

混凝土成层结构的流激振动特性

牛超, 杨敏, 李炳阳

(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: 泄流激励引起水工建筑物振动的现象时有发生且形式多样, 严重的还可能引起结构的破坏。对于混凝土成层结构而言, 由振动引起破坏的案例不多, 对其振动响应机制的研究也不够深入。以混凝土拱坝为例, 通过数值计算及模型试验对比分析了整体与成层两种不同结构在相同泄流荷载作用下结构的振动响应, 探讨了响应与结构自身的关系, 并结合“拍”的概念, 对混凝土成层结构振动响应特性与泄流荷载之间的关系进行了研究。结果表明, 成层结构频率相近的前两阶振动是拍振形成的主要原因。此外, 即使不满足拍振形成的条件, 振动曲线同样可以表现为“拍”的形式, 且振动量较受迫振动大幅增加, 实质为“水力共振”现象。

关键词: 泄流激励; 成层结构; 响应机制; 拍振; 水力共振

中图分类号: TV 65 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)03-0476-06

Research on flow induced vibration characteristics of layered concrete structure

NIU Chao, YANG Min, LI Bingyang

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

Abstract: Vibration of hydraulic structures caused by flood discharge excitation occurs frequently and has different forms, and serious vibration may lead to structural damage. Few cases of damage caused by vibration for layered concrete structures were presented, and the study of vibration response mechanism was not enough. In this paper, the vibration responses of concrete arch dam with two different structures, including a whole structure and a layered structure, under the same flow discharge conditions were investigated through the comparative analysis of numerical calculation and model test. The relationship between the structure and vibration response was analyzed. Furthermore, the relationship between the vibration response of layered concrete structure and flow discharge was studied in consideration of the "beat" concept. The results showed that the beat vibration is mainly caused by the first two bands of vibration with similar frequency. Although the conditions for the formation of beat vibration may not exist, the vibration curve can present the form of "beat", and the vibration quantity is much larger than that of the forced vibration, which indicated that this is actually the hydraulic resonance phenomenon.

Key words: flow discharge excitation; layered structure; response mechanism; beat vibration; hydraulic resonance

泄流诱发水工结构振动是一种复杂的流固相互作用现象^[1]。在水利水电工程中, 由泄流引起水工建筑物振动的现象时有发生, 且形式多种多样。在复杂的水流激励荷载作用下还有可能引起结构的剧烈振动, 甚至破坏。1982年对乌江渡水电站进行原型观测时发现左岸滑雪道式溢洪道右导墙存在强烈的“拍振”现象, 墙顶铁栏杆振动剧烈, 泄流量越大振动越明显。1978年8月进一步观测时发现, 在闸门全开时, 导墙的最大双倍振幅达3.1 mm, 左导墙也出现了上下贯通缝。经过专门处理, 工程才得以安全运行, 但花费巨大^[2-3]。

巨大的坝身泄流量, 几千万乃至上亿瓦的泄流功率, 给

泄洪消能以及水工建筑物的减振减蚀带来了巨大挑战。本文结合模型试验及数值计算, 分析碾压混凝土成层结构在不同幅频特性泄流激励作用下的振动特性, 及其在流激振动条件下的振动响应机制。

1 结构流激振动机理及拍振

1.1 结构流激振动机理

在泄流振动领域, 德国学者 Naudascher^[4]归纳了四种流体诱发结构振动的形式, 即: 外部诱发、不稳定诱发、运动诱

收稿日期: 2014-09-11 修回日期: 2015-05-06 网络出版时间: 2015-05-13
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1508.003.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB035905)

作者简介: 牛超(1991-), 男, 山东菏泽人, 主要从事水工水力学研究。E-mail: niuchao122@163.com

通讯作者: 杨敏(1956-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工水力学研究。E-mail: minyang2000@163.com

发、共振流体振子诱发。大量的原型观测成果表明,泄流结构流激振动主要是外部诱发的振动,高坝泄流振动、紊流脉动压力诱发的消力池导墙振动等均属于此类振动^[5]。外部诱发的振动是由水流激励或压力脉动引起的,并不完全表现为系统的固有振动。其中最受关注的就是在接近水工建筑物固有频率的荷载作用下所引起的结构振动^[3]。

泄流结构若出现如图 1 中所示的振动情况,结构振动强度加剧,在该水流激励长期作用下结构易出现疲劳破坏。图 1 中所示的形如“拍”的拱冠梁振动现象称为“拍振”^[6]。

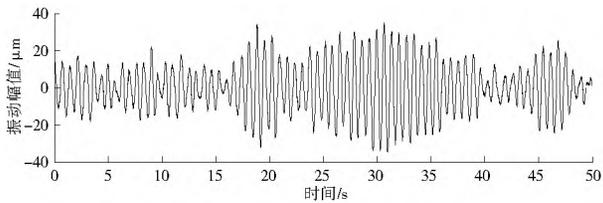


图 1 二滩拱坝拱冠梁上测点原型观测时程曲线

Fig. 1 Time history curve of measuring point in crown cantilever of Ertan arch dam

1.2 拍振的形成条件

将两个频率相差不多的同向简谐振动合成时,其合成波形的振幅会出现规律性时大时小的现象,这种现象为“拍”现象^[7,12]。

定义两个振动信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$:

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_{10})$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_{20})$$

式中: A_1 和 A_2 、 ω_1 和 ω_2 、 ϕ_{10} 和 ϕ_{20} 分别为信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的振幅、角频率和初相位。

将 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 叠加,合振动的振幅 A 与角频率 ω 分别为

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_{20} - \phi_{10})]} \quad (1)$$

$$\omega = \omega_1 + (\omega_2 - \omega_1) \cdot \frac{1 + \beta \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_{20} - \phi_{10})]}{1 + \beta^2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_{20} - \phi_{10})]} \quad (2)$$

式中: β 为振幅比, $\beta = A_1/A_2$ 。

由式(1)和(2)可知,合振动的振幅不仅与时间相关,还和初始相位差、分振幅以及角频率差有关;合振动的角频率亦受时间调制,且还和分振动振幅比相关。

1.2.1 初始相位差对合振动的影响

为了搞清初始相差 $\phi_{20} - \phi_{10}$ 对“拍”波的影响,假定振幅比 $\beta = 1$,联立式(1)、式(2),得:

$$A' = 2A \cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_{20} - \phi_{10})}{2} \quad (5)$$

$$\omega(t) = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (6)$$

由式(6)可见,合振动的振幅与频率差、初相差以及分振幅相关;频率只由两分频率之和决定。图 2 所示为两初相差不同的合振动波形,可以明显看出,初相差仅影响“拍”波包络线的位置,对“拍”现象本身不产生任何影响。

1.2.2 振幅比 β 对合振动的影响

振幅比 β 对合成“拍”的振幅及频率都会产生一定的影响。图 3 为振幅比 β 分别取 0.3、1 和 3.5 时合成“拍”的波形曲线。当 $\beta = 1$ 时,拍形完整,波形最好;而当 β 逐渐远离 1

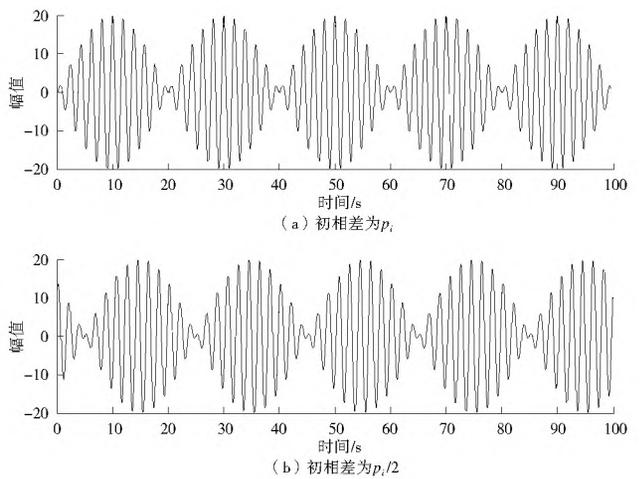


图 2 初相差 $\phi_{20} - \phi_{10}$ 对合成“拍”波的影响

Fig. 2 Effects of initial phase difference on synthetic “beat”

时,拍波趋于平顺,拍现象越发不明显。文献[9]指出,当 β 满足 $0.33 < \beta < 3$ 的范围时,能够观察到明显的拍现象。

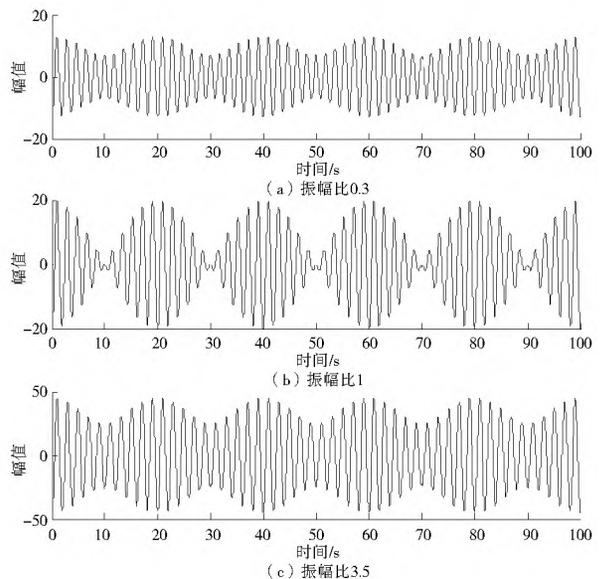


图 3 振幅比对合成“拍”波的影响

Fig. 3 Effects of amplitude ratio β on synthetic “beat” caused by different

1.2.3 频率比 α 对合振动的影响

假定两个分振动振幅相等且初相为零 ($A_1 = A_2 = A$, $\phi_{10} = \phi_{20} = 0$), 则合振动方程为

$$x(t) = \left[2A \cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \right] \cdot \cos \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,振动曲线的周期为 $T_2 = 14\pi/(\omega_2 + \omega_1)$, 而“拍”波形的振动周期为 $T_1 = 12\pi/(\omega_2 - \omega_1)$, 若要合振动表现为“拍”现象,应满足在一个“拍”波周期内包含几个振动曲线的周期。假定在一个“拍”波周期内至少要有 n 个振动曲线周期才可以观察到明显的“拍”现象,即

$$T_1 \geq nT_2$$

则要观察到明显“拍”现象,需满足下式:

$$\frac{2n-1}{2n+1} \leq \alpha \leq \frac{2n+1}{2n-1} \quad (6)$$

其中, $\alpha = \omega_2/\omega_1$ 。图 4 所示为 $n = 6$ 时合振动表现为明显的“拍”现象。文献[9]指出,频率比满足 $0.846 \leq \alpha \leq 1.182$

且 $\alpha \neq 1$ 时,合振动才能表现为明显的“拍”现象。

综上所述,只有当两个分振动的频率比 α 和 β 振幅比满足:

$$\begin{cases} 0.82 \leq \alpha \leq 1.18, \text{ 且 } \alpha \neq 1 \\ 0.33 < \beta < 3.0 \end{cases} \quad (7)$$

合振动才会表现为明显的“拍”现象。

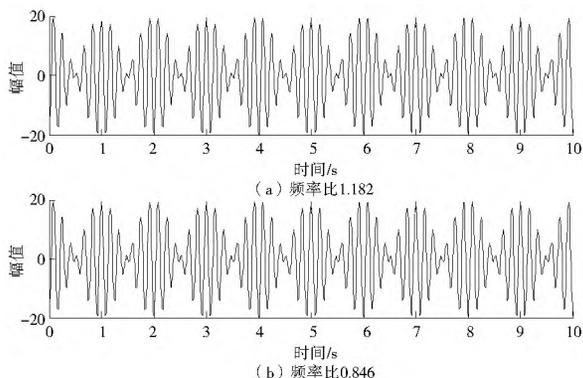


图 4 频率比对合成“拍”波的影响

Fig. 4 Effects of frequency ratio α on synthetic “beat”

2 混凝土成层结构的有限元模拟

当两个分离的表面互相接触并共切时,称其为接触状态。本文拟采用接触单元来模拟碾压混凝土成层结构的层间结合面,下面通过一组试验及有限元计算结果来验证其合理性。

2.1 参数设置及建模

本文以某导墙为例,分别采用数值计算和模型试验^[13-15]的方法对混凝土成层结构进行模拟。模型采用加重橡胶制作,层间结合面采用南大 703 胶粘接,有限元模型中层间结合面采用接触单元模拟。

导墙尺寸为:墙高 30.4 m,墙厚 3.2 m,墙体长度 79.2 m。混凝土参数为:弹性模量 $E_c = 8.4 \text{ GPa}$ (考虑到现有的加重橡胶弹模为 105 MPa,按照 $\lambda_c = 1:80$ 比尺转换),重度 $\gamma_c = 24 \text{ 000 kN/m}^3$,泊松比为 0.167。层间结合面采用接触单元模拟,用 Target170 与 Contal74 分别模拟目标面与接触面,接触方式为不分离,罚刚度取 0.3,其余实常数取合适值。

地基弹模取值对导墙低阶振动影响不大,当基础弹模大于 11 GPa 时,低阶振型频率误差在 2% 以内,高阶振型频率误差在 3% 以内,基本可以接受。故基础弹模取 11 GPa,与导墙混凝土相当。

导墙左右两侧基础各取 15 m,基础深度取 10 m,上下游方向不做延伸。墙体和基岩分别采用 Solid65 和 Solid45 单元,模型底部采用固定约束,基础四周边界采用法向约束,有限元模型见图 5。

2.2 动力分析

首先,利用 ANSYS 对导墙有限元模型进行动力分析,提取 1 号-6 号测点动应力历程,与模型试验对应测点的动应力对比分析,均方差见表 1。

可以看出,1 号-6 号测点(模型试验中 6 号测点传感器故障)动应力均方差的有限元计算结果与模型试验结果相差不大,最大误差为 0.375,最小误差仅为 0.019,处于同一量级。结果说明,采用本文方法模拟混凝土成层结构较为合

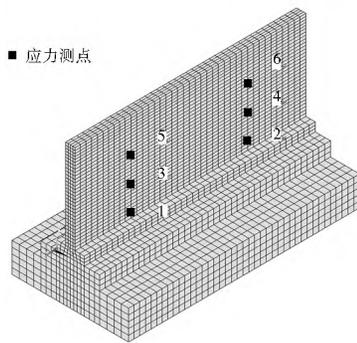


图 5 导墙有限元模型示意图

Fig. 5 Finite element model of guide wall

理,计算结果满足精度要求。

表 1 动应力均方差

Tab. 1 Standard deviation of dynamic stress

测点号	有限元/kPa	模型试验/kPa	误差
1	473.76	464.75	0.019
2	370.07	330.54	0.107
3	215.79	154.00	0.286
4	185.25	189.14	0.021
5	63.77	87.66	0.375
6	64.33		

3 流激振动条件下结构振动响应机理

为搞清混凝土成层结构-泄流荷载-振动响应三者之间的关系,本文采用某水电站混凝土拱坝模型开展研究。分析在不同频谱特性泄流荷载作用下,混凝土成层结构和整体结构的振动响应。整体及成层结构的前六阶频率(干模态)见表 2。

表 2 结构前六阶频率(干模态)

Tab. 2 First six orders of structure(dry mode)

阶数	整体结构/Hz	成层结构/Hz
1	2.22	2.20
2	2.37	2.33
3	3.71	3.66
4	3.81	3.74
5	3.95	3.91
6	4.03	3.99

根据式(7)所示的拍振形成条件及坝体前两阶振动频率,选取了两组不同频率、相同幅值的水流荷载分别对混凝土拱坝整体结构以及成层结构进行有限元数值计算。其中荷载一主频带约在 0.5~3.0 Hz 之间(以下简称高频荷载),荷载二主频带约在 0~0.5 Hz 之间(以下简称低频荷载),其频谱特性见图 6。

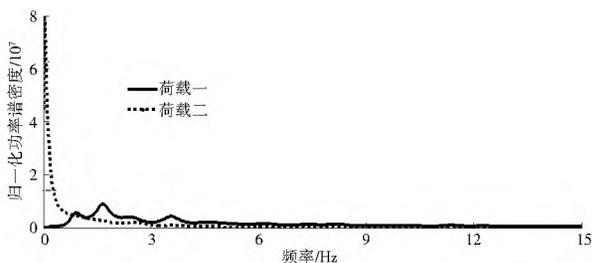


图 6 泄流荷载功率谱密度

Fig. 6 Power spectrum of flow discharge load

3.1 结构自身特性与振动响应之间的关系

为了准确分析结构自身特性与振动响应之间关系,在坝体模型上共布置 19 个测点以提取结构的动应力及动位移响应数据,测点分布见图 7。共进行了 4 种工况(见表 3)的计算,每种工况计算 2 000 步。

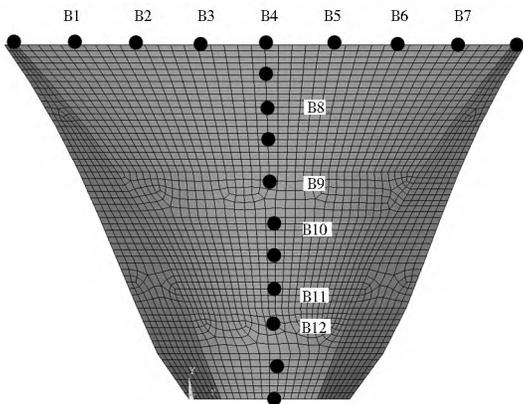


图 7 坝体振动测点布置

Fig. 7 Layout of dam vibration measuring points

表 3 有限元计算工况

Tab. 3 Working conditions of finite element calculation

工况	荷载特性	结构特性
1	低频	整体
2	低频	成层
3	高频	整体
4	高频	成层

如图 8 所示,坝顶拱圈测点动位移均方差呈两边小中间大的趋势,其中拱冠梁位置处最大。

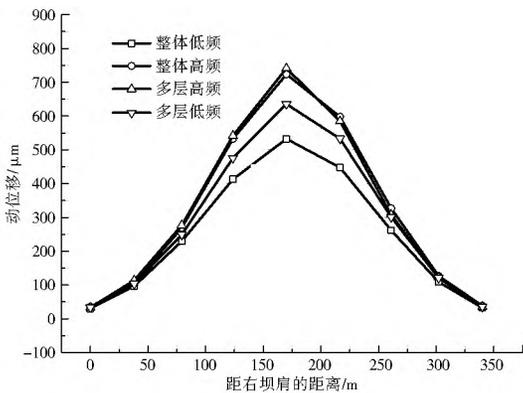


图 8 坝顶拱圈动位移均方差

Fig. 8 Standard deviation of dynamic displacement of arch dam crest

荷载二作用下,整体结构坝顶拱圈测点的动位移均方差明显小于成层结构,最大差值约为 103 μm,约占整体结构均方差的 19.4%。而在荷载一作用下,整体结构与成层结构坝顶拱圈测点动位移均方差大致相当,两条曲线基本重合。

如图 9-图 10 所示,坝体拱冠梁处测点动应力均方差呈反“S”型分布,在坝高 160 m 处均方差达最大值。在荷载二作用下,拱坝整体结构在拱冠梁处测点动应力均方差略小于成层结构,在坝高 160 m 处均方差差值最大,差值约为 3.0 kPa,占整体结构均方差的 33.4%。而在荷载一作用下,拱坝整体结构与成层结构在拱冠梁测点处动应力均方差大致

相当,两条曲线时有交叉,最大差值也出现在坝高 160 m 处,约为 1.5 kPa,占整体结构均方差的 9.0%。

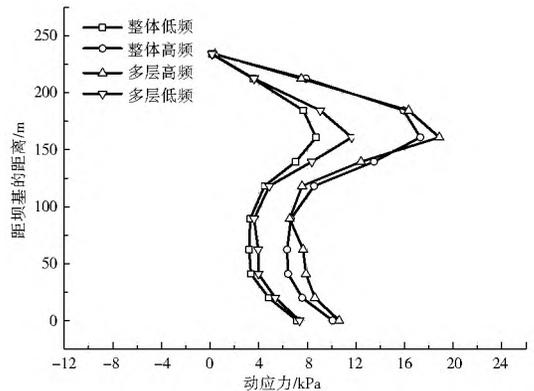


图 9 拱冠梁处动应力均方差

Fig. 9 Standard deviation of dynamic stress of crown cantilever

拱冠梁处动位移均方差则表现为自下而上逐渐增大的趋势。在荷载二作用下,整体和成层结构拱冠梁处均方差均随着坝体的升高而增大,同时两种结构均方差的差值也增大。成层结构位移均方差始终大于整体结构,最大差值出现在坝顶位置,约为 103 μm,占整体结构均方差的 19.4%。在荷载一作用下,两种结构拱冠梁处动位移均方差的变化趋势相同,而均方差差值却是先增大后减小,最后在坝顶位置基本趋于一致。但两种结构位移均方差的差值并不大,最大差值出现在坝高 160 m 处,差值约为 26 μm,占整体结构均方差的 7.4%。

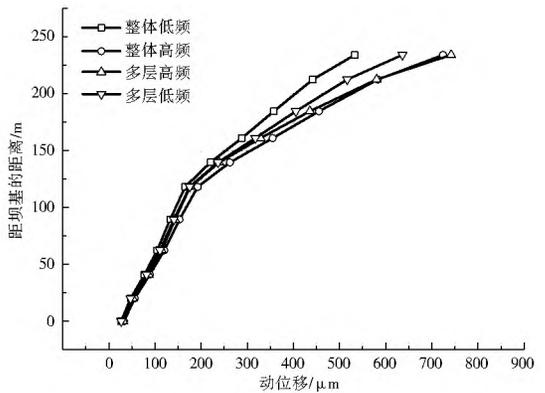


图 10 拱冠梁处动位移均方差

Fig. 10 Standard deviation of dynamic displacement of crown cantilever

由此可见,拱坝成层结构动位移及动应力均方差均大于混凝土整体结构,而高频荷载作用下成层结构响应不及整体结构灵敏。

3.2 泄流荷载与振动响应之间的关系

本文主要研究不同频谱特性泄流荷载与结构振动响应之间的关系。如图 8 所示,结构在荷载一作用下动位移均方差明显大于荷载二,最大值出现在拱冠梁顶端。整体结构均方差的 35.9%;成层结构为 105 μm,约占荷载二作用下动位移均方差的 16.5%。

又分别见图 9-图 10,高频荷载作用下结构动应力均方差明显大于低频荷载作用,在坝高 160 m 处测点动应力均方

差出现最大值。整体结构均方差的最大差值为 8.58 KPa, 约占低频荷载作用下动位移均方差的 98.4%, 均方差增大了近一倍; 而成层结构最大差值为 7.21 KPa, 约占低频荷载作用下动位移均方差的 61.9%, 均方差也增大了 0.6 倍左右。在拱冠梁处结构的动位移均方差也均有所增加, 在拱冠梁顶端达到最大, 整体结构增大了 35.9%, 成层结构增大了 16.6%。

综合以上分析结果可知, 同一结构在相同幅值、不同频谱特性的荷载作用下, 振动特性存在如此大的差距, 很有可能是结构在高频荷载激励下产生了水力共振现象。

4 泄流荷载作用下成层结构振动特性

在坝顶拱圈自右岸至左岸依次布置 B1 至 B7 共 7 个测点, 拱冠梁方向自上而下依次布置 B8 至 B12 共 5 个测点, 测点布置见图 7。

4.1 拱坝坝顶拱圈测点的振动现象

工况 2 条件下, 结构仅在 2.1 Hz 处存在一明显峰值, 根据拍振的形成机理, 该测点不具备形成拍振的条件, 在时程曲线上表现为随机振动的形式, 振动曲线并未出现“拍”现象。

图 11 为工况 4 条件下坝顶拱圈典型测点时程曲线, 从图中可知 B3 测点表现出较为明显的“拍”现象; 而拱圈上 B1 测点靠近坝肩, 受力条件复杂, 由于测点基本位于各阶振型的节点处, 振动量较小(图 12)。如图 13, B1 测点以拱坝的前四阶工作频率振动; 由模态识别结果知, 前四阶频率分别为 2.20 Hz、2.35 Hz、3.56 Hz 和 3.72 Hz, 频率比不符合式(7)给出的拍振形成条件, 故此节点并未表现出较为明显的“拍”现象。

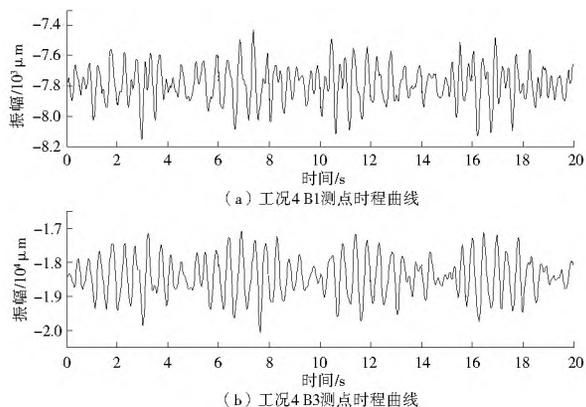


图 11 工况 4 条件下坝顶拱圈典型测点时程曲线

Fig. 11 Time history curve of typical measuring point on the top of dam under working condition 4

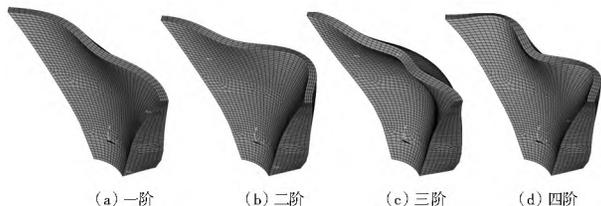


图 12 坝体前四阶振型图

Fig. 12 First four orders of vibration modes of arch dam

相对于 B1、B7 测点来讲, B2 至 B3、B5 至 B6 测点振动曲线的“拍”现象则较为明显。应用 AR 谱分析方法求出波形

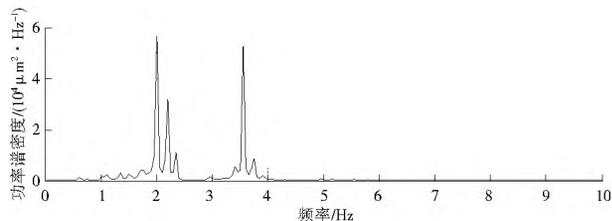


图 13 工况 4 条件下 B1 测点频谱

Fig. 13 Power spectrum of measuring point B1 under working condition 4

的功率谱密度曲线, 以 B3 测点为例(图 14), 可知在 2.0 Hz、2.20 Hz 及 2.35 Hz 处存在三个明显的峰值。结合荷载一的频谱特性及有限元识别结果可知, 2.0 Hz 处实为泄流荷载作用而至, 而 2.20 Hz 和 2.35 Hz 处为成层结构第一、二阶固有频率。由此可知, 振动曲线满足式(7)所要求的拍振形成条件, 表现为明显的拍振现象。

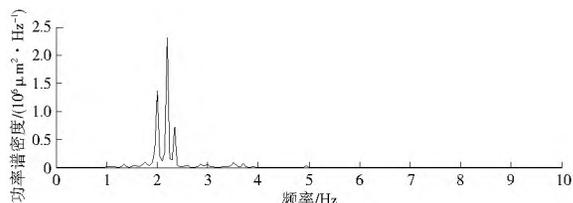


图 14 工况 4 条件下 B3 测点频谱

Fig. 14 Power spectrum of measuring point B3 under working condition 4

4.2 拱坝拱冠梁测点的振动现象

拱坝拱冠梁处由上而下依次布置 B4 及 B8 至 B12 共 6 个测点, 其典型测点时程曲线见图 15。可以看出 B4、B8 测点表现出较为明显的“拍”现象, 其余测点则随着位置距坝顶距离的增大, “拍”现象愈加不明显, B12 测点振动曲线则完全看不出“拍”现象的存在。

B4 测点主要以拱坝的第一阶固有频率振动, 并包含微弱的第三阶振动成分(图 16)。其振动曲线虽然表现为“拍”的形式, 但其振动的实质是水流荷载激励下其瞬时频率与结构一阶固有频率接近或重合时所发生的“水力共振”现象^[9]。

B8 测点虽处于拱冠梁位置处, 但并未处于其顶端, 从频谱图也可以看出 B8 测点以结构前两阶固有频率振动, 频率比符合式(7)所提出的拍振形成条件, 其振动体现为明显的拍振现象。

B9 测点以下各测点处振动量逐渐减小, 约束条件愈加复杂。如 B10 测点振动不能满足式(7)提出的拍振形成条件, 振动曲线看不出“拍”现象(图 17)。

5 结论

本文研究了整体与成层两种不同结构在泄流荷载作用下结构的响应特性, 又结合“拍”的概念, 对混凝土成层结构振动响应特性与泄流荷载之间的关系进行分析, 得出以下结论。

(1) 在泄流荷载作用下, 混凝土成层结构的振动响应大于混凝土整体结构; 成层结构在荷载一、二分别作用下, 振动响应变化量不及整体结构, 表明不同结构在不同泄流荷载作用下反应的灵敏度不同, 成层结构对不同频谱特性的荷载反应不及整体结构灵敏。

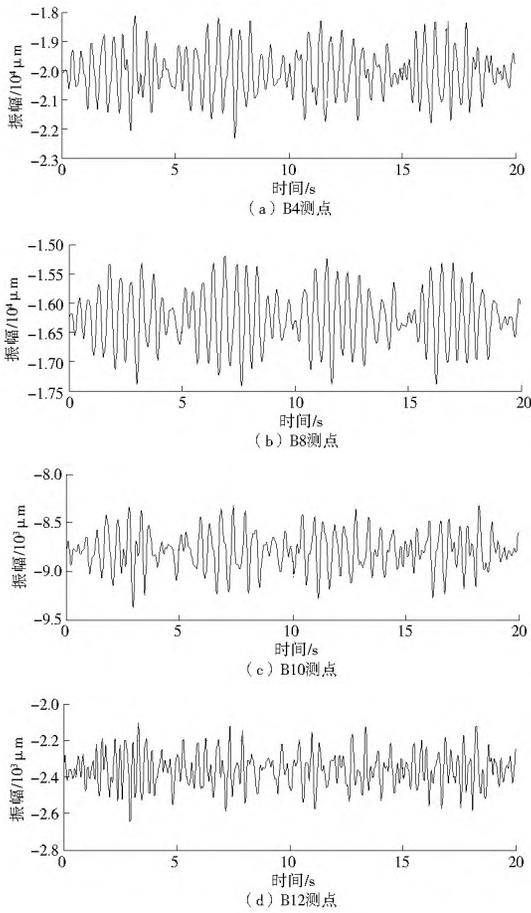


图 15 工况 4 条件下拱冠梁典型测点时程曲线
Fig. 15 Time history curve of typical measuring point on the crown cantilever under working condition 4

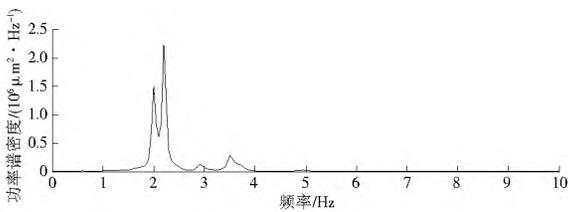


图 16 工况 4 条件下 B4 测点频谱
Fig. 16 Power spectrum of measuring point B4 under working condition 4

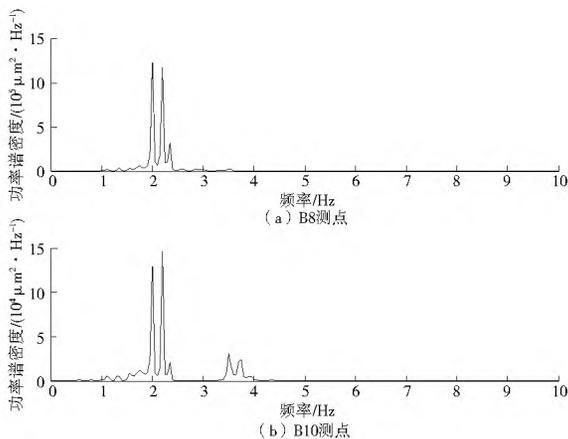


图 17 工况 4 条件下 B8 与 B10 测点时程曲线
Fig. 17 Power spectrum of measuring points B8 and B10 under working condition 4

(2) 在泄流荷载作用下结构主振型方向, 当结构前 n 阶频率 f_1 至 f_n 位于荷载主频带范围内时, 荷载将激发结构前 n 阶频率产生共振, 流激振动响应可能存在以下几种形式: 1 当 $n=0$ 时, 结构无低阶频率处于水流荷载主频带以内, 结构在泄流荷载作用下做随机振动, 振动能同时体现出荷载特性及结构第一阶的振动特性, 但并未产生共振; 2 当 $n=1$ 时, 结构只有一个低阶频率位于泄流荷载的主频带以内, 在荷载作用下以该低阶频率做随机共振, 响应不满足拍振的形成条件, 但体现为水力拍振的形式, 其功率谱曲线会在该频率处存在明显的峰值; 3 当 $n \geq 2$ 时, 结构存在两个或以上低阶频率位于泄流荷载的主频带内, 若 f_1 至 f_n 两两之间的频率比满足 $0.85 \leq \alpha \leq 1.18$ 的要求, 结构各阶自振响应将互相叠加, 形成拍振, 其响应也体现为水力拍振现象; 若不满足, 结构各阶自振响应叠加后不会形成拍振, 其响应体现为不明显或不出现水力拍振现象。

(3) 无论是水力共振或是拍振, 均会加剧结构的振动, 在泄流荷载的长期作用下, 可能使结构出现疲劳破坏。在现实工程中应调整泄流方式, 避免水力共振或拍振的发生。

参考文献(References):

[1] 练继建, 马斌, 李福田. 大坝流激振动响应的反分析方法[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 575-581. (LIAN Ji-jian, MA Bin, LI Fu-tian. Back analysis algorithm for response of flow-induced vibration in overflow high dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 575-581. (in Chinese))

[2] 杨敏, 崔广涛. 水工结构流激振动的综合集成探讨[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 102-110. (YANG Min, CUI Guang-tao. Synthetic discussion on flow-induced vibration of hydraulic structures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 102-110. (in Chinese))

[3] 阎诗武, 骆少泽, 陈发展. 飞来峡溢流坝结构流激振动[J]. 水利水运科学研究, 1997(3): 228-236. (YAN Shi-wu, LUO Shao-ze, CHEN Fa-zhan. Flow-induced vibration of feilaixia spillway dam structure[J]. Hydro science and Engineering, 1997(3): 228-236. (in Chinese))

[4] 沈崇刚. 中国碾压混凝土坝的发展成就与前景(上)[J]. 贵州水力发电, 2002, 16(2): F7. (SHEN Chong-gang. Achievement & Prospects of rolled compaction concrete dam in China (first half)[J]. Guizhou Water Power. 2002, 16(2): F7. (in Chinese))

[5] Naudascher E. Flow induced loading and vibration of gates in proc int symp on hydr for high dams [C]. Beijing, Invited Lecture, 1988: 1-18.

[6] 李成业. 泄流结构水力拍振机理及动态健康监测技术研究[D]. 天津大学, 2013. (LI Cheng-ye. Research on hydraulic beat mechanism and dynamic health monitoring method of flood discharge structures[D]. Tianjin University, 2013. (in Chinese))

[7] 韩军, 高德平, 胡绚, 等. 韩军航空发动机双转子系统的拍振分析[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1370-1373. (HAN Jun, GAO De-ping, HU Xuan, et al. Research on beat vibration of dual rotor for aero engine[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1370-1373. (in Chinese))

[8] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003. (YING Hua-qiao. Analysis of waveform and spectrum and random data processing [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese))

(下转第 521 页)

顺畅,无明显的漩涡及涡带产生。

4 结语

本文利用两种类型、三种翼型形成 8 种不同叶片,通过 CFD 软件对 8 种叶片的水轮机分别进行三维数值模拟计算,分析了这些水轮机的效率、出力和转轮叶片表面静压分布情况,得到一种综合表现较优的潮流能水轮机。水轮机流道内部水流流态良好,流线平滑,无回流、局部漩涡等不良流态。模拟结果表明,叶尖采用对称的 NACA 63212 翼型及叶根采用弯度较大的 NACA 6409 翼型形成的两种类型叶片均在同类型叶片中水力性能表现最好。

参考文献(References):

- [1] 王树杰. 柔性叶片潮流能水轮机水动力学性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (WANG Shu jie. Study on hydrodynamic performances of a tidal current energy conversion device with flexible blade turbine[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [2] 崔民选. 中国能源发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2007. (CUI Min xuan. Development report on China's energy[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 李德顺. 水平轴风力机专用翼型的空气动力学性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008: 32-46. (LI De shun. Investigation of aerodynamic performance of special airfoils for horizontal axis wind turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008: 32-46. (in Chinese))
- [4] 岑美, 李龙, 李健. 基于 FLUENT 分析弯度对翼型性能的影响[J]. 中国农村水利水电, 2008, 09: 128-130+133. (CEN Mei, LI Long, LI Jian. Analysis of the influence of airfoil's camber on the performance based on FLUENT[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, 09: 128-130+133. (in Chinese))
- [5] Walter P. Wolfe, Stuart S. Ochs. CFD calculations of S809 aerodynamic characteristics. AIAA Paper 97-0973: F8
- [6] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004, 9. (QIAN Yi ji. Aerodynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004, 9. (in Chinese))

- [7] 王惠民, 赵振兴. 工程流体力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004: 45-64. (WANG Hu i min, ZHAO Zhen xing. Engineering fluid mechanics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004: 45-64. (in Chinese))
- [8] 王惠民. 流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (WANG Hu i min. Hydromechanics basis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 李文华, 苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 水泵技术, 2006(04): 39-40+31. (LI Wen hua, SU Ming jun. Common turbulence model and its application on FLUENT[J]. Pump Technology, 2006(04): 39-40+31. (in Chinese))
- [10] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Fu jun. Computational fluid dynamics analysis principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [11] 马舜, 李伟, 刘宏伟, 等. 水平轴潮流能发电系统能量捕获机构研究[J]. 机械工程学报, 2010(18): 150-156. (MA Shun, LI Wei, LIU Hong wei et al. Research on the energy capture device of horizontal axis tidal current energy conversion systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(18): 150-156)
- [12] 袁金雄. 基于 Fluent 的潮流能提取水动力影响数值研究[J]. 人民黄河, 2013(02): 125-127. (YUAN Jin xiong. Numerical study on hydrodynamic impact of tidal current energy extraction based on software of fluent[J]. Yellow River, 2013(02): 125-127. (in Chinese))
- [13] 康海贵, 郭伟. 竖轴水轮机三维水动力响应的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2013(03): 537-541. (KANG Hai gui, GUO Wei. Three dimensional numerical simulation for hydrodynamic response of vertical axis tidal current turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013(03): 537-541. (in Chinese))
- [14] 刘胜柱. 水轮机内部流动分析与性能优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (LIU Sheng zhu. Flow field analysis and hydraulic performance optimization for hydraulic turbine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [15] 刘德民, 程宦, 袁凌丽. 潮流能水轮机水力特性研究[J]. 东方电机, 2013(6): 9-12. (LIU De min, CHENG Huan, YUAN Ling li. Analysis on hydraulic characteristics of tidal current energy turbine[J]. Dongfang Electrical Machine, 2013(6): 9-12. (in Chinese))

(上接第 481 页)

- [9] 苏未安, 陈秀洪. 用旋转矢量法研究“拍”现象[J]. 江西理工大学学报, 2009, 30(1): 60-63. (SU Wei an, CHEN Xiuhong. Study on “beat” phenomenon with the method of rotating vector[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2009, 30(1): 60-63. (in Chinese))
- [10] 王永涛, 臧勇, 吴迪平等. CSP 轧机扭振中“伪拍振”的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 210-213. (WANG Yong tao, ZANG Yong, WU Di ping, et al. Fake beating vibration in main driving torsion of CSP mill[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 210-213. (in Chinese))
- [11] 周康巍. 拍现象与外差变频的区别[J]. 大学物理, 1983, (5): 1-4. (ZHOU Kang wei. The difference between the beat phenomenon and heterodyne frequency[J]. DaXue WuLi, 1983, (5): 1-4. (in Chinese))
- [12] 练继建, 李成业, 刘昉, 等. 环境激励下二滩拱坝拍振机理研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): F7. (LIAN Ji jian, LI Cheng ye, LIU Fang, et al. Beat vibration of earth arch dam under ambient excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,

- 31(3): F7. (in Chinese))
- [13] 练继建, 崔广涛, 黄锦林. 导墙结构的流激振动研究[J]. 水利学报, 1998, (11): 33-37. (LIAN Ji jian, CUI Guang tao, HUANG Jin lin. Study on flow induced vibration of spillway guide wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (11): 33-37. (in Chinese))
- [14] 徐国宾, 尹伟波, 练继建, 等. 糯扎渡水电站溢流道泄槽流激振动试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 24-27. (XU Guo bin, YIN Wei bo, LIAN Ji jian, et al. Experimental study on flow-induced vibration in spillway chute of Nuozhadu hydropower station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 24-27. (in Chinese))
- [15] 崔广涛, 安刚, 李军. 低水头大流量溢流坝系统水激振动研究[J]. 水利学报, 1994, (1): 10-18. (CUI Guang tao, An Gang, LI Jun. Flow-induced vibration of low head and large discharge overflow dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (1): 10-18. (in Chinese))