

泄洪闸闸墩原型振动测试、预测与安全评价*

李火坤^{1,2}, 杨敏², 陈林², 何小敏²

(1. 南昌大学建筑工程学院 南昌, 330031) (2. 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 针对某一大型水电站泄洪闸闸墩在其泄洪过程中出现的强烈振动情况, 系统地开展了闸墩原型振动测试、振动响应数值模拟预测与运行安全评价研究。首先, 对常遇洪水工况下的泄洪闸闸墩进行了原型振动测试, 提取了闸墩结构在不同运行工况下的泄洪振动时域和频域特征; 其次, 基于重力相似准则, 研制了闸墩整体水力学荷载测试模型, 对非常洪水工况和常遇洪水工况下闸墩的整体水动力荷载进行了测试, 分析了不同洪水工况下的整体水动力荷载特性; 然后, 以模型试验所获取的整体水动力荷载时程线作为输入, 进行了闸墩振动响应数值模拟计算, 与原型观测工况结果进行了对比验证, 并对非常洪水工况下闸墩的最大振动响应进行了预测; 最后, 对闸墩的泄洪振动进行了安全评价。结果表明, 泄洪闸闸墩过大的振幅使其产生疲劳破坏的可能性很大, 且不利于运行人员的正常操作, 建议对闸墩进行抗振加固。

关键词 闸墩; 原型振动测试; 水力学试验; 数值预测; 安全评价

中图分类号 TV652; TV662

引言

泄流结构是保障水利枢纽工程安全泄洪的重要水工建筑物。在泄水过程中由于水流的强烈紊动一般都存在振动, 当振动限制在一定范围时, 通常是无害的; 但在某些条件下, 泄流结构会出现剧烈振动, 导致结构变形过大无法正常操作或致使运行人员恐惧及结构整体失事等。特别是部分轻型泄流结构在长期的水流动力荷载作用下, 常导致疲劳破坏引起工程事故。国内外已经发现多起闸墩或隔水墙破坏和强烈振动的工程实例^[1-2]。闸墩或导墙这种轻型薄壁结构受到脉动压力的交变作用, 常导致结构物的强烈振动甚至疲劳破坏, 严重影响枢纽工程安全和正常运行, 正确评估在役泄洪闸闸墩或导墙结构的振动安全具有重要应用价值。文献[3]基于水弹性模型实验与数值模拟计算, 提出了导墙结构特征与流激振动安全性的关系。文献[4]对三峡左导墙进行了原型振动测试与动态识别, 并对其泄洪振动安全进行了评估。文献[5-6]以环境激励作为激励源, 对震后的拦河闸和地下厂房进行了动态检测, 并基于模态参数识别结果进行了整体结构安全评估。文献[7-8]基于泄流振动响应和模态参数识别结果,

采用支持向量基方法对导墙结构进行了损伤诊断与安全评估。

笔者以某一大型水电站泄洪闸为工程实例, 针对其运行过程中出现的强烈振动并严重影响工程正常运行这一实际情况, 对闸墩进行了连续原型振动测试, 并通过数值模拟计算对其非常洪水工况下的振动响应进行了预测, 对闸墩的运行安全进行了评估。

1 工程概况及其振动问题描述

某大型水电站枢纽泄洪建筑物布置于枢纽右岸, 由5孔泄洪闸组成, 从左至右排列依次为1#~5#, 其中5#孔为航运兼泄洪闸使用。泄洪闸孔口尺寸为13 m×23.80 m(宽×高), 堰顶高程193.50 m, 堰型为宽顶堰, 由上游圆弧、堰顶水平段、抛物线段、斜坡段、反弧段组成, 堰面通过反弧段与消力池底板相接; 堰上设13 m×23.5 m的平板检修门和弧形工作门各一道, 弧门支铰高程为217.6 m, 弧门半径为32.0 m。闸室沿水流方向长54.0 m, 闸墩为预应力闸墩; 1#孔左闸墩为满足施工期导流需要, 闸墩与纵向导墙结合设计, 顶部厚14 m(其中4.5 m厚为预应力结构), 其余闸墩厚均

* 国家自然科学基金资助项目(51269019, 51469015, 50909049); 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放研究项目(201206); 江西省教育厅科技项目(GJJ12030); 江西省水利厅科技资助项目(KT201234)
收稿日期: 2013-10-07; 修回日期: 2013-12-27

为 4.5 m。泄洪闸按百年一遇洪水设计($Q=30\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$),千年一遇洪水校核($Q=38\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$),泄洪闸布置及典型闸室剖面图如图 1,2 所示。

该水电站枢纽工程于 2010 年年底基本完工,2011 年洪水期间连续经历了几场大洪水(最大洪水流量约 $24\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$),运行工作人员现场巡视检查发现泄洪闸闸墩顶部出现强烈侧向振动现象(所

观察到的明显振动部位为泄洪闸坝段分缝处),振动频率较低,幅度较大,且越靠近下游,振感越强烈,据现场人员肉眼观察幅度为数毫米级(即双倍振幅),已影响正常运行。为确保今后泄洪闸安全使用及电站正常运行,需尽快掌握振动对闸墩及泄洪闸安全的影响,为工程运行调度和抗振加固提供参考依据。

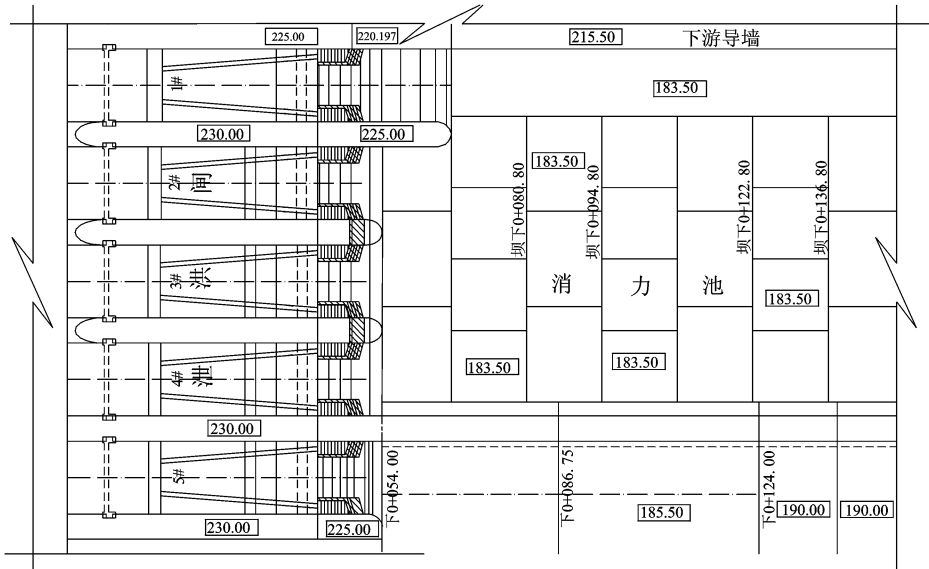


图 1 泄洪闸平面布置图(单位:m)

Fig. 1 Sluice layout(unit: m)

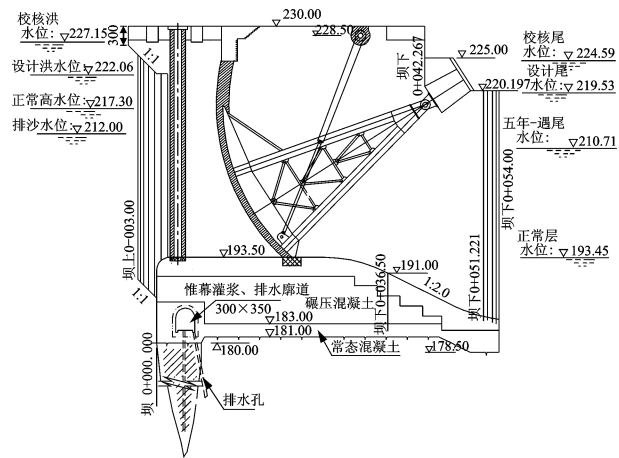


图 2 泄洪闸典型剖面图(单位:m)

Fig. 2 Typical section plan of sluice(unit: m)

2 闸墩原型振动测试与特征分析

2.1 测点布置与测试工况

据现场运行人员描述,2#泄洪孔闸墩振动最为剧烈,故本次测试选择该孔的左、右闸墩作为原型振

动测试对象。振动测试传感器采用清华大学研制的 DP 型地震低频动位移传感器,频响范围 0.5~200 Hz,灵敏度为 5 mV/m,采样频率为 50 Hz。动位移测点布置于左、右闸墩顶部,测试方向为水平向(即侧向),左右闸墩共布置 10 个动位移传感器,其中 $H_1 \sim H_6$ 号测点位于左闸墩, $H_7 \sim H_{10}$ 号测点位于右闸墩,各测点相对位置及相对坐标如图 3 所示,测试工况如表 1 所示。

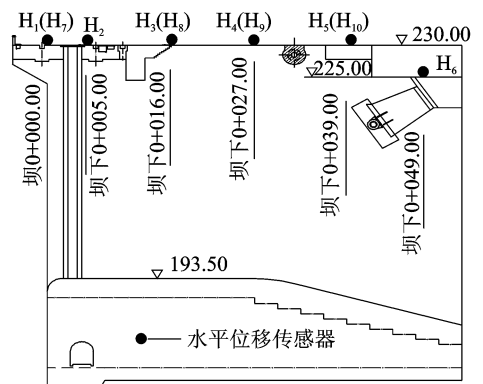


图 3 2#泄洪孔闸墩测点布置(单位:m)

Fig. 3 Measuring point arrangement of 2# sluice(unit: m)

表 1 泄洪闸原型观测工况
Tab. 1 Sluice prototype observation condition

工况	库水位/m	下游水位/m	出库流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	闸门开度/m				
				1#孔	2#孔	3#孔	4#孔	5#孔
1	216.15	202.19	7 397.00	全开	闭	全开	闭	闭
2	216.08	202.23	7 278.60	全开	20%(4.7)	全开	闭	闭
3	216.02	202.27	7 160.20	全开	40%(9.4)	全开	闭	闭
4	215.96	202.31	7041.80	全开	60%(14.1)	全开	闭	闭
5	215.89	202.35	6 923.40	全开	80%(18.8)	全开	闭	闭
6	215.83	202.39	6 805.00	全开	100%(23.5)	全开	闭	闭
7	215.76	202.41	6 732.25	20%(4.7)	100%(23.5)	10.591	全开	闭
8	215.70	202.44	6 753.00	20%(4.7)	80%(18.8)	10.591	全开	闭
9	215.78	202.39	6 773.75	20%(4.7)	60%(14.1)	10.591	全开	闭
10	215.86	202.34	6 794.5	20%(4.7)	40%(9.4)	10.591	全开	闭
11	215.94	202.29	6 815.25	20%(4.7)	20%(4.7)	10.591	全开	闭
12	216.02	202.25	6 836.00	20%(4.7)	0(0)	10.591	全开	闭
13	216.09	201.73	6 799.00	(10)	全开	闭	全开	闭
14	215.83	201.91	6 698	(10)	全开	20%(4.7)	全开	闭
15	215.57	202.09	6 597	(10)	全开	40%(9.4)	全开	闭
16	215.31	202.27	6 496	(10)	全开	60%(14.1)	全开	闭
17	215.05	202.45	6 395	(10)	全开	80%(18.8)	全开	闭
18	214.83	202.47	6 366.20	(10)	全开	80%(18.8)	全开	闭
19	214.87	202.32	6 351.80	(10)	全开	60%(14.1)	全开	闭
20	214.91	202.17	6 337.40	(10)	全开	40%(9.4)	全开	闭
21	214.93	202.02	6 323	(10)	全开	20%(4.7)	全开	闭
22	214.94	202.01	6 323	(10)	全开	闭	全开	闭

表中闸门开度一栏中括号内数值为绝对开度(单位为 m),百分数为其相对应的相对开度

2.2 闸墩动态响应的时域、频域特征

2.2.1 幅值域特征

闸墩泄洪振动响应可视为各态历经的平稳随机过程,可采用随机分析方法分析动位移响应时域信号特征,主要幅值特征指标为动位移均方差和双倍振幅。对表 1 中的 22 种测试工况所采集的闸墩动位移响应信号进行统计分析,闸墩振动位移均方差和双倍振幅随工况变化如图 4~7 所示。由图中统

计结果可见:

1) 对于调节 2#泄洪孔闸门开度的测试工况 1~12,左、右闸墩振动动位移的均方差和双倍振幅具有先增大后减小的趋势,闸墩在工况 10 振动最为剧烈(动位移均方差和双倍振幅均达到最大值);左闸墩最大动位移均方差和双倍振幅出现在闸墩 H₆ 号测点位置,其值分别为 105.4 和 675.6 μm;右闸墩最大动位移均方差和双倍振幅出现在闸墩 H₁₀ 号测点位置,其值分别为 89.8 和 588.3 μm。

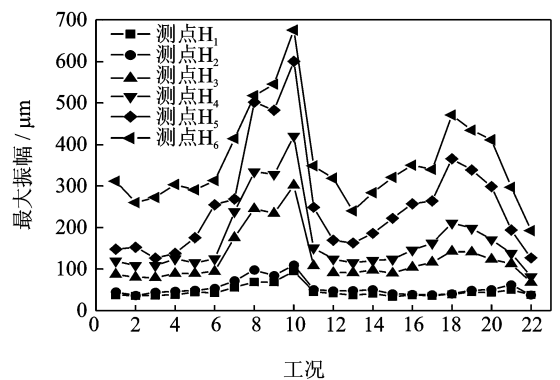
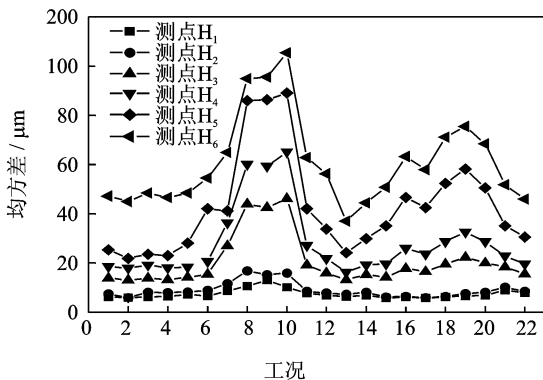


图 4 左闸墩 H₁~H₆ 测点各工况下动位移均方差

图 5 左闸墩 H₁~H₆ 测点各工况下双倍振幅

Fig. 4 Dynamic displacement mean square of point H₁-H₆

Fig. 5 Double vibration amplitude of point H₁-H₆

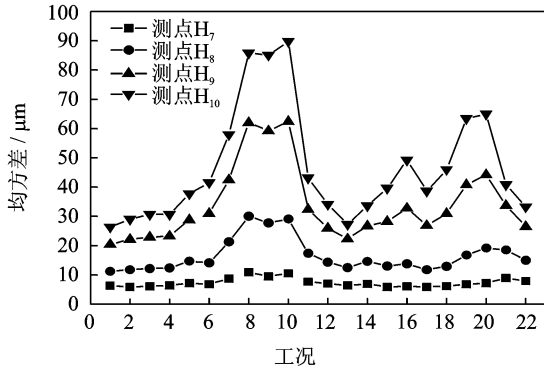


图 6 右闸墩 H₇~H₁₀ 测点各工况下动位移均方差

Fig. 6 Dynamic displacement mean square of point H₇-H₁₀

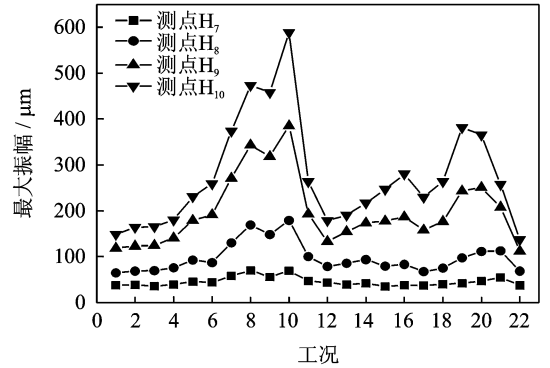


图 7 右闸墩 H₇~H₁₀ 测点各工况下双倍振幅

Fig. 7 Double vibration amplitude of point H₇-H₁₀

2) 对于调节 3#泄洪孔闸门开度的测试工况 13~22,左、右闸墩动位移均方差和双倍振幅也表现出增大后减小的趋势;左闸墩动位移均方差最大值出现在工况 19 的 H₆ 号测点,其值为 75.5 μm,双倍振幅最大值出现在工况 18 的 H₆ 号测点,其值为 471 μm;右闸墩动位移均方差最大值出现在工况 20 的 H₁₀ 号测点,其值为 64.9 μm,双倍振幅最大值出现在工况 19 的 H₁₀ 号测点,其值为 381.5 μm。

3) 左、右闸墩顶部动位移均方差和双倍振幅沿水流向逐渐增大,如图 8 所示,该分布特征与运行人员所描述“越靠近下游侧,振感越强烈”一致。此外,从各测试工况下闸门关闭和开启过程与振动强度之间的关系可知,2#孔和 3#孔闸门关闭过程时闸墩的振动强度较开启过程大。

4) 从泄洪闸闸墩结构特征来看,下游侧闸墩与闸墩之间未有横向连接系,相对于上游侧闸墩(闸墩之间有工作桥及轨道梁产生的阻尼效应)而言,振动较上游侧大;此外,从现场测试所观察到的闸墩泄流情况看,闸墩下游侧产生淹没式水跃,水流紊动剧烈,也加大了闸墩的振动。

2.2.2 频域特征

频域特征分析主要是确定闸墩振动响应频率成

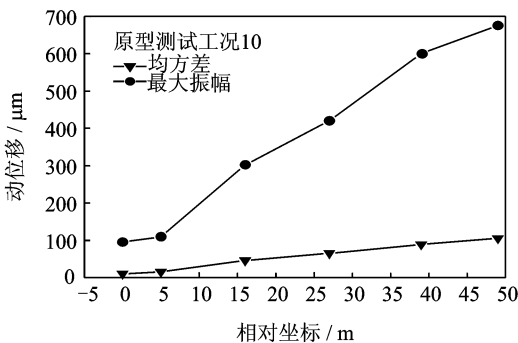
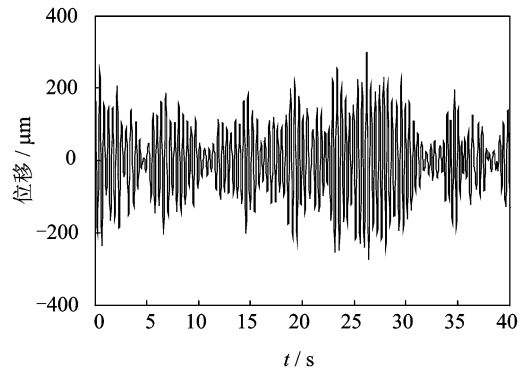


图 8 2#孔左闸墩 H₁-H₆ 测点动位移水流向分布

Fig. 8 Measure point H₁-H₆ dynamic displacement distribution of 2# left sluice in the flow direction

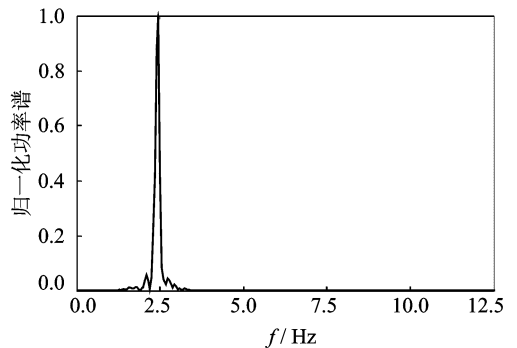
份以及的各频带能量分布情况,限于篇幅,仅给出 H₆ 测点在工况 10 下的动位移时程线及其归一化功率谱密度曲线,如图 9 所示。

从其功率谱密度看,闸墩振动主频为 2.41 Hz,由于该频率成份能量较大,致使其他结构频率成份在功率谱密度图中被淹没,单从功率谱密度图上无法确定其主要频率成份,需借助更精确的模态参数识别技术。基于频率分解法^[5](frequency domain decomposition,简称 FDD 法)选择测试工况 10 下



(a) 动位移时程线

(a) Dynamic displacement time sequence



(b) 归一化功率谱密度

(b) Normalized PSD curve

图 9 典型测点动位移时程线及其归一化功率谱密度

Fig. 9 Dynamic displacement time-sequence of typical measure point and its PSD curve

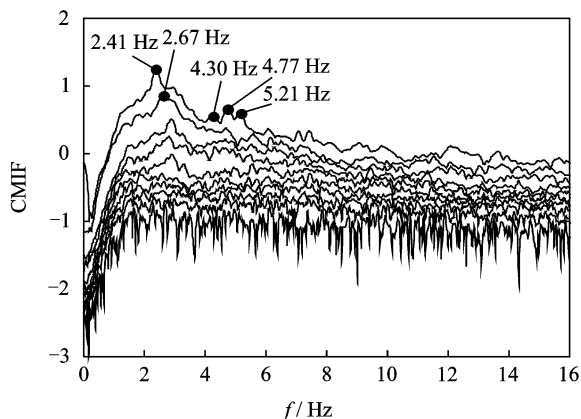


图 10 CMIF 指示函数

Fig. 11 CMIF indicator function

的 $H_1 \sim H_{10}$ 测点动位移响应信号进行闸墩结构整体模态识别,得到表征闸墩结构模态特征参数 CMIF 指示函数,如图 10 所示。从识别结果看,闸墩被激发出 5 阶模态,其主要振动频率分别为 2.41, 2.67, 4.30, 4.77 和 5.21 Hz。对闸墩实测振动响应的时程线、功率谱密度和模态识别结果进行综合分析发现,该闸墩结构的前两阶工作频率非常接近,相应的第 1 阶振型为闸墩整体侧向振动,第 2 阶振型为闸墩整体侧向扭振(即闸墩首部与尾部振动反相),水流脉动荷载的能量主要激发了闸墩结构前两阶振动,且该两阶振动还具备合成拍振的条件,使得闸墩的振动响应时程线表现为拍振的形式,该振动特征与测试现场人体所感觉振动“时大时小”的特征较为相符。

3 非常洪水工况下闸墩的泄洪振动响应数值模拟预测

本次原型观测的洪水流量为 $6\,300 \sim 7\,400 \text{ m}^3/\text{s}$, 小于该泄洪闸之前曾遭遇的最大洪水。由于水文条件限制,非常洪水工况难以遇见,采用模型试验测量非常洪水工况下作用于闸墩上的整体水动力荷载,并以此作为荷载输入进行闸墩泄洪振动响应数值模拟计算,预测可能的最大振动响应,仍是较为可靠的方法。

3.1 闸墩整体水动力荷载模型试验

3.1.1 水动力学条件相似

“动荷载”输入系统相似的实质是水力学模型中脉动压力相似律问题。目前对脉动压力相似律的认识还不统一,有的认为符合重力相似律,即振幅按佛

汝德准则引伸,频率按斯特鲁哈准则引伸,也有的认为不符合重力相似定律。然而,大量的研究表明^[9-11],由整体边界或水流条件急剧变化引起的水流分离或扩散所导致的边壁压力脉动,主要是受低频大尺度涡旋运动控制,在雷诺数足够大的模型中大尺度涡旋运动能够得到较好的模拟,脉动压力可按重力相似定律引伸到原型。闸墩泄洪振动振源主要为底流消能区脉动压力,属急变强分离、掺混型水流,因而本试验按重力相似律来设计模型。根据重力相似准则推导出各水力学要素的相似比尺分别为:流速比尺 $\lambda_v = \lambda_L^{0.5}$;时间比尺 $\lambda_T = \lambda_L^{0.5}$;流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$;加速度比尺 $\lambda_a = 1$;脉动流速比尺 $\lambda_{v'} = \lambda_L^{0.5}$;力比尺 $\lambda_F = \lambda_L^3$;压强比尺 $\lambda_P = \lambda_L$;脉动频率比尺 $\lambda_f = \lambda_L^{-0.5}$;脉动压强比尺 $\lambda_{P'} = \lambda_L$,其中 λ_L 为模型几何比尺。

3.1.2 泄洪闸墩整体水动力荷载测试方法

闸墩整体水动力荷载(即整体面荷载)无法在原型观测中测得,模型试验仍是获取闸墩整体面荷载的最有效方法,且可以避免脉动压力幅值和频谱的点-面转换问题。

整体水动力荷载测试模型采用有机玻璃制作,模型比尺为 $1:100$ 。考虑到沿水流方向闸墩受力的不均匀,沿水流向将整个闸墩模型分为 3 段同步测量整体水动力荷载。每段用 2 个面压力盒支撑,面压力盒承压面(该承压面也即有机玻璃制作的闸墩)的面积与一个闸墩段的面积相同,承压面仅由两个力传感器支撑。除此之外承压面不得承受其他约束,受测段两侧承压面的动水压力传至两个传感器,进而测出受测段的整体动水荷载,将 2 个力时间过程合成可求得各段的整体动水荷载时间过程。闸墩各段力传感器布置相对坐标(桩号)换算到原型分别为 $0+7 \text{ m}$, $0+26 \text{ m}$, $0+45 \text{ m}$,测量原理如图 11 所示;整体水动力荷载测试模型采用 INV618 智能动态测试与采集分析系统,采样频率为 50 Hz,试验前,整个测量系统在静水中标定,去除浮力影响。

3.1.3 测试工况与结果分析

整体荷载测试主要选择非常洪水工况,同时为了使数值计算模型结果能与原观结果进行对比,以验证数值模拟计算的可靠性,试验增加了与原型观测工况 6 相近的试验工况 5,如表 2 所示。对各试验工况闸墩整体面荷载最大值、均方差进行统计分析,限于篇幅仅给出 2 号孔左闸墩试验结果,如图 12,13 所示。从整体荷载试验结果看:a. 各试验工况的整体荷载最大值(整体荷载时均值+3 倍整体荷载均方差),即最大瞬时水平推力出现在校核工况的左闸墩桩号 $0+26 \text{ m}$ 处,最大值为 623.7 t,其他

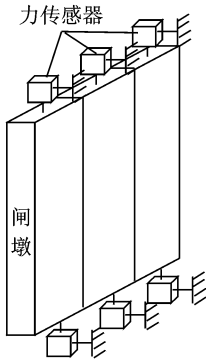


图 11 整体荷载测试原理示意图

Fig. 11 Sketch map of the whole load measurement

表 2 整体面荷载测量试验工况

Tab. 2 Model test conditions of whole load test

试验工况	1(校核洪水)	2(设计洪水)	3(20年一遇洪水)	4(5年一遇洪水)	5(常遇洪水)
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	Q=38 100	Q=30 000	Q=23 100	Q=16 900	Q=5 987
上游水位/m	227.15	222.05	217.57	212.88	214.25
下游水位/m	224.20	219.00	214.60	210.40	201.80
备注	五孔闸全开	五孔闸全开	五孔闸全开	五孔闸全开	五孔闸全开

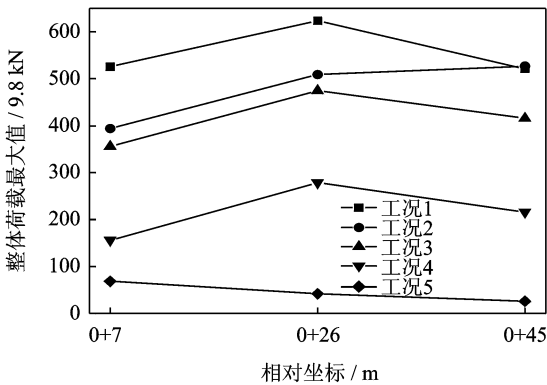


图 12 左闸墩整体荷载最大值

Fig. 12 The maximum whole load of left pier

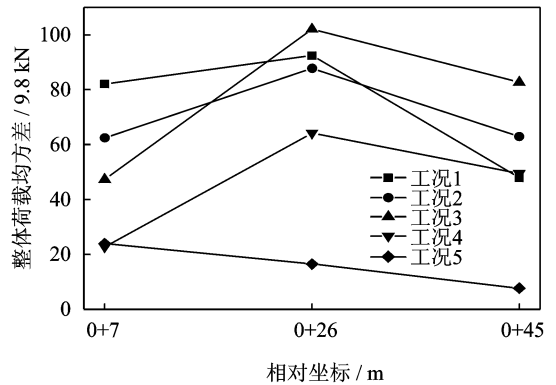


图 13 左闸墩整体荷载均方差

Fig. 13 The whole load root mean square of left pier

3.2 闸墩泄洪振动响应的数值模拟预测

泄洪闸数值模型通过 ANSYS 进行精细化建模,采用 SOLID45 实体单元模拟闸墩混凝土结构、门机轨道梁及地基, LINK8 单元模拟预应力锚索。闸墩数值模型材料参数:钢筋混凝土重度 $\gamma=24.50 \text{ kN/m}^3$,混凝土重度 $\gamma=24.0 \text{ kN/m}^3$,地基重度 $\gamma=27.90 \text{ kN/m}^3$,预应力锚索重度 $\gamma=78.5 \text{ kN/m}^3$;底板 C25 混凝土弹模 $E=2.80 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\mu=0.167$;闸墩 C30 混凝土弹模 $E=3.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\mu=0.167$;牛腿 C40 混凝土弹模 $E=3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\mu=0.167$;预应力锚索弹模 $E=1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\mu=0.27$;地基

工况的瞬时水平推力为 20~530 t 量级;b. 试验工况 1~4 的整体荷载最大值较大,主要是由于该 4 种试验工况的上、下游水位均较高,水位差小,水流横向脉动较大,导致水流条件不对称,整体荷载最大值中的时均值比例较大;而试验工况 5 上、下游水位差较大,横向脉动小,水流基本对称,其荷载时均值基本为零;c. 各试验工况的整体荷载均方差(脉动推力)最大值出现在校核工况的右闸墩桩号 0+7 m 处,其值为 139 t,其他试验工况左右闸墩的脉动推力均方差为 23~103 t 量级;d. 闸墩整体荷载主频较低,约为 0.05~0.15 Hz,脉动能量基本分布在 0.5 Hz 以内,整体荷载符合正态分布规律。

弹模 $E=2.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\mu=0.31$ 。根据规范要求,进行动力响应计算时,混凝土结构采用动态弹模,其值为在静态弹模基础上提高 30%。计算范围及边界条件:根据地基模拟范围对泄洪闸闸墩动力特性影响的分析结果^[12],地基模拟深度取 50 m,宽度取 26 m,上下游长度取 50 m;实际结构中门机轨道梁与闸墩混凝土之间连接采用橡胶支座,在数值模型中则通过定义表面接触进行模拟,参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范》JTG D62-2004,接触摩擦因数取 0.3;永久缝及闸室地板周边结构缝按自由边界处理,地基四周采用全约束;水体采用 Westergaard 附加质量法计算,以质量元形式施加于闸墩侧面;由于荷载试验工况中均是闸门全开启工况,因此在计算时未考虑闸门的影

响;泄洪闸闸墩整体实体模型如图14所示。

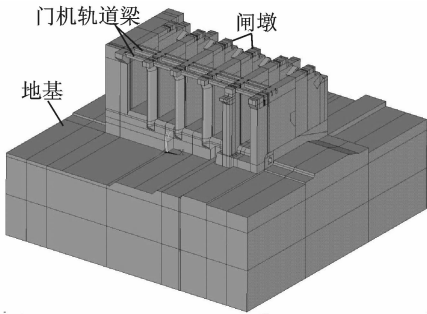


图14 泄洪闸闸墩数值模型

Fig. 14 Numerical model of sluice pier

3.2.1 闸墩振动响应数值模拟预测与原型观测的对比

为验证闸墩流激振动数值模型计算结果的可靠性,选择与原型观测工况6相近的试验工况5,以所测整体荷载作为闸墩振动响应计算的输入荷载,进行流激振动响应瞬态分析数值计算,提取2#孔左、右闸墩顶部顺流向动位移均方差进行对比,结果如图15所示。从对比结果看,二者动位移均方差沿水

流方向逐渐增大的变化趋势保持一致,数值模拟计算结果稍大。产生误差的主要原因是闸墩整体有限元模型对闸墩之间的横向连接系结构进行了部分简化,虽考虑了闸首部位三根门机轨道梁的摩擦接触,但未考虑部分线缆沟梁及部分盖板的摩擦接触所致的阻尼效应,致使计算结果稍大。数值计算结果与原型振动测试最大动位移均方差误差为5.8%,数值计算结果偏安全,因此数值模型是可靠的。

3.2.2 非常洪水工况闸墩振动响应预测

以整体荷载模型试验所测得各非常洪水工况(试验工况1~4)的水动力荷载作为数值模拟计算输入,计算各工况下闸墩的振动响应,提取2#孔左右闸墩顶部顺流向动位移均方差及闸墩根部最大动应力(第一主应力)进行统计,计算结果如图16、17所示。结果表明,各非常洪水工况下闸墩动位移均方差沿水流向逐渐增大;校核洪水工况下闸墩动位移均方差值较其他工况大,该工况下最大动位移均方差为902.3 μm,相应的最大振幅和双倍振幅分别为2706和5412 μm,出现在右闸墩桩号0+54 m

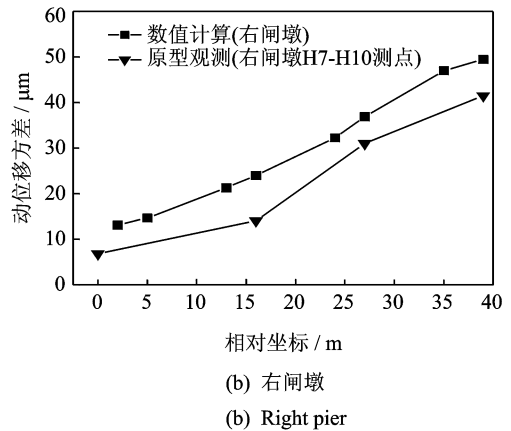
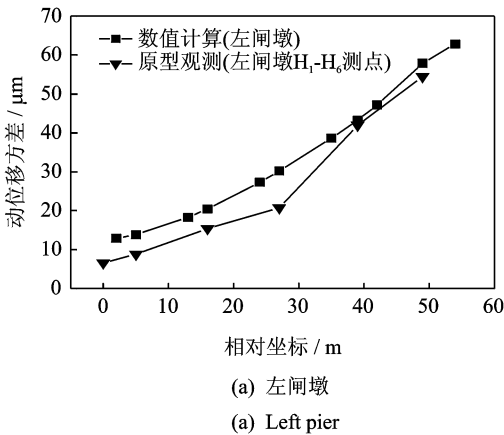


图15 2#孔闸墩数值计算与原型观测动位移均方差对比

Fig. 15 2# pier dynamic displacement mean square comparison of numerical calculation and prototype observation

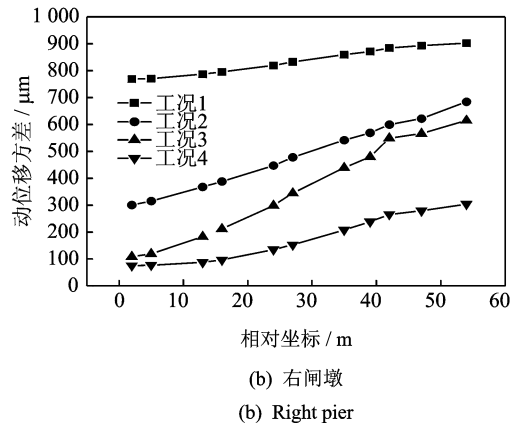
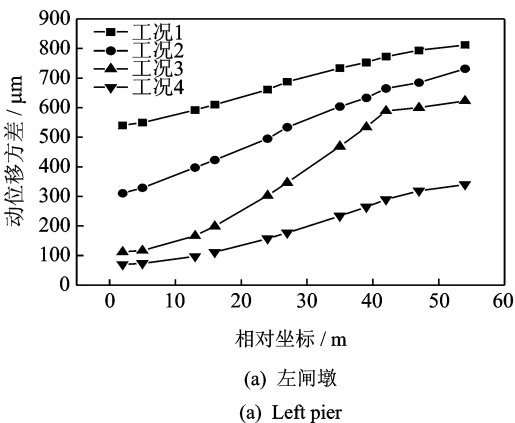


图16 非常洪水工况左、右闸墩水流向动位移均方差

Fig. 16 Dynamic displacement mean square of pier on flow direction under abnormal flood condition

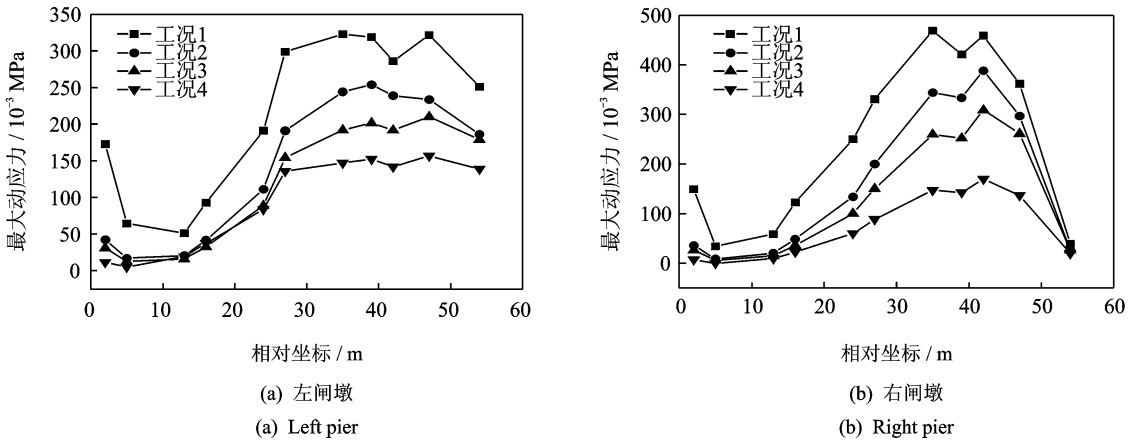


图 17 非常洪水工况左、右闸墩根部动应力最大值水流向分布

Fig. 17 The maxium dynamic stress distribution of pier under abnormal flood condition

处。闸墩最大动应力沿水流向分布特征表现为先增大后减小的趋势,在桩号 0+35~0+47 m 范围内动应力较大,最大动应力出现在右闸墩的校核洪水工况,值为 0.47 MPa,位于桩号 0+35 m 处。

4 泄洪闸闸墩运行安全评价

对于高速泄洪水流诱发结构振动危害的评估,主要考虑两个方面:一是评估对建筑物自身的危害;二是评估对环境或人体的危害。

1) 动位移评估标准。关于泄流振动动位移对结构自身安全的评估,目前还没有统一的控制标准,前苏联学者提出的按建筑物的十万分之一作为“允许振幅”。文献[3]认为,若仅从结构自身安全性角度,可将允许振幅提高到四万分之一的结构高度。按文献[3]标准,该工程闸墩最大高度为 42 m,允许的最大振幅、双倍幅值、均方差分别为 1 050, 3 150 和 525 μm。从闸墩原型振动测试结果来看,常遇洪水工况下闸墩最大动位移均方差为 105.4 μm,双倍振幅 675.6 μm,满足上述标准要求;但从非常洪水工况闸墩动位移预测结果来看,该闸墩在非常洪水工况下(校核洪水)预测的最大振幅为 2 706 μm,双倍幅值为 5 412 μm,均方差为 902.3 μm,远超过了该标准,因此该闸墩在非常洪水工况下产生疲劳破坏的可能性较大。

2) 动应力评估标准。对于动应力响应的评估,车宏亚^[13]所提的一般控制标准,即混凝土疲劳极限强度可取 0.5 倍混凝土的静力强度;该泄洪闸混凝土闸墩(C30)静力抗拉强度设计值为 1.43 MPa,按上述标准则泄流振动容许拉应力为 0.715 MPa,而

非常洪水工况下闸墩的最大动应力预测值为 0.47 MPa(校核工况),因此最大动应力满足要求。

3) 流激振动响应对人体的危害。单纯的动位移响应值的大小还不能说明问题,评估时应将振动频率这一因素也考虑进去,文献[14]提出了 Meister 感觉曲线^[14],如图 18 所示。将人体感觉归纳为从“无感觉”到“很不舒服”6 个阶段,该研究成果目前已为各个领域采用。从该感觉曲线出发,根据本次闸墩原型观测与预测结果,其泄洪振动主频为 2.41 Hz,原型实测最大双倍振幅为 0.675 mm,预测最大双倍幅值为 5.4 mm,分别位于本曲线的“相当的感觉到”区域和“很不舒服”区域,易产生心理恐慌等。

综上所述,在常遇洪水工况下,该泄洪闸闸墩过大的振动位移对人体产生不适;而在非常洪水工况

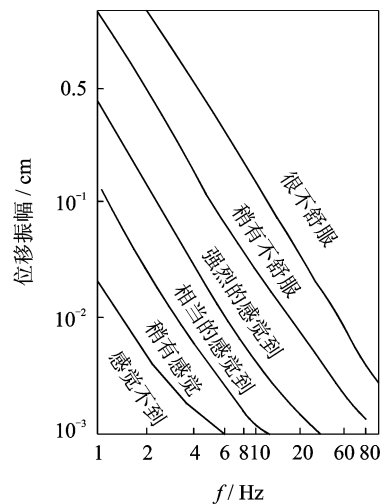


图 18 Meister 感觉曲线

Fig. 18 Meister feeling curve

下,过大的振动位移会使结构产生疲劳破坏的可能性增大,因此建议对该闸墩采取抗振加固措施。

5 结 论

1) 常遇洪水工况下闸墩原型振动测试表明,闸墩振动响应表现出“拍振”特性,闸墩振动主频为 2.41 Hz,最大动位移均方差为 105.4 μm ,双倍振幅为 675.6 μm ,非常洪水工况下闸墩最大动位移均方差预测值为 902.3 μm ,双倍振幅为 5 412 μm ;闸墩在常遇洪水工况下的动位移满足按结构的四万分之一作为“允许振幅”的标准,而在非常洪水工况下则超过了此标准,产生疲劳破坏的可能性较大。

2) 非常洪水工况下闸墩最大动应力预测值为 0.47 MPa,满足该混凝土闸墩的动力强度要求。

3) 该闸墩振动对人体舒适度影响较大,影响运行人员正常操作甚至心理恐慌。

4) 建议对该闸墩采取抗振加固措施。关于抗振加固方案的设计和优化,将在后续的研究工作中进一步深入。此外,闸墩泄洪振动安全控制标准的统一和量化也是需要进一步研究的课题。

参 考 文 献

- [1] 练继建,杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:154-155.
- [2] 吴杰芳,张林让. 水工结构流激振动水弹性模型研究及应用实例[M]. 武汉:长江出版社,2008:8-9.
- [3] 练继建,崔广涛. 导墙结构的流激振动研究[J]. 水利学报,1998,29(11):33-37.
Lian Jijian, Cui Guangtao. Study on flow induced vibration of spillway guide wall [J]. Journal of Hydraulic, 1998,29(11):33-37. (in Chinese)
- [4] 李火坤,练继建. 三峡左导墙泄洪振动原型观测及其动态识别与安全评估[J]. 水利水运工程学报,2010(3):59-64.
Li Huokun, Lian Jijian. Prototype observation of flood discharge-induced vibration and its dynamic identification and safety evaluation of Three Gorges left guide wall[J]. Hydro-science and Engineerin, 2010(3):59-64. (in Chinese)
- [5] 李火坤,练继建,杨敏. 强震后基于泄流激励的映秀湾水电站拦河闸动态检测与损伤评估研究[J]. 振动与冲击,2010,29(9):64-68.
Li Huokun, Lian Jijian, Yang Min. Dynamic detection and damage evaluation of Yingxiuwan hydropower station sluice under flood discharge excitation after strong

seismic shock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9):64-68. (in Chinese)

- [6] 张建伟,李火坤,练继建,等. 基于环境激励的厂房结构损伤诊断与安全评价[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(4):670-674.
Zhang Jianwei, Li Huokun, Lian Jijian, et al. Damage diagnosis and safety evaluation of underground powerhouse under ambient excitation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4):670-674. (in Chinese)
- [7] 练继建,李松辉. 基于支持向量机和模态参数识别的导墙结构损伤诊断研究[J]. 水利学报,2008,39(6):652-658.
Lian Jijian, Li Songhui. Damage diagnosis of spillway guide wall based on support vector machine and modal parameter identification [J]. Journal of Hydraulic, 2008,39(6):652-658. (in Chinese)
- [8] 练继建,张建伟,王海军. 基于泄流振动响应的导墙损伤诊断研究[J]. 水力发电学报,2008,27(1):96-101.
Lian Jijian, Zhang Jianwei, Wang Haijun. Study on damage diagnosis of guide wall based on flood discharge response [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(1):96-101. (in Chinese)
- [9] Lian Jijian, Wang Jimin, Gu Jinde. Similarity law of fluctuating pressure spectrum beneath hydraulic jump [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(14):2230-2238.
- [10] 辜晋德,练继建. 水跃区底部压力脉动的沿程变化规律研究[J]. 水利学报,2008,39(2):196-200.
Gu Jinde, Lian Jijian. Longitudinal distribution of hydraulic jump fluctuating pressure acting on floor [J]. Journal of Hydraulic, 2008, 39(2):196-200. (in Chinese)
- [11] 刘昉. 水流脉动壁压特性及相似律研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [12] 练继建. 泄洪闸闸墩泄洪振动研究[R]. 天津:天津大学,2013.
- [13] 车宏亚. 钢筋混凝土结构原理[M]. 天津:天津大学出版社,1990:40-41.
- [14] 伯野元彦(日). 土木工程振动手册[M]. 李明照,等译. 北京:中国铁道出版社,1992:101-102.



第一作者简介:李火坤,男,1981年4月生,博士、副教授。主要研究方向为泄流结构动力检测与安全评估。曾发表《强震后基于泄流激励的映秀湾水电站拦河闸动态检测与损伤评估研究》(《振动与冲击》2010年第29卷第9期)等论文。
E-mail:lihuokun@126.com