

糯扎渡水电站溢洪道泄槽流激振动试验研究

徐国宾 尹伟波 练继建 彭新民

(天津大学建筑工程学院 天津 300072)

摘要 通过水弹性模型试验 ,研究糯扎渡水电站溢洪道泄槽隔墙通过宽大的 F_1 和 F_3 断层时的流激动力响应 ,并对其安全性进行评估。试验结果表明 ,糯扎渡水电站溢洪道泄槽隔墙模型实测基频分别为 9.86 Hz (干模态)及 9.28 Hz (湿模态) ,隔墙顶部最大泄洪振动响应发生在低泄量工况 ,其动位移均方根值达 105.5 μm 。根据 Meister 感觉曲线可知 ,处于微有感觉或相当有感觉状况。隔墙的最大动应力振幅 (3σ) 为 0.141 MPa ,可以认为隔墙在溢洪道正常泄洪时不会发生疲劳破坏。

关键词 水弹性模型 ;流激振动 ;溢洪道 ;泄槽隔墙 ;断层 ;糯扎渡水电站

中图分类号 :TV651.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2007)06-0024-04

Experimental study on flow-induced vibration in spillway chute of Nuozhadu Hydropower Station//XU Guo-bin ,YIN Wei-bo ,LIAN Ji-jian ,PENG Xin-mir(School of Architecture ,Tianjian University ,Tianjin 300072 ,China)

Abstract :Based on hydroelastic model experiments ,a study was performed on the dynamic response of flow-induced vibration in the spillway chute as its partition wall went through the wide fault F_1 and F_3 ,and the safety of the partition wall was evaluated. The result shows that the measured fundamental frequencies of the partition wall model were 9.86Hz in dry mode and 9.28Hz in wet mode respectively ,and that the maximal vibration response at the top of the partition wall induced by flood discharge occurred in the operational case of low flood discharge ,with the root mean square value of the dynamic displacement of the partition wall being 105.5 μm . According to the Meister feeling curve ,the partition wall was in the states of little or considerable swing ,and the maximal amplitude of dynamic stresses (3σ) was 0.141 MPa. Therefore ,the fatigue failure of the partition wall will not occur at the normal flood discharge of the spillway.

Key words :hydroelastic model ;flow-induced vibration ;spillway ;partition wall of chute ;fault ;Nuozhadu Hydropower Station

糯扎渡水电站位于云南省澜沧江上 ,枢纽工程由心墙堆石坝、岸边开敞式溢洪道、左、右岸各 1 条泄洪隧洞、地下厂房等组成。岸边溢洪道位于左岸 ,共有 8 孔 ,每孔净宽 15.0 m ,溢流堰顶高程 792.00 m。溢流堰下游接总宽为 151.5 m、坡度为 23% 的泄槽。泄槽中间由两道隔墙将其分成左 3 孔、中 2 孔和右 3 孔 3 个泄水道。泄槽隔墙高 12 m ,宽 3 m ,总长 601.55 m。整个泄槽沿程设置 5 级掺气挑坎 ,在第 3 级挑坎下游 44 m 左右位置散布着宽大的 F_1 、 F_3 断层 ,最大宽度 39.29 m。溢洪道最大泄流量 31318 m^3/s 。

本文通过水弹性模型试验 ,研究了溢洪道泄槽隔墙通过宽大的 F_1 和 F_3 断层时的流激动力响应 ,并对其安全性进行评估。

1 水弹性模型相似原理及模型制作

1.1 相似原理

泄洪流激振动水弹性试验模拟 ,是对“结构-水体-

地基-动荷载”四位一体的流固振动系统的模拟 ,要求同时满足“动荷载”输入系统相似和结构系统动力响应相似 ,即满足水力学条件和结构动力学条件相似。

1.1.1 水力学相似条件

“动荷载”输入系统相似的实质是按重力相似律设计的水力学模型中脉动压力相似。目前对脉动压力相似律的认识还不统一^[1-2]。然而 ,大量的研究成果表明^[3] ,由水流条件急剧变化引起的水流分离或扩散所导致的大尺度涡旋运动产生的边壁压力脉动 ,在雷诺数足够大的模型中能够较好地模拟 ,脉动压力可按重力相似律引申到原型。溢洪道泄槽隔墙泄洪振动振源为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。根据重力相似律推导出的各水力学要素的相似比尺见表 1。

1.1.2 结构动力学相似条件

结构动力学相似条件即结构动力响应系统相似 ,它与结构的频率、振型、阻尼等因素有关 ,包括几

表 1 水力学要素相似比尺

物理量	符号	比尺	物理量	符号	比尺
流速	v	$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}$	力	F	$\lambda_F = \lambda_L^3$
时间	T	$\lambda_T = \lambda_L^{0.5}$	压强	P	$\lambda_P = \lambda_L$
流量	Q	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	脉动频率	f	$\lambda_f = \lambda_L^{-0.5}$
加速度	a	$\lambda_a = 1$	脉动压强	P'	$\lambda_{P'} = \lambda_L$
脉动流速	v'	$\lambda_{v'} = \lambda_L^{0.5}$			

何条件相似、物理条件相似、运动条件相似和边界条件相似。

1.1.2.1 几何条件相似

几何条件相似是指结构模型不仅尺寸、面积、体积相似,而且线应变 λ_e 、角应变 λ_ϑ 、线位移 λ_u 等相似比尺满足以下相似条件:

$$\lambda_e = \lambda_\vartheta = 1 \tag{1}$$

$$\lambda_u = \lambda_L \tag{2}$$

1.1.2.2 物理条件相似

物理条件相似要求结构材料的力学特性和受力后引起的变化必须相似。在线弹性范围内,根据弹性力学的物理方程,要使模型和原型相似必须满足:

$$\lambda_\mu = 1 \tag{3}$$

$$\lambda_\sigma = \lambda_E \lambda_\epsilon \tag{4}$$

$$\lambda_\tau = \lambda_G \lambda_\vartheta \tag{5}$$

当 $\lambda_\rho = 1$ 时,有

$$\lambda_\sigma = \lambda_\tau = \lambda_E = \lambda_G = \lambda_L \tag{6}$$

式中: λ_μ 为泊松比比尺; λ_E 、 λ_G 分别为弹性模量比尺和剪切模量比尺; λ_σ 、 λ_τ 分别为正应力比尺和切应力比尺; λ_ϵ 为线应变比尺。

1.1.2.3 运动条件相似

运动条件相似要求结构的运动状态和产生运动的条件相似。一般地,随机动荷载作用下的结构运动方程为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = P(t) \tag{7}$$

式中: M 为质量矩阵,由结构质量和附连水质量组成,可将它分为结构质量矩阵 M_s 和附连水质量矩阵 M_w ,即 $M = M_s + M_w$; C 为阻尼系数矩阵; K 为刚度矩阵(或弹性系数矩阵), $K = ELZ$; $P(t)$ 为随机动荷载向量; $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 分别为位移向量及其各阶导数。

式(7)可写成

$$M_s \ddot{u}(t) + M_w \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + ELZ u(t) = P(t) \tag{8}$$

式中: Z 为由结构约束条件决定的无因次常数矩阵; E 为弹性模量; L 为长度特征参数。

由式(8)可推得相应的比尺关系为

$$\frac{\lambda_{M_s} \lambda_v}{\lambda_T} = \frac{\lambda_{M_w} \lambda_v}{\lambda_T} = \lambda_c \lambda_v = \lambda_E \lambda_L \lambda_u =$$

$$\lambda_P \lambda_L^2 = \lambda_{P'} \lambda_L^2 \tag{9}$$

式中: λ_{M_s} 为结构质量比尺; λ_{M_w} 为附连水质量比尺; λ_c 为阻尼系数比尺; λ_E 为弹性模量比尺。

系统按重力相似准则设计,则

$$\lambda_T = \lambda_L^{0.5} \tag{10}$$

$$\lambda_P = \lambda_{P'} = \lambda_L \tag{11}$$

又因为结构几何相似,有

$$\lambda_u = \lambda_L \tag{12}$$

将式(10)~(12)代入式(9)可得

$$\lambda_{M_s} = \lambda_{\rho_s} \lambda_L^3 = \lambda_{M_w} = \lambda_{\rho_w} \lambda_L^3 = \lambda_c \lambda_v = \lambda_E \lambda_L^2 = \lambda_L^3 \tag{13}$$

式中: λ_{ρ_s} 为结构密度比尺; λ_{ρ_w} 为液体密度比尺。

考虑到原型与模型的液体密度相同(都是水),则有 $\lambda_{\rho_w} = 1$,代入式(13)可得

$$\lambda_{\rho_s} = 1 \tag{14}$$

$$\lambda_c = \lambda_L^{2.5} \text{ (或 } \lambda_\zeta = 1) \tag{15}$$

$$\lambda_E = \lambda_L \tag{16}$$

式(14)(15)(16)分别是结构运动条件相似对结构模型材料密度、阻尼系数和弹性模量的要求。

1.1.2.4 边界条件相似

边界条件相似包括边界约束条件、边界受力条件等的相似。边界约束条件必须与原型相同,对于水工建筑物而言,主要是地基模拟范围的选取问题;边界受力条件相似主要是指边界水荷载的相似,只要水力学条件相似,这一相似就能自动满足。

由以上分析可知,泄洪激振的水弹性模型可按重力相似律来模拟动荷载,要求结构模型材料满足密度大($\lambda_{\rho_s} = 1$)、弹性模量小($\lambda_E = \lambda_L$)、等阻尼比($\lambda_\zeta = 1$)、等泊松比($\lambda_\mu = 1$),并合理地选取水域和地基的模拟范围就能保证结构动力响应系统的相似。

1.2 水弹性模型材料及模型制作

1.2.1 水弹性模型材料

原型溢洪道泄槽隔墙混凝土以及断层开挖后填充混凝土的密度均为 2400 kg/m^3 ,弹性模量为 26 GPa ,断层两侧岩化地基弹性模量为 30 GPa 。一般混凝土动弹性模量与静弹性模量之比为 $1.3 \sim 1.5$,则动弹性模量为 $33.8 \sim 45 \text{ GPa}$ 。所以泄槽隔墙墙体动弹性模量取 34 GPa ,泊松比为 0.167 ;岩化地基动弹性模量取 42 GPa ,泊松比为 0.25 。本试验模型几何比尺 $\lambda_L = 100$,根据相似律对模型材料性能的要求,采用加重橡胶来模拟原型材料。模型材料的弹性模量和密度对试验成果影响很大^[4]。由于模型材料——加重橡胶都是工厂化批量生产的,对其进行

分批抽样,制成标准试件(悬臂梁),测定悬臂梁的自振频率。根据动弹性模量与自振频率及梁的基本参数关系式(17),反推材料动弹性模量,并依据比尺要求,确定材料批量生产配比和工艺流程。模型制作时要求确保层面接触良好,黏结牢固紧密,保证水弹性模型的整体性和均一性。

$$E_d = 391 \times 10^{-4} \frac{L^3}{bh^3} W f^2 \quad (17)$$

式中: L 为试件的宽度; b 为试件厚度; h 为试件高度; W 为模拟材料控制参数; f 为自振频率。

1.2.2 水弹性模型的制作

水弹性模型对地基的模拟范围原则上应该包括原型结构受荷载作用后所影响的区域,但实际上不可能也不需要模拟过大的地基范围,通常都是根据物体的实际结构状态及试验研究目的进行具体分析,从而确定合适的尺寸。对泄槽隔墙结构的泄洪振动而言,主要通过保证结构体自振特性和在动荷载作用下结构体动力响应的精度两方面来确定地基的模拟范围。

根据三峡枢纽隔(导)墙泄洪振动的水弹性模型试验和向家坝水电站导(隔)墙结构水弹性模型研究的经验^[5-6],确定本次试验的水弹性模型模拟范围为隔墙地基模拟深度取12m,宽度取96m,在水流方向模拟了从桩号溢0+515到溢0+585共70m的范围。为了更真实地模拟 F_1 和 F_3 断层,根据断层开挖后填充的混凝土密度、弹性模量及断层两侧岩化地基弹性模量,选择弹性模量和密度与原型相似的加重橡胶对断层进行了制作模拟。 F_1 断层位置及隔墙地基模拟范围如图1、图2所示。

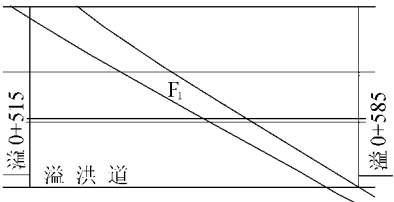


图1 F_1 断层模拟平面

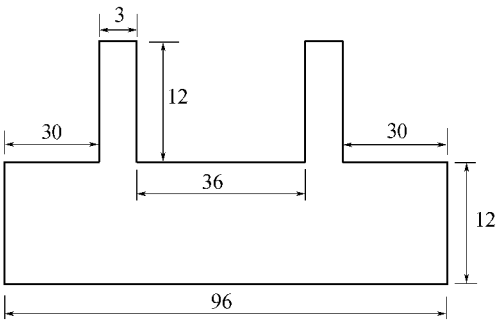


图2 隔墙地基模拟范围横剖面(单位:m)

2 泄槽流激振动响应测试与分析

2.1 测点布置及测试方法

泄槽隔墙泄洪振动响应,是通过布置在隔墙顶部的两个测点来观测的,因为泄槽隔墙顶部为泄洪振动位移响应的最大点。考虑到泄洪振动位移响应的量级较小,背景噪声对振动响应的测试结果影响较大,所以在试验测试的结果分析中需考虑噪声的影响。泄洪振动位移响应的测试主要采用DP型地震式低频振动传感器(DPS-0.35-20-V)进行测试。

2.2 动力响应测试结果

试验进行了5种不同工况的动力响应测试。各种工况下的隔墙动位移(垂直于水流方向动位移)及动应力(垂直于水流方向及竖向动应力)测试结果如表2所示;工况2右隔墙的动位移响应以及动应力响应的时程线与频谱图^[7]具有代表意义,如图3、图4所示。模型测试背景噪声均方根为 $0.3\mu\text{m}$ 左右,在试验测试结果分析中应滤掉噪声的影响。测试结果表明,最大泄洪振动位移发生在工况1,其右隔墙上的动位移均方根达到 $105.5\mu\text{m}$,最大动应力均方根也发生在工况1,隔墙根部处横向应力均方根为 0.020MPa ,竖向应力均方根为 0.047MPa 。低泄量之所以引起的隔墙振动响应较大,是由于泄量小时溢洪道里的水位低,水流被掺气坎挑跃后跌落在溢洪道里,增大了泄槽以及隔墙上的脉动压力,从而导致泄洪振动较大。

表2 各工况下隔墙的最大动位移及对应的最大动应力

工况	水库 水位/m	洪水 频率/ %	溢洪道 泄量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	最大动位移/ μm		最大动应力/ MPa	
				右隔墙	左隔墙	横向	竖向
1	804.00	50	4730	105.500	70.864	0.020	0.047
2	804.00	20	7700	99.450	73.902	0.018	0.044
3	809.17	1	14728	59.225	45.055	0.010	0.026
4	810.92	0.1	19780	68.940	50.891	0.011	0.031
5	817.99		31318	81.202	47.491	0.012	0.035

注:工况5对应校核洪水,由历年洪水过程包络线求得。

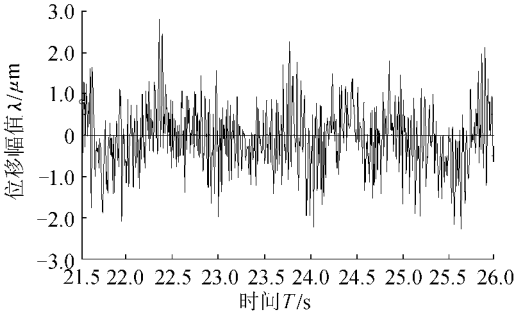


图3 工况2右隔墙动位移时程线

2.3 试验结果可靠性分析

为了检验模型隔墙模拟的可靠性,对隔墙进行了数值模拟,数值模拟使用大型软件ANSYS。计算

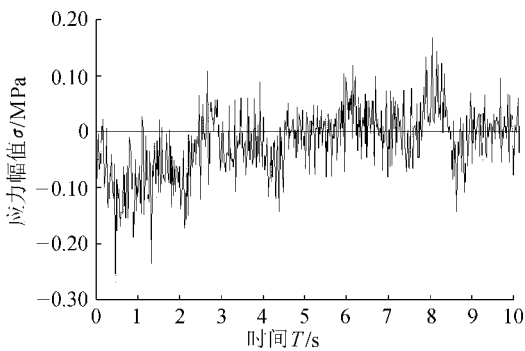


图4 工况2右隔墙动应力时程线

结果和试验结果的对比如表3所示,可以看出,计算出的隔墙干模态基频比实测干模态基频小5.3%,湿模态基频则小8.0%,说明试验值和计算值相差不大。

表3 隔墙基频试验值和计算值对比

模态	基频试验值/ Hz	基频计算值/ Hz	偏差/%
干模态	9.86	9.341	5.3
湿模态	9.28	8.536	8.0

同时还选择了向家坝水电站消力池中导墙试验结果^[8]作为比较,如表4所示。若视导墙结构为悬臂梁,可根据悬臂梁结构弯曲公式^[9]作简化处理得出如下判断标准:

$$E = \frac{5qL^3}{8\Delta_{AV}} \quad (18)$$

式中: E 为混凝土弹性模量; q 为最大动应力; I 为结构刚度,悬臂梁 $I = \frac{1}{12}bh^3$, h 为隔墙厚度, b 取单位长度; L 为悬臂梁长度; Δ_{AV} 为动位移均方根。

表4 不同工程项目的墙体弹性模量对比

工程项目	隔墙断面尺寸/m		动位移 均方根/ μm	最大 动应力/ MPa	E/GPa
	高	厚			
糯扎渡溢洪道隔墙	12	3	105.5	0.141	642
向家坝消力池中导墙	52	10	1300.0	1.330	1089

注: E 为判断标准。

由表4可以看出,以混凝土墙体弹性模量为标准的判断准则 E 相差不大,实际上二者墙体的材料弹性模量一致,考虑泄洪规模和水工建筑物结构的不同^[7-8],可以说明糯扎渡试验的结果是合理的。

2.4 泄槽隔墙泄洪振动影响分析

泄槽隔墙在工况1时的振动响应最大,其最大动位移均方根值为 $105.5\mu\text{m}$,最大动位移振幅(3σ)为 $316.5\mu\text{m}$ 。前苏联的一些学者曾提出按水工建筑物高度的 $1/100\,000$ 作为“允许振幅”^[10],若按此标准则隔墙的“允许振幅”为 $120\mu\text{m}$,隔墙的振动响应远大于其“允许振幅”。糯扎渡泄槽隔墙动位移的主频为 0.2Hz ,振幅为 $316\mu\text{m}$,根据Meister感觉曲线可知,处于微有感觉或相当有感觉状态。

泄洪振动引起的隔墙竖向最大动应力均方根值为 0.047MPa ,最大动应力振幅为 0.141MPa 。导墙结构流激振动的安全问题主要是疲劳破坏问题,对于混凝土在泄洪振动作用下的疲劳破坏问题,至今还没有成熟的理论。可取泄洪振动的“允许应力”为 0.45 倍的静力的允许应力值^[10],如静力条件下允许拉应力 $[\sigma]$ 取 1.2MPa ,则泄洪振动的允许拉应力可取 0.56MPa 。按此标准,可以认为泄洪振动不至于使溢洪道泄槽隔墙发生疲劳破坏。

3 结 语

试验结果表明,糯扎渡水电站溢洪道泄槽隔墙模型实测基频分别为 9.86Hz (干模态)及 9.28Hz (湿模态),第一阶振型垂直于水流方向。隔墙顶部最大泄洪振动响应发生在低泄量工况,其动位移均方根值达 $105.5\mu\text{m}$,若最大振幅取极差值 3σ ,则为 $316.5\mu\text{m}$,即瞬时最大振幅大于 $1/100\,000$ 的建筑物高度,根据Meister感觉曲线可知,处于微有感觉或相当有感觉状态。隔墙的最大动应力振幅(3σ)为 0.141MPa ,可以认为隔墙在溢洪道正常泄洪时不会发生疲劳破坏。

参考文献:

- [1] 黄涛. 水流压力脉动的特性及模型相似率[J]. 水利学报, 1993(1): 51-57.
- [2] 陈鸷. 脉动频率的相似率与厂房顶溢流的振动[J]. 华东水电技术, 1990(2): 20-26.
- [3] 赵耀南. 重力相似率水力模型中紊流微结构的相似率[J]. 水利学报, 1988(8): 70-76.
- [4] 练继建, 崔广涛. 水工结构水弹性模型模拟方法与应用[J]. 水利水电技术, 2001(12): 20-21.
- [5] 黄锦林. 三峡导墙流激振动仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 1997: 23-27.
- [6] 张蕊. 导墙流激振动研究及结构优化[D]. 天津: 天津大学, 2003: 54-71.
- [7] 天津大学建筑工程学院. 糯扎渡水电站整体及溢洪道护岸不护底水工模型试验研究报告[R]. 天津: 天津大学, 2006.
- [8] 天津大学建筑工程学院. 金沙江向家坝水电站消力池导墙振动及底板稳定性水弹性模型试验研究[R]. 天津: 天津大学, 2003.
- [9] 刘尔烈. 结构力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1996: 66-69.
- [10] 练继建, 崔广涛, 黄锦林. 导墙结构流激振动研究[J]. 水利学报, 1998(11): 33-37.

(收稿日期 2006-09-30 编辑 高建群)