

三峡左导墙泄洪振动原型观测及其 动态识别与安全评估

李火坤¹, 练继建², 刘永智³

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 3. 中国水电
顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 利用汛期三峡枢纽工程泄洪期间泄流荷载对左导墙产生的激励作用, 对三峡左导墙结构进行了原型动力响应测试, 分析了导墙泄洪振动动位移响应均方根的沿程分布特征; 在此基础上, 以泄流荷载为激励源, 利用动力响应对导墙结构的工作模态参数进行了动态识别; 最后, 综合导墙结构泄洪振动动位移原型观测、模态参数动态识别结果对三峡左导墙汛期的泄洪振动安全性进行了综合评估。结果表明, 三峡左导墙泄洪振动安全, 按 Meister 感觉曲线标准, 其泄洪振动响应属于“强烈地感觉到”阶段, 但产生低阶共振可能性不大。

关 键 词: 三峡左导墙; 原型测试; 泄流激励; 动态识别; 安全评估

中图分类号: TV698.1+62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)03-0059-06

水利工程中, 水流强烈紊动产生的脉动压力作用在结构物上, 常导致结构的强烈振动, 并造成操作故障(如结构变形过大无法正常操作、技术人员的恐惧感等)、结构原件破坏或结构整体失事等; 尤其是当今的泄水建筑物, 泄量大、流速高及结构趋向轻型化发展使得流激振动问题更为突出。导墙作为轻型泄流结构, 由于混凝土结构的抗拉强度小, 在长期泄流过程中常发生疲劳破坏。目前, 国内外已发现多起导墙振动和破坏的工程^[1]。泄流结构损伤(病害、隐患等)的出现必然会引起其动力特性的改变。通过对泄流结构进行长期、定期或不定期的振动测试及模态参数动态识别, 可对泄流结构进行实时健康评估, 对早期病害、隐患进行预报。

本文利用汛期三峡枢纽工程泄洪期间泄流荷载对左导墙产生的激励作用, 对三峡左导墙结构进行了原型动力响应测试, 分析了导墙泄洪振动动位移响应均方根的沿程分布特征; 在此基础上, 以泄流荷载为激励源, 仅利用动力响应对导墙结构的工作模态参数进行动态识别; 最后, 综合导墙结构泄洪振动动位移原型观测、模态参数动态识别结果对三峡左导墙汛期的泄洪振动安全性进行综合评估。

1 左导墙泄洪振动原型观测

1.1 工程概况

三峡工程左导墙位于左导墙坝段下游, 是三峡溢流泄洪坝段和左岸发电厂房坝段的分隔体, 为 I 等 I 级永久建筑物。导墙轴线垂直于大坝坝轴线, 总长度为 210 m, 分成 7 个导墙段, 其中 1#, 2# 各长 25 m, 3# ~ 7# 各长 32 m, 其横截面为梯形, 除与左侧厂房相接的 1#, 2# 导墙段左侧面为垂直面外, 其余各导墙段左侧面均为 1 : 0.10 的坡面, 右侧面均为 1 : 0.24 的坡面, 底部宽度 32 ~ 52 m, 建基面高程从 -8.0 ~ 15.0 m 不等, 顶部

收稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909049); 国家杰出青年科学基金资助项目(50725929); 江西省教育厅青年科学基金资助项目(GJJ10084); 水利部公益性行业科研专项项目(200901081); 西部交通建设科技项目(2009328000084)

作者简介: 李火坤(1981-), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 主要从事泄流结构动力安全方面的研究工作。

E-mail: lihuokun@126.com

高程76.560~92.645 m。导墙上部设有一断面为10 m×12 m(宽×高)的泄槽,与左导墙坝段的排漂孔相连,作为泄洪和排除漂浮物之用,泄槽两侧侧墙厚3.0 m,导墙典型断面见图1。导墙接缝面处理为^[2]:3#与4#,5#与6#之间的横缝采用立模分缝的形式成缝,其余各缝之间的横缝均采用诱导缝的形式成缝,诱导缝采用打孔灌砂的方法施工,造孔完成后在孔内灌注洁净干砂并捣实。

1.2 原型动力测试测点布置

利用汛期三峡枢纽泄洪期间泄流荷载对导墙产生的激励效应,对三峡左导墙进行原型动力测试,采用DP型地震式位移传感器和北京东方振动噪声研究所研制的DASP数据采集和处理系统,测试时相应的泄洪工况如表1所示。导墙测点布置于导墙顶部左侧(靠近厂房),每个导墙段沿长度方向布置2个测点(1#和2#测点),其中1#测点布置水平向动位移传感器、2#测点布置水平向和垂向动位移传感器;6#及7#导墙段由于现场观测条件的限制(泄洪雨滴飞溅严重),未能给予布点,仅观测1#~5#导墙段,每个导墙坝段的测点采用100 Hz频率进行现场数据采集(集)样。

表 1 左导墙振动观测泄洪工况

Tab. 1 Flood discharge operating mode of the left guide wall during vibration observation				
时 间	风皇山(上游库水位)/m	三斗坪(下游河水位)/m	出库流量/(m ³ ·s ⁻¹)	深孔泄量/(m ³ ·s ⁻¹)
2007-08-07T15:00	144.85	68.05	/	/
2007-08-07T16:00	144.87	68.12	26 000	9 870
2007-08-07T17:00	144.86	68.12	/	/
2007-08-07T18:00	144.86	68.14	26 000	9 870
2007-08-07T19:00	144.86	68.15	/	/

注:此时段15:00~19:00测量左导墙泄洪振动,开启深孔为:1#,3#,5#,9#,13#,15#;排漂孔开启。

1.3 原型动力测试结果分析

通过对左导墙泄洪振动数据采集与信号处理,得到左导墙1#~5#段最大水平动位移响应均方根如表2所示,典型测点振动时程线及功率谱见图2。

从左导墙泄洪振动实测动位移统计特征来看:无论水平向动位移均方根值还是垂向动位移均方根值,沿导墙长度方向均有增大的趋势。在4#导墙段达到最大值,水平最大动位移均方根值约68 μm,垂向最大动位移均方根值为10 μm,相比其他导墙段,4#,5#导墙坝段动位移均方根值较大,主要是由于这两段导墙正好处于中孔泄洪挑流消能区,水流紊动强烈。从频谱特征看,前3个导墙段振动主频在7.2 Hz左右,表现为结构自身振动频率,4#~5#导墙段振动主频在0.68 Hz左右,水流的优势频率较为明显。

表 2 左导墙各坝段实测动位移均方根最大值

Tab. 2 The max root-mean-square statistic result of dynamic displacement of various guide wall sections			
导 墙 段	动位移均方根/μm		功率谱密度主频峰值/Hz
	水平向	垂 向	
1#	5.29	1.66	7.13
2#	7.00	1.80	7.22
3#	16.16	2.51	7.13
4#	68.97	10.14	0.68
5#	56.93	9.39	0.68

注:本表中的功率谱密度主频峰值指水平方向动位移。

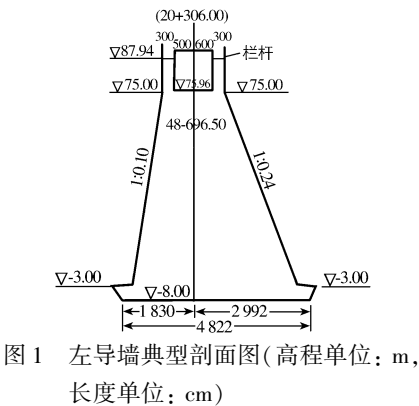


图 1 左导墙典型剖面图(高程单位:m,长度单位:cm)

Fig. 1 Cross section of the left guide wall

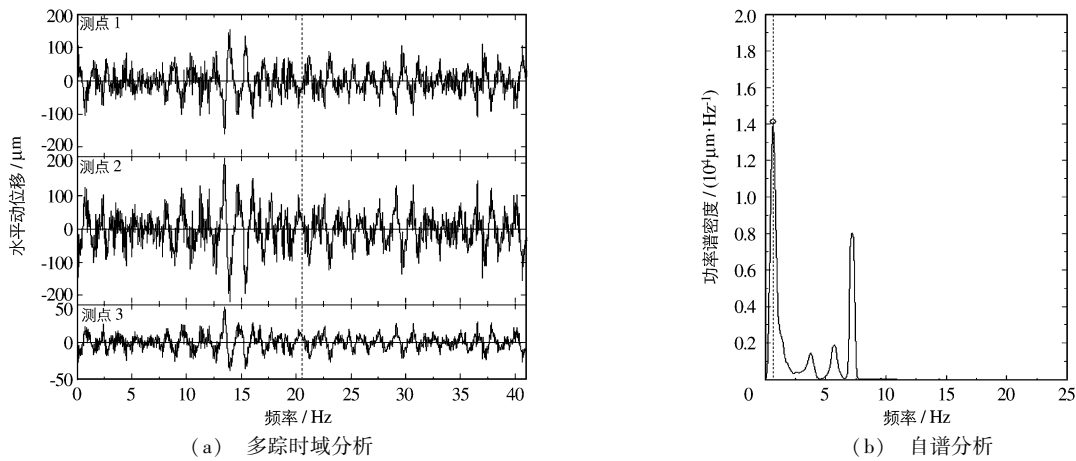


图2 左导墙段典型测点水平位移时程线及功率谱密度

Fig. 2 Dynamic horizontal displacement time process and power spectrum density of typical measuring point

由于导墙结构振动频率是判断其动力安全的主要参数之一,而传统的振动响应频域分析所采用的傅里叶变换对信号进行了截断与加窗处理,可能会造成吉布斯现象,且无法识别结构的密集频率,使得部分结构真实振动频率在频域分析时被淹没;同时,由于实际工程中不可避免混入多种不同性质的噪声,因此,在频谱图中会产生大量的“毛刺”,大大妨碍了对系统真实频率的判断.为解决这一问题,本文采用模态参数识别技术,利用泄流荷载对导墙产生的激励,直接应用所测得的动位移响应进行模态参数动态识别,提高导墙泄洪振动下的结构频率识别精度,并分析导墙结构共振的可能性.

2 左导墙泄洪振动动力特性的动态识别

结构动力特性(或模态)动态识别是指通过获得结构振动的输入、输出的测试数据或者输出的测试数据,并利用所测试的试验数据确定结构模态参数,其中包括结构的固有频率、模态阻尼比、模态质量、模态刚度和振型等.结构的模态识别可以分为两大类^[3]:一是传统的结构模态识别方法,这类识别方法依靠结构振动的输入和输出的测试数据识别结构的模态参数,分析方式主要是单输入和单输出频域分析方法,或者多输入和多输出的频域分析方法;二是在环境激励下结构的模态识别方法,利用环境自然激励作为结构的输入,通过被测试的结构输出数据和部分输入数据或仅利用输出数据识别结构的模态参数,多用于工作状态中的大型工程结构.三峡左导墙刚度大,人工激励困难,而泄流荷载能量巨大,可激发其多阶模态,因此可利用泄流激励对其进行结构模态参数识别.

文献[4-6]以泄流作为激励利用特征系统实现法(ERA)和频域分解法(FDD)进行了高拱坝模态参数识别,获得了拱坝泄流状态下的结构模态参数;文献[7]以测得的水流脉动荷载作为输入激励,进行了悬臂梁瞬态响应分析,并根据输出结果利用 ERA 法识别了悬臂梁的工作模态参数,识别结果与模态计算结果吻合较好.本文仅利用三峡左导墙实测动态响应,采用 ERA 方法进行模态参数识别.

基于自然激励技术(NExT法),通过实测响应数据获得结构脉冲响应函数,通过构造 Hankel 矩阵,形成系统脉冲响应函数矩阵,对零阶 Hankel 矩阵进行奇异值(SVD)分解,得:

$$\mathbf{H}(0) = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_t & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{Q}^T \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}(0)$ 为 $(r+1) \times (s+1)$ 维实矩阵; $\mathbf{P}$ 为 $(r+1) \times l$ 维正交矩阵; $\mathbf{Q}$ 为 $(s+1) \times l$ 维正交矩阵; $\mathbf{D}_t = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_r)$, $r = \text{rank}(\mathbf{H}(k))$, $r < l$ 且 $d_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, r$. 设 $\mathbf{P}_r, \mathbf{Q}_r$, 分别为 $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$ 矩阵的前 r 列, 则

由系统最小实现论可得系统矩阵为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}_r^{-1/2} \mathbf{P}_r^T \mathbf{H}(1) \mathbf{Q}_r \mathbf{D}_r^{-1/2} \quad (2)$$

对系统矩阵 $\mathbf{A}$ 进行特征值分解即可得结构频率及阻尼比。

利用左导墙实测动态响应数据,用 NE_xT 法计算 2#测点的脉冲响应函数,利用 ERA 法识别导墙结构频率,限于篇幅,本文仅给出识别结果(见表 3),具体导墙模态参数识别实现过程可参考文献[8]。

表 3 左导墙 1#~5#坝段模态识别结果

Tab. 3 Modal parameter identification results of 1#~5# left guide wall sections

阶 次	1#导墙段		2#导墙段		3#导墙段		4#导墙段		5#导墙段	
	频率/ Hz	阻尼比/ %	频率/ Hz	阻尼比/ %	频率/ Hz	阻尼比/ %	频率/ Hz	阻尼比/ %	频率/ Hz	阻尼比/ %
1	5.73	3.6	0.56	32.2	0.70	22.4	0.69	27.9	0.72	21.5
2	7.14	2.0	5.64	3.4	5.66	5.5	1.23	11.1	1.26	15.6
3	14.34	4.0	7.19	1.0	7.18	3.8	3.98	3.6	3.86	4.4
4	15.22	2.3	14.73	3.2	/	/	5.76	4.2	5.78	2.3
5	/	/	15.15	2.3	/	/	7.16	1.3	7.18	1.0

注:识别结果中阻尼比大于 10% 的频率为结构虚假模态,即水流脉动频率。

从识别结果来看,在该泄洪工况下,1#导墙段结构自振频率有 4 阶;2#导墙段识别出 5 阶,其中第 1 阶为水流荷载的频率(导墙边壁上水流的压力脉动为宽带低频脉动,能量主要集中在低频段,对于三峡导墙而言,脉动荷载的优势频率在 2 Hz 以下^[9]),后 4 阶为结构自身振动频率;3#导墙段识别出 3 阶,第 1 阶为水流荷载频率,后 2 阶为导墙结构频率;4#导墙段识别出 5 阶,前 2 阶为水流荷载频率(由于水流频率有一定宽度),后 3 阶为导墙结构频率;5#导墙段识别出 5 阶,前 2 阶为水流荷载频率,后 3 阶为导墙结构频率。将识别结果与其动位移功率谱密度图对比可见,识别结果与实际情况比较吻合,1#,2#,3#导墙段被水流激起的第 1 阶频率在 5.6 Hz 以上;而 4#,5#导墙段位于中孔水舌挑流冲击区,被水流激起的第 1 阶频率约为 3.8 Hz,从动位移均方根值来看,4#,5#导墙段的均方根值较其他导墙段大。可见,4#,5#导墙段的泄流振动表现为低频率、大振幅的振动,而 1#,2#,3#导墙段相对 4#,5#导墙段表现为高频小振幅振动;可见,在该泄流工况下,导墙低阶振动频率在 3 Hz 以上,三峡导墙水流脉动优势频率在 2 Hz 以内,因此导墙产生低阶共振的可能性不大。

3 左导墙泄洪振动安全综合评估

3.1 动位移、动应力响应控制标准

对于导墙结构泄洪振动的位移响应评估,目前水利界尚无统一标准。前苏联学者曾提出按水工建筑物高度的十万分之一作为“允许振幅”,但这个指标没有反映频率变化对允许振幅的影响以及建筑物的重要性。文献[10]以三峡工程为例,给出了导墙动位移响应和动应力响应评估的标准,即对动位移响应评估,采用

$10^{-5}H$ 作为“允许振幅”时,要求导墙的结构参数满足 $C_d = \frac{Hh_t^3}{100b^3} \leq 7$,其中: H 为上下游水位差; b 为导墙底部

厚度; h_t 为导墙有效高度(有脉动压力部分,即水深)。对于应力响应的评估,按泄洪振动响应一般控制标准

(混凝土疲劳极限强度取混凝土的静力极限强度的 50%),导墙结构参数满足 $C_s = \frac{Hh_t^2}{100b^2} \leq 10$ 时结构安全。

按以上标准,本次实测结果均满足要求,导墙结构安全。

3.2 Meister 感觉曲线

振动危害评估包括对建筑物自身的危害评估及对工作环境或人体的危害评估。对于人的振动感觉而言,不仅需考虑单纯的动位移响应值,还应考虑振动频率。关于振动对人的感觉所产生的影响,Reiher 和 Meister

做了大量有效的工作,他们通过对人体在直立姿势和横卧姿势下施加竖直和水平方向的振动试验,将人体感觉归纳为从“无感觉”到“很不舒服”6个阶段. Meister 感觉曲线^[1]见图3). 以本次观测三峡左导墙动位移均方根值最大的4#导墙段为例,其泄洪振动频率为3.98~7.16 Hz,最大振动位移为0.206 mm,可认为三峡左导墙的泄洪振动响应位于本曲线的“强烈地感觉到”区域,这一结论与现场测试工作人员感觉相同,对现场测试工作环境有一定的影响(如心理恐慌等). 本次测试的泄洪工况非最不利泄洪条件,若遇更大洪水且泄洪条件对导墙振动更为不利时,建议加强对左导墙的泄洪振动监控.

4 结 语

三峡左导墙作为 I 等 I 级永久性建筑物,其安全性极其重要. 本文利用汛期三峡枢纽工程泄洪期间泄流荷载对左导墙产生的激励作用,对左导墙结构进行了原型动力响应测试,分析了导墙泄洪振动动位移响应均方根的沿程分布特征;在此基础上,以泄流荷载为激励源,仅利用动力响应对导墙结构的工作模态参数进行了动态识别;最后,综合导墙结构泄洪振动动位移原型观测、模态参数动态识别结果对左导墙汛期的泄洪振动安全性进行了综合评估. 结果表明,在该泄洪工况下,导墙结构运行安全,产生低阶共振可能性不大,按 Meister 感觉曲线标准,其泄洪振动响应属于“强烈地感觉到”阶段,若遇更大洪水且泄洪条件对导墙振动更为不利时,建议加强对左导墙的泄洪振动监控.

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. (LIAN Ji-jian, YANG Min. Flood discharge engineering of high dam[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 李亮. 三峡工程左导墙碾压混凝土现场施工技术[J]. 中国三峡建设, 2000(11): 24-25, 39. (LI Liang. Construction of rolled concrete of the left guide wall of the Three Gorges Project [J]. China Three Gorges Construction, 2000(11): 24-25, 39. (in Chinese))
- [3] 姚志远. 大型工程结构模态识别的理论和研究方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2004. (YAO Zhi-yuan. Study on modal identification theory and methods for large engineering structures[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese))
- [4] 李火坤, 练继建. 高拱坝泄流激励下基于频域法的工作模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 149-153. (LI Huo-kun, LIAN Ji-jian. Operational modal parameter identification of high arch dam under flood discharge exciting based on frequency domain decomposition method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(7): 149-153. (in Chinese))
- [5] LIAN Ji-jian, LI Huo-kun, ZHANG Jian-wei. ERA modal identification method for hydraulic structures based on order determination and noise reduction of singular entropy[J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(2): 1-13.
- [6] 练继建, 张建伟, 李火坤, 等. 泄洪激励下高拱坝模态参数识别研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(12): 101-105. (LIAN Ji-jian, ZHANG Jian-wei, LI Huo-kun, et al. Study on modal parameter identification of high arch dam under flood discharge excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(12): 101-105. (in Chinese))
- [7] 李火坤. 泄流结构耦合动力分析与工作性态识别方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (LI Huo-kun. Study on coupled dynamics analysis and working state identification of flood discharge structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [8] 练继建. 三峡溢流坝及左导墙工作动力性态的泄流激振识别与健康诊断研究报告[R]. 天津: 天津大学, 2007. (LIAN Ji-jian. Study on dynamic characteristic identification and health diagnosis of Three Gorges guide wall and spillway dam under flood discharge excitation [R]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))

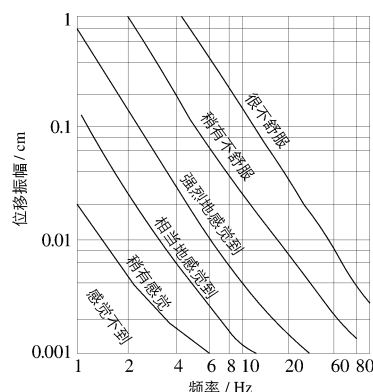


图3 Meister 感觉曲线

Fig. 3 Meister sensory curves

- [9] 练继建. 三峡水利枢纽厂坝隔(导)墙泄洪振动水弹性模型试验研究[R]. 天津: 天津大学, 1997. (LIAN Ji-jian. Study on flow induced vibration hydro-elastic model test of Three Gorges guide wall[R]. Tianjin: Tianjin University, 1997. (in Chinese))
- [10] 练继建, 崔广涛. 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. Study on flow induced vibration of spillway guide wall[J]. Journal of Hydraulic, 1998(11): 33-37. (in Chinese))

Prototype observation of flood discharge-induced vibration and its dynamic identification and safety evaluation of Three Gorges left guide wall

LI Huo-kun¹, LIAN Ji-jian², LIU Yong-zhi³

(1. School of Civil Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Northwest Hydro Consulting Engineers, CHECC, Xi'an 710065, China)

Abstract: Taking flood discharge loads as an excitation, the prototype observation of Three Gorges left guide wall is carried out and a distribution regularity of the root-mean-square of dynamic displacement response on the guide wall in the length direction is analyzed. Based on this prototype dynamic test, the operational modal parameter of the guide wall is identified under flood discharge excitation during flood season. Finally, based on the prototype dynamic displacement response and the identification result, the flood discharge vibration security of Three Gorges left guide wall is evaluated during flood season. The result shows that the flood discharge vibration of Three Gorges left guide wall is safe, and that the flood discharge vibration response belongs to “intensive perception” taking the Meister sensing curve as the criterion.

Key words: Three Gorges left guide wall; prototype observation; flood discharge excitation; modal parameter identification; safety evaluation

版 权 转 让 声 明

本刊已加入万方数据数字化期刊群(www.wanfangdata.com.cn)、中国知网(www.cnki.net)、维普资讯网(dx1.cqvip.com)和思博网—中文电子期刊服务(www.ceps.com.tw)等网站,并被中国核心期刊(遴选)数据库、中国期刊全文数据库等收录.凡本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(即包括印刷版、光盘版和网络版各种使用方式的报酬),作者将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、汇编权等在全世界范围内转让给本刊,不再另行签署《论文著作权转让书》.若有异议,请在投稿时作文字说明,编辑部将酌情处理.

特 此 声 明

《水利水运工程学报》编辑部

2010 年 9 月 30 日