUI Li, ZHANG Ting fang. The Random Analysis of Apron Slab under the Percussion Action of Jet Flow[J]. Journal of Hydrodynamics(A), 1992, 7(2):212-218. (in Chinese))

[9] 杨弘.二滩水电站水垫塘底板动力响应特性与安全监测指标研究[D].天津:天津大学,2004.(YANG Hong. Study on Dynamic Response Characteristics and Safety Monitoring Indexes of Apron Slabs in Plunge Pool of Ertan Hydropower Station[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))

(上接第 38 页)

[18] 裴源生,张金萍.水资源高效利用概念和研究方法探讨[A].中国水利学会 2005 学术年会论文集——节水型社会建设的理论与实践[C].北京:中国水利学会,2005:5.(PEI Yuan sheng, ZHANG Jin ping. Discussion of Concepts and Research Methods on Water Resources Efficiently Use[A]. Annual Conference Proceedings of Chinese Hydraulic Engineering Society in 2005——Theory and Practice of Water saving Society[C]. Beijing: Chinese

Hydraulic Engineering Society, 2005: 5. (in Chinese))

[19] 张修宇,陈海涛.我国水污染物总量控制研究现状[J].华北水利水电学院学报,2011,(5):142-145.(ZHANG Xiuyu, CHEN Haitao. Current Research Situations of Water Pollutant Total Control in China[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, (5): 142-145. (in Chinese))