

大比尺高拱坝泄洪振动水弹性模型研究

马 斌, 练继建, 杨 敏

(天津大学建工学院, 天津 300072)

[摘要] 以拉西瓦拱坝为工程背景,采用加重橡胶,建立了大比尺(1:100)的水弹性模型,全面模拟了“坝体-地基-库水-动荷载”四位一体流固耦联的振动系统。利用该水弹性模型,采用先进的测试手段和数据分析处理软件,对拉西瓦拱坝的模态以及多种泄洪工况下拱坝的振动响应进行全面的测试和分析。采用流激振动反分析方法,求得泄洪振动的等效荷载,得到整个结构的动力响应,最后对泄洪诱发的坝体振动影响作出了评估。

[关键词] 拉西瓦拱坝;水弹性模型;流激振动;振动响应;反分析

[中图分类号] TV32 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)11-0023-07

1 前言

随着我国西部大开发基本国策的建立,西南、西北等地区水电水利建设事业得到蓬勃发展,我国高拱坝枢纽建造的步伐也加大加快了。这些高拱坝往往具有高水头、高流速、大流量的特点,当渲泄洪水时,溢洪水流挟带着巨大动能自坝顶或孔口渲泄而下,在坝下水垫塘内通过水流的强烈紊动进行消能,从而使水垫塘底部及侧墙存在十分剧烈的紊流水压强脉动。这种水流的脉动荷载是否会通过基础和两岸基岩对高拱坝产生动力激励,导致坝身、坝肩产生不能容许的流激振动,是关系高薄拱坝工程安全的重大关键技术问题之一。

拉西瓦水电站高 250 m,地处高山狭谷。岸坡陡峭,水头高,尾水浅,水面窄,单位水体承受泄洪功率大。因此,对拉西瓦高拱坝水弹性模型试验研究,对坝身泄洪振动和结构的稳定性进行全面评价是十分必要的。一般来说,模型试验中缩尺影响是客观存在的,模型尺度愈大或模型愈大,其相似性愈好,缩尺影响就愈小。本文采用大比尺(1:100)建立“拱坝-地基-库水-动荷载”四位一体的水弹性模型,进行模态试验分析,以及直接测定坝体的泄洪

振动响应,通过反分析得到整个结构的振动响应,对拉西瓦高拱坝坝身泄洪的安全性进行评价。

2 水弹性模型模拟原理及模型设计

2.1 模拟原理

泄洪激振的水弹性试验模拟,是对“结构-地基-库水-动荷载”四位一体的流固振动系统的模拟,即要求同时满足“动荷载”输入系统相似和结构系统动力响应相似,也即要求满足水力学条件和结构动力学条件相似。

1) 水力学条件相似。水力学条件相似,即动荷载输入系统相似。诱发坝体振动的动荷载主要有 3 个部分:挑射水流冲击下游河床产生的强大的脉动压力;泄流引起的水垫塘波浪对坝体直接冲击的脉动荷载;表孔、中孔泄流壁面上的脉动压力。动荷载输入系统相似的实质就是按重力相似律设计的水力模型中脉动压力的相似律问题^[1]。

2) 结构动力学条件相似^[2]。结构动力学条件相似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,除了包括几何条件相似、物理条件相似、运动条件相似以外,还包括边界条件相似。对于水工建筑物而言,主要是地基模拟范围的

[收稿日期] 2008-01-02

[基金项目] 国家杰出青年科学基金项目(50725929);国家自然科学基金项目(50539060,50679052)

[作者简介] 马 斌(1979-),男,安徽宿州市人,博士,主要从事水利水电工程的研究

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,这一相似就能满足。

一般地,随机动荷载作用下结构的运动方程为

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = P(t) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad [K] = EL[Z]$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵,由结构质量和水附连质量组成,可将它分为结构质量矩阵 $[M_s]$ 和附连质量矩阵 $[M_w]$, 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); $[Z]$ 为由结构约束条件决定的无因次常数矩阵, L 为长度特征参数; $P(t)$ 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。

则式(1)可变为

$$[M_s]\ddot{u}(t) + [M_w]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + EL[Z]u(t) = \bar{P}(t) + P(t) \quad (2)$$

由式(2)可推得相应的比尺关系为

$$\frac{\lambda_{M_s}\lambda_v}{\lambda_t} = \frac{\lambda_{M_w}\lambda_v}{\lambda_t} = \lambda_c\lambda_v = \lambda_E\lambda_L\lambda_u = \lambda_F\lambda_L^2 = \lambda_p\lambda_L^2 \quad (3)$$

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。

因为系统按重力相似准则设计,则有

$$\lambda_t = \lambda_L^{0.5}, \lambda_F = \lambda_p = \lambda_L \quad (4)$$

又因为结构几何相似,有

$$\lambda_u = \lambda_L \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(1)可得

$$\lambda_{M_s} = \lambda_{\gamma_s} \cdot \lambda_L^3 = \lambda_{M_w} = \lambda_{\gamma_w} \cdot \lambda_L^3 = \lambda_c\lambda_v = \lambda_E\lambda_L^2 = \lambda_L^3 \quad (6)$$

式中, λ_{γ_s} 为结构容重比尺; λ_{γ_w} 为液体容重比尺。

考虑到原型与模型的液体容重相同(都是水),则有 $\lambda_{\gamma_w} = 1$, 代入式(6)可得

$$\lambda_{\gamma_s} = 1, \lambda_c = \lambda_L^{2.5}, \lambda_E = \lambda_L \quad (7)$$

式(7)中 $\lambda_c = \lambda_L^{2.5}$, 用阻尼比 $\xi = C/C_c$ 的比尺 ($C_c = 2M\omega_0$) 表示,则等价于 $\lambda_\xi = 1$ 。

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 $\lambda_{\gamma_s} = 1$; $\lambda_E = \lambda_L$; $\lambda_\xi = 1$; $\lambda_\mu = 1$, 并合理地选取水域和地基的模拟范围来保证结构动力响应系统的相似。

由于水弹性模型材料采用加重橡胶,其阻尼比和泊松比都偏大,各阶模态阻尼比一般在 5% ~ 10%, 平均约 6.77%, 泊松比为 0.35 ~ 0.40, 而实

际的水工结构(如东江、泉水双曲拱坝等)的阻尼比为 2% 左右,混凝土材料的泊松比为 0.167, 因而在水弹性模型模拟中,需对阻尼比和泊松比不相似的影响进行修正^[3]。其方法是根据实测的动位移响应值和模型的阻尼比和泊松比的实测值,采用反分析方法,求出动力荷载,再根据实际工程结构的阻尼比和泊松比求解动力响应。考虑阻尼比修正后,即阻尼比为 2%, 7% 的动位移响应相比,顶拱拱冠点的动位移均方根值增加了 24%; 考虑泊松比修正后,顶拱拱冠点动位移均方根值增加约 10%。

2.2 模拟范围的确定

在水工结构的水弹性模型试验中,水弹性模型对原型结构地基的模拟范围和材料特性直接影响试验成果的准确性和可信度。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,但在试验中为节省工作量和试验投资,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,从而确定合适尺寸。

原型混凝土的容重取为 $2.4 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, 弹性模量为 26 GPa, 动弹模为 33 GPa, 模型坝体材料的容重控制在 $2.40 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 左右, 动弹模控制在 330 MPa 左右。

建立多组地基范围不同的拱坝-地基有限元模型,研究地基模拟范围的变化对结果的影响。研究表明:a. 基础模拟范围对拱坝自振特性的影响相对较小,当模拟范围在深度方向大于 $1/2H$ 、在上游方向大于 $0.4H$, 下游至二道坝, 坝肩方向大于 $1/3H$ 时,其拱坝前 5 阶频率与深基础(地基深度大于 1 倍坝高)的相比,其误差皆在 4% 以内。b. 基础模拟范围对拱坝泄洪振动响应的影响相对较大,特别是模拟深度的影响尤为显著。当深度模拟范围大于等于 $0.7H$, 上下游范围大于 $0.4H$, 坝肩方向大于 $1/3H$ 时,基本可较好地模拟拱坝动力响应。

3 水弹性模型模态试验分析

水弹性模型包括拱坝、地基和水垫塘三部分,试验模态分析主要是针对拱坝进行的。拉西瓦拱坝水弹性模型规模较大,所用的材料是加入重晶石硫化成的橡胶块体。这种材料阻尼较大,复模态特征明显,模态耦合密集,通常表现为一定的非线性。为了能够较好地测试拱坝模态,布置了 76 个测点,如图 1 所示。

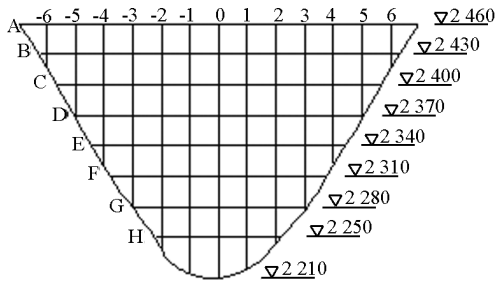


图1 水弹性模型试验测点布置图

Fig. 1 The scheme of measurement location in the hydroelastic model experiment

试验采用冲击锤振方法,单点激振、多点拾振的测试方法。激振点选取 D-1 点。模态测试分空库和满库两种工况进行,模态相应称作“干模态”和

“湿模态”。对获得的激励和响应信号进行分析处理,通过曲线拟合识别出水弹性模型的模态参数和振型。前 5 阶模态的频率和阻尼比如表 1 所列。

从成果看空库、满库情况下自振频率变化合乎一般规律。在满库条件下比空库的自振频率降低约 15 % (基频)。表 2 所示为各拱抽基频的类比情况,由表 2 可知,拉西瓦拱坝基频明显高于二滩^[2]和小湾^[4],但是与构皮滩^[5]接近,这主要是因为拉西瓦拱坝的弧高比及厚高比略小于构皮滩拱坝的弧高比及厚高比,而远小于二滩、小湾拱坝,这样河谷地形对拱坝的约束作用较强,导致基频较高。从振型图看出,拉西瓦坝体形,厚高比为 0.193,具有明显的薄拱坝特征;自振频率低,相邻振型密集和拱的作用明显,基本振型为反对称型式,这都是薄拱坝的一般规律。

表 1 实测模态频率和阻尼比

Table 1 The frequency and damping ratio from modal test

模态阶数	空库				满库				频率下降 $\frac{f_{干} - f_{湿}}{f_{干}}$
	频率/Hz		阻尼比/%	模态振型	频率/Hz		阻尼比/%	模态振型	
	模型	原型			模型	原型			
1	18.05	1.80 (1.79)	4.81	反对称	15.24	1.52 (1.46)	5.44	反对称	15.6 %
2	18.64	1.86	9.41	正对称	17.27	1.73	8.96	正对称	7.0 %
3	28.67	2.87	0.54	正对称	21.91	2.19	1.36	正对称	23.7 %
4	31.68	3.17	11.1	反对称	30.10	3.01	4.54	反对称	5.05 %
5	37.09	3.71	8.44	反对称	35.62	3.56	5.96	反对称	4.04 %

注:括号内为三维有限元数值计算结果。

表 2 各拱坝基频类比

Table 2 Analogy of basic frequency of arch dams

工程名称	坝高/m	坝顶弧长/m	弧高比	厚高比	拱冠梁底厚度/m	最大底厚/m	基频	
							空库	满库
二滩	240	775	3.23	0.232	55.7	58.51	1.3	1.1
小湾	292	923	3.16	0.250	72.9	72.9	1.24	1.06
构皮滩	231	557	2.40	0.216	50.3	58.6	2.00	1.67
拉西瓦	250	459	1.84	0.193	48.3	48.3	1.80	1.52

4 拱坝泄洪引起的坝体振动研究

4.1 概况

拉西瓦拱坝泄洪方案为坝身表孔和深孔集中泄洪,坝下游为水垫塘消能。不同的泄洪工况水流引起的动荷载特性和作用方式均不同,诱发的坝体振动也不同。为了全面了解拉西瓦拱坝泄洪振动响应特性,

分 4 种工况进行模拟试验。a. 校核水位表孔、深孔联合泄洪;b. 设计水位表、深孔联合泄洪;c. 设计水位表孔单独泄洪;d. 设计水位中孔单独泄洪。在坝顶下游面布置 13 个测点(A-6~A6),下游拱冠梁处布置 4 个测点(C0, D0, E0 和 F0)。大坝的振动是三维空间运动,但是以往试验及计算结果表明大坝的垂向振动较小^[6,7],而切向振动不易测量,因而振动响应测试以测量坝体径向的振动为主。

4.2 成果分析

拱坝坝顶各测点在各种泄洪工况下的测试结果如图2、图3所示,与二滩现场试验对比结果见表3。

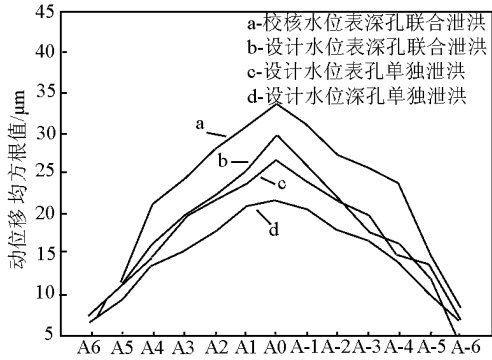


图2 不同工况下坝顶测点振动位移

Fig. 2 Vibration displacement of crest under different operating conditions

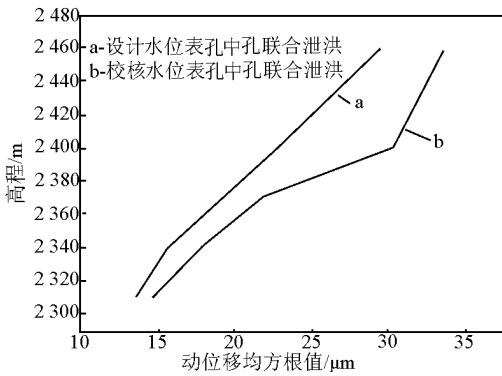


图3 不同工况的拱冠梁测点振动位移

Fig. 3 Vibration displacement of crown cantilever under different operating conditions

由测试结果可以看出:

1) 拉西瓦拱坝泄洪时坝体的动力响应不大。拱坝泄洪振动的动位移以校核水位下,表深孔联合泄洪时,所诱发的振动响应最大,其动位移均方根值为 $33.6 \mu\text{m}$,发生在顶拱中部。这与二滩拱坝现场实测的振动响应值 $38.11 \mu\text{m}$ 大致属同一水平,可认为模型试验的结果是可信的。

2) 设计水位下,3种泄洪工况中,表深联合泄洪时的泄洪振动最大,表孔单独泄洪次之,深孔单独泄洪最小。表深联合泄洪时由于既存在表孔的脉动荷载,又存在深孔的脉动荷载,还有水垫塘脉动荷载,3种荷载共同诱发坝体振动,振动量大是必然的。表孔、深孔单独泄洪时,表孔上的脉动荷载作用位置高,坝体单薄,而深孔的脉动荷载作用位置低,坝体又厚

实,而且表孔泄洪的功率大于深孔,其水舌入水垫塘位置离坝体近,在水垫塘中产生的坝面脉动压力和随机波浪荷载都较大,又由于“鞭梢效应”使得表孔单独泄洪时诱发的坝体振动比深孔单独泄洪时大。

3) 各工况下拱坝泄洪振动的动位移最大值均在坝顶中部,且响应值向两岸以及向下而衰减。

表3 拉西瓦水弹试验与二滩现场试验的对比

Table 3 Comparison between Laxiwa hydroelastic model experiment and Ertan field test

工程	二滩 2,3,4,5号中孔, 泄洪方式	拉西瓦 3号 表孔 2号中孔
测点	坝顶拱冠	38.11 μm
位置	中孔	20.95 μm
		33.6 μm
		21.8 μm

4) 拱坝泄洪动力响应时程线及功率谱如图4、图5所示,动位移响应的峰值主要集中于两个频段,其一为 $18 \sim 21 \text{ Hz}$ (原型 $1.8 \sim 2.1 \text{ Hz}$) 区段,这正是拱坝满库时前3阶振型所对应的拱坝自振频率段。其二为 $2 \sim 4 \text{ Hz}$ (原型 $0.2 \sim 0.4 \text{ Hz}$) 区段,该区段主要反映水流激振荷载的影响。

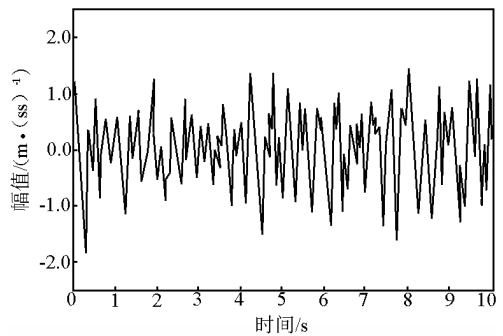


图4 典型的振动位移响应时间历程

Fig. 4 Typical time history of vibration response

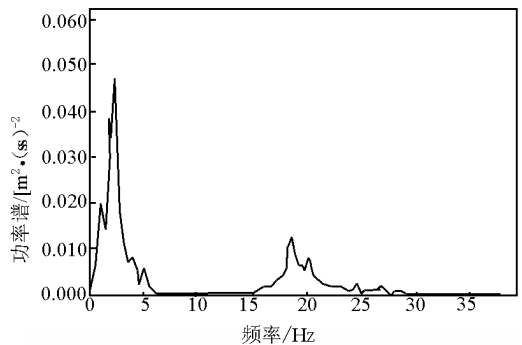


图5 典型的振动位移响应功率谱曲线

Fig. 5 Typical power spectrum of vibration response

5 泄洪激振动力响应的反分析

5.1 流激振动响应的反分析方法^[3]

将结构离散成有限多个自由度,其在随机荷载作用下的运动微分方程式(1),可分解为 n 个独立单自由度系统的振动方程:

$$\delta_j + 2\xi_j\omega_j\delta_j + \omega_j^2\delta_j = F_j(t)/M_j \quad (8)$$

$$(j=1,2,\dots,q)$$

式中, ω 为结构第 j 阶振型圆频率; ξ_j 为结构第 j 阶振型阻尼比; $F_j(t)$ 为结构第 j 阶振型随机荷载作用分量。

由单自由度振动方程可求得第 j 阶振型的瞬态反应解:

$$\delta_j(t) = \int_0^t h_j(t-\eta)F_j(\eta)d\eta \quad (9)$$

式中, $h_j(t)$ 为体系单位脉冲响应函数。任一结点 k 的位移响应历程为:

$$V_k(t) = \sum_{j=1}^q \varphi_{kj} \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \int_0^t h_j(t-\eta)P_i(\eta)d\eta \quad (10)$$

由任一点位移反应的自相关函数进行傅立叶变换,考虑各阶振型的独立性,得到位移反应的功率谱密度函数:

$$S_{vk}(\omega) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^n \varphi_{kj}^2 \varphi_{ij}^2 S_{p_{ii}}(\omega) |H_j(\omega)|^2 \quad (11)$$

位移响应均方根值为

$$V_k = \sqrt{D_{V_k}} = \sqrt{\int S_{vk}(\omega)d\omega} \quad (12)$$

以上为流激振动的正分析方法,它是流激振动的反分析方法的基础。以下讨论反分析方法。假定有 K 个测点的动位移实测值,需反馈 N 个激励荷载,将式(11)展开为

$$\sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{kj}^2 \varphi_{1j}^2 S_{p_{11}}(\omega) + \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{kj}^2 \varphi_{2j}^2 S_{p_{22}}(\omega) + \dots + \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{kj}^2 \varphi_{Nj}^2 S_{p_{NN}}(\omega) = S_{vk}(\omega) \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

即得

$$\begin{bmatrix} A_{11}(\omega)A_{12}(\omega)\cdots A_{1N}(\omega) \\ A_{21}(\omega)A_{22}(\omega)\cdots A_{2N}(\omega) \\ \vdots \\ A_{K1}(\omega)A_{K2}(\omega)\cdots A_{KN}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{p_{11}}(\omega) \\ S_{p_{22}}(\omega) \\ \vdots \\ S_{p_{NN}}(\omega) \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{Bmatrix} S_{v1}(\omega) \\ S_{v2}(\omega) \\ \vdots \\ S_{vK}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{其中, } A_{11}(\omega) = \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{1j}^2 \varphi_{1j}^2,$$

$$A_{21}(\omega) = \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{2j}^2 \varphi_{1j}^2, \dots,$$

$$A_{KN}(\omega) = \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{Kj}^2 \varphi_{Nj}^2$$

当 $K < N$ 时,即所测得动位移测点个数小于要反馈求解的面脉动荷载个数,则以上方程解不唯一,需分析荷载的重要性、分清主次或分析荷载间的相互关系,减小需求解荷载个数,使 $K \geq N$ 。

当 $K = N$ 时,即所测得动位移测点个数等于要反馈求解的面脉动荷载个数,则直接求解方程(14)可得出唯一解。

当 $K > N$ 时,即所测得动位移测点个数大于要反馈求解的面脉动荷载个数,则没有严格意义上的解,只能求其近似解。求解问题可归结为求 $\{x\}^T = \{S_{p_{11}}, S_{p_{22}}, \dots, S_{p_{NN}}\}$ 使动位移响应谱的计算值 S_{vk} 与实测值 S_{vk}^* 误差的加权平方和最小,即

$$S = \sum_{k=1}^K \theta_k (S_{vk} - S_{vk}^*)^2 \rightarrow \varepsilon \quad (15)$$

θ_k 为各测点的权重,一般可取 $\theta_k = 1$,由极小值条件 $\partial S / \partial S_{p_{ii}} = 0$,可得方程组 $A' \{x\} = B'$ 。

$$\text{其中, } A'_{ij} = \sum_{k=1}^K \theta_k A_{ki} A_{kj}, B'_{i'} = \sum_{k=1}^K (\theta_k A_{ki} S_{vk}^*) \quad (i, j = 1, \dots, N)$$

针对不同 ω 值,求解上式方程可得各脉动荷载的功率谱图。基于得到各脉动荷载的功率谱图进行正分析可以求得整个结构的动力响应。

5.2 拉西瓦拱坝流激振动响应的反分析

传统的正分析方法分析泄洪诱发拱坝振动问题时,考虑的激振源一般有 3 个:泄流孔口脉动压力、泄流冲击水垫塘底板产生的冲击压力以及泄流水能在水垫塘中引起的涌浪对下游坝面的作用。3 种荷载源的大小、位置、方向不同,各自对坝体的作用也不一样,试验中难以将 3 种振源的响应分开测量。因此采用等效荷载场来计算引起拱坝振动的综合荷载效应,即采用单一荷载场来计算 3 种荷载的等效作用,故称为等效荷载场。由于该荷载场是由拱坝振动的综合响应计算的,故等效荷载场包含了孔口脉动压力、冲击作用、波浪作用 3 种振动荷载源的等

效成分。

选取在水垫塘水舌落点附近的有限元结点作为单点激励的等效荷载施加点,经反分析计算得到的等效荷载谱如图6所示。由图7可知,坝体各测点动位移的实测值与计算值吻合较好,说明反分析计算得到的等效荷载场的意义是显著的。

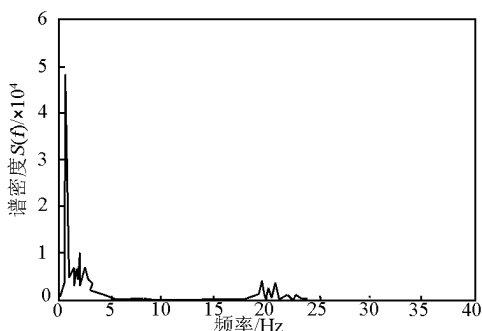


图6 等效荷载谱

Fig. 6 Equivalent load spectrum

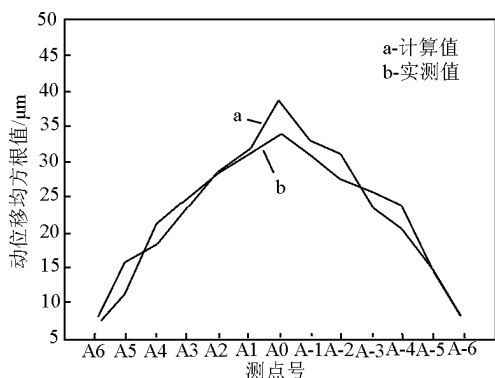


图7 泄洪振动响应实测值与计算值比较

Fig. 7 Comparison of vibration response between calculation and experiment

6 泄洪振动安全评价

对于振动危害的评估,一是评估对建筑物自身的危害,二是评估对环境(其他结构、设备)或人体的危害,应主要考虑泄洪振动位移的评估,目前水利界还没有一个振动位移的统一标准。前苏联的一些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”,按此标准则拉西瓦拱坝的“允许振幅”应为2.5 mm,但是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。另外,还有一些研究者认为 $10^{-5}H$ 的标准适用于三级水工建筑物,对于一级建筑物如拱结构应将位移标准提高2

$\times 10^{-6}H^{[8]}$,按此标准拉西瓦拱坝的“允许振幅”应为0.5 mm。拉西瓦拱坝泄洪即使在渲泄校核洪水时,其坝顶最大振幅均方根值也只有100.8 μm ,常遇洪水引起的振动响应则更小。故可认为,拉西瓦拱坝坝身泄洪激励的坝体振动不会影响大坝的安全,所采用的坝身泄洪、水垫塘消能方式,从流激振动的角度来看是安全的。

7 结语

1)根据水力学的重力相似和结构动力学的弹性相似条件,建立了较之国内其他水弹性模型更高级比尺的拉西瓦1:100水弹性模型。试验成果表明,大比尺的水弹性模型性能优良,能更好地反映拉西瓦拱坝-地基-水库-动荷载耦合系统的动力特征,能有效地模拟该拱坝的动力问题。

2)拉西瓦拱坝试验模态分析结果表明,拱坝空库和满库条件下的基频分别为1.80 Hz和1.52 Hz,由于流固耦合的影响,大坝满库频率比空库降低约15%,二者均为反对称振型,而且坝体相邻模态密集。这与三维有限元动力分析成果相吻合。

3)采用流激振动反分析方法,计算出等效荷载(场),可得到整个结构在水流动水荷载作用下的动力响应,为拱坝泄洪振动的安全评估、预测及监控提供一个有效的手段。

4)利用水弹性模型,进行了坝身泄洪流激振动的模拟试验,得出了各泄洪工况拱坝动力响应的定量估计。拱坝泄洪所诱发的坝体振动响应不大。在校核水位和设计水位下,表孔和深孔联合泄洪,坝身的最大动位移均方根值分别为33.6 μm 和29.5 μm ,相应的最大振幅为100.8 μm 和88.5 μm ,因而不会危及拱坝安全。

参考文献

- [1] 赵耀南.重力相似水力模型中紊流微结构的相似律[J].水利学报,1988,(8):42-50
- [2] 崔广涛,林继铺,彭新民,等.二滩拱坝泄洪振动水弹性模型研究[J].天津大学学报,1991,(1):1-10
- [3] 练继建,崔广涛,董淑芳.水工流激振动响应的反分析[J].水利水电技术,1998,(8):51-54
- [4] 崔广涛,彭新民,苑希民,等.高拱坝泄洪振动水弹性模型[J].水利学报,1996,(4):1-9
- [5] 天津大学水利系.乌江构皮滩水利枢纽拱坝泄洪水弹性模型研究[R].天津:天津大学,1996
- [6] 骆少泽,陈发展,阎诗武.东风水电站泄洪振动原型观测[J].振动工程学报,2001,14(增刊):146-149

Hydroelastic model experimental study on large scale high arch dam vibration by discharge flow

Ma Bin, Lian Jijian, Yang Min

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[**Abstract**] Scale effect exists in the model experiment, so large-scale model is generally utilized to reduce the scale effect. Based on Laxiwa arch dam, the hydroelastic model with a scale of 1:100 is built, which is made of weighted rubber. The fluid-structure coupling system consisted of dam, foundation, water and fluctuation pressure is simulated overall. Some advanced testing equipment, technique and data processing software were used. Overall test and analysis of the modals and vibration response of dam and appurtenant structure under several working conditions were performed. The equivalent load is determined by inverse analysis method for flow induced vibration, then the dynamic response of the dam is obtained and influence of flow-induced vibration is assessed.

[**Key words**] Laxiwa arch dam; hydroelastic model; flow-induced vibration; vibration response; inverse analysis