

水口水电站升船机塔楼结构动力试验研究及数值分析

何 衡 李同春

(河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 采用振动台动力模型试验和有限元数值计算 2 种方法 ,对水口水电站升船机塔楼结构的抗震性能进行分析研究 ,综合评价升船机塔楼结构的抗震安全性 .结果表明 :模型试验和有限元计算的结果基本一致 ,可为结构的抗震设计提供科学的依据 .

关键词 水电站 ;升船机 ;塔楼结构 ;模型试验 ;有限元计算

中图分类号 :TV31 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2005)06-0642-04

水口水电站位于福建省闽江干流 ,升船机布置在枢纽右岸 ,是整个枢纽的重要建筑物之一 .塔楼结构是升船机的主体建筑物 ,它由提升段 (两段)、平衡重段 (两段)和交通楼梯段组成 ,总高度(包括基础底板和顶部厂房)为 91.4 m.对于升船机塔楼这种高耸结构 ,就其抗震性能进行深入研究是非常必要的^[1~9].本文采用数值计算和模型试验两种方法研究升船机塔楼结构的应力和变形 ,可为结构的抗震设计提供科学、合理的依据 .

1 升船机结构动力模型试验研究

1.1 试验内容及试验方法

试验内容主要为 (a)确定升船机塔楼结构的固有动力特性(包括自振频率、振型) (b)选定实测唐山地震波和按 SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》生成的人工地震波 ,作为输入地震波 ,在地震烈度为Ⅶ度情况下 ,分析研究升船机塔楼结构在遭受地震作用时的结构地震响应 ,包括应力、加速度、位移反应 ,其中船厢位置分别位于上、中、下 3 个高程 .

原型结构的塔楼采用 C20 号混凝土 ,动弹性模量为 3.0×10^4 MPa ,泊桑比为 0.167 ,钢筋混凝土密度为 2500 kg/m^3 .设计地震烈度为Ⅶ度 ,地面运动最大加速度为 $0.1g$ (g 为重力加速度) .考虑到物理模型试验是在线弹性范围内 ,因此采用 $C_\epsilon \neq 1$.在综合考虑了试验设备条件之后 ,主要原型、模型相似常数选定如下 :几何尺寸 $C_L = 50$,密度 $C_\rho = 1.67$,应变 $C_\epsilon = 9.77$,加速度 $C_a = 1$ 等 .

模型试验选取下游特征段 ,仅模拟塔楼提升段、平衡重段其中的一半 .提升段由于机械设备布置要求 ,上部设有 3 根连接大梁和机房 ,平衡重段上部未设连接大梁而仅设有机房 .在▽43.5 m 高程以下 ,塔楼两侧出现外边墙 ,在▽32.0 m 高程以下 ,塔楼右岸与高基岩相连 ,组成复杂结构体系 .试验时 ,模拟了船厢及船厢的平衡重 .选取了塔楼结构的典型剖面布置加速度、位移、应力测点 ,典型立剖面 A-A 到 H-H ,典型横剖面高程为 74.0 m ,71.0 m ,60.0 m ,43.5 m ,32.0 m ,16.0 m 和 1.64 m .典型剖面及测点布置见图 1~2 .

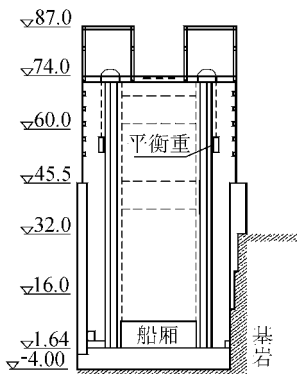


图 1 典型立剖面

Fig.1 Typical elevation

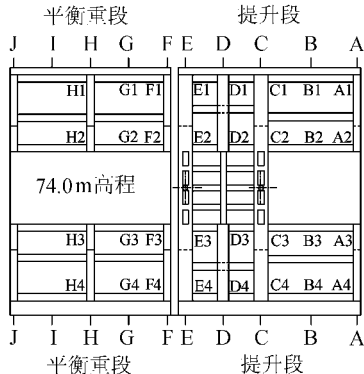


图 2 典型横剖面

Fig.2 Typical cross section

确定结构自振特性的研究采用了敲振法和振动台激励 2 种方法. 敲振法是通过 对结构各敲击点的频率响应函数的分析, 求得结构的各阶模态参数. 振动台试验是在结构基底输入 加速度峰值为 $0.15\text{ g} \sim 0.2\text{ g}$ 的正弦波或白噪声随机波, 其频宽为 $5 \sim 80\text{ Hz}$, 振动持时大于 30 s , 同时记录振动台响应信号和布置在结构上的各有关部位众多的加速度传感器响应信号, 进行各点的函数分析, 求得结构的各阶模态参数. 在试验研究中, 敲振法和振动台激励 2 种方法得到的结果一致.

在比例阻尼假设条件下, 系统的激励和响应信号间的频响函数可表示为

$$H(f) = \sum_{i=1}^m \frac{\Phi_{ri} \Phi_{pi}}{k_i \left(1 - \frac{f^2}{f_i^2} + j 2 \tau_i \frac{f}{f_i} \right)}$$

(1)

式中: r ——结构第 r 测点; p ——激振点; m ——所需考虑的模态阶数; τ_i , f_i ——第 i 阶模态阻尼比、自振频率; Φ_{ri} , Φ_{pi} ——第 i 阶模态在 r , p 点处的振型矢量; k_i ——第 i 阶模态刚度.

1.2 结构自振特性

试验测得的升船机塔楼结构自振特性(船厢位于塔楼中部) 列于表 1. 船厢位置位于塔楼的不同高程(上、中、下) 对结构的自振特性的影响不明显. 结构动力特性均以水平振动为主, 在所分析的频段内, 未发现以垂直振动为主的 结构动力特性.

分析结构自振特性可知, 提升段与平衡重段以及平衡重段本身左右岸两个结构部分, 基本上是独立工作的, 具有各自独立的动力特性. 平衡重段左岸部分是高耸的悬臂薄板结构, 基频较低, 为 0.89 Hz . 平衡重段右岸部分由于其底部至 32.0 m 高程已与高基岩相连接, 结构较矮, 与左岸相比, 基频较高, 为 1.43 Hz . 提升段在 C、D、E 立剖面顶部有 3 根连接大梁把结构连成一框架结构, 基频介于平衡重段左、右岸结构的基频之间, 为 1.26 Hz . 顶部机房分别在 2.21 Hz 和 4.59 Hz 发生局部振动, 平面上呈现为对称和反对称型, 各阶自振频率及振型见图 3.

表 1 升船机塔楼结构自振频率的试验值
Table 1 Tested natural frequencies of tower of ship lift

阶次	自振频率/Hz		
	提升段	平衡段(左)	平衡段(右)
一	1.26	0.89	1.43
二	1.76	1.79	2.47
三	2.21	4.27	
四	3.39	5.25	5.17
五	4.28		
六	4.59		

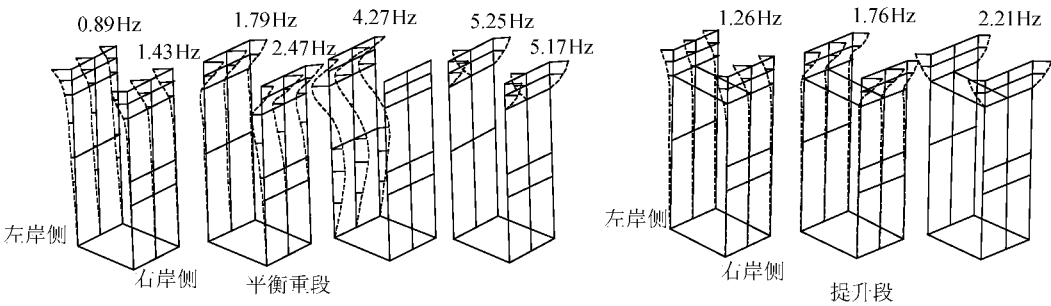


图 3 塔楼结构各阶自振频率及振型
Fig.3 Natural frequencies and mode shapes of tower

1.3 结构动力反应

地震模拟振动台输入的地震波采用 2 条加速度地震波: 人工地震波和实测唐山地震波. 人工地震波阻尼比取 5% , 时间 T 经时间(周期) 相似常数换算后, 得模型所要求的设计反应谱 RRS , 再设计生成人工波. 频率范围为 $5 \sim 100\text{ Hz}$, 振动持时 3 s , 水平加速度取 0.1 g , 垂直加速度为 $1/15\text{ g}$. 实测唐山地震波为 10 s , 经时间比尺压缩后为 0.45 s , 同样水平加速度调整为 0.1 g , 而垂直加速度为 $1/15\text{ g}$.

试验时, 人工波和唐山波的水平、垂直加速度时程同时输入振动台系统, 分别量测船厢位于结构上部、中部、下部时的结构各部位应变响应、加速度响应和位移响应. 表 2 和表 3 分别列出了船厢位置位于塔楼中部时结构的动力反应.

2 升船机塔楼结构数值计算分析

2.1 计算方法

动力分析中自振特性(包括自振频率和振型) 是采用直接滤频法计算的, 动力反应(包括应力、加速度、位

表2 主要高程最大动应力反应的试验值

Table 2 Maximum dynamic stress responses at main elevations														MPa
地震波	平衡段最大动应力						提升段最大动应力							
	74.0 m			43.5 m		1.64 m		74.0 m			43.5 m		1.64 m	
	左岸	右岸	连接大梁	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸	连接大梁	左岸	右岸	左岸	右岸
人工波	0.46	0.5	10.2	2.67	1.98	2.17	1.93	1.78	2.90	12.3	2.14	3.72	1.74	1.22
唐山波	0.60	0.7	12.1	2.92	3.83	2.89	2.56	3.39	4.96	20.3	2.54	5.15	2.89	2.03

移)采用振型迭加法计算,该法计算时将动力平衡方程按正交性原理变换为含振型分量的动力平衡方程,其方程阶数取用振型阶数,使得问题求解大大简化.振型叠加法用 wilson- θ 逐步积分法根据已知的地震加速度曲线计算各振型分量(包括一阶导数和二阶导数)随时间的变化值,然后按振型迭加原理计算每一时刻的应力、加速度、位移等量值.

地震输入同试验一样,仍采用人工波和唐山波.

塔楼主体结构(包括侧墙底板及地基)采用8节点块体单元模拟,提升段连接大梁和机房框架,按梁单元模拟,在梁单元和块体之间采用连接单元过渡.地基模拟范围,在深度方向取0.8倍底板宽度,3个周边由底板向外延伸0.5倍底宽,右岸高基岩部分向外延伸1.0倍底板宽度,所有地基截断边界均取为固定边界.

2.2 动力反应

2.2.1 结构自振特性

在计算中,假设地基无质量,机电荷载(包括卷扬机基础荷载、重力平衡块重及船厢重)作为集中质量施加.塔楼(包括底板、塔柱、顶部厂房及连接大梁)的质量按有限元中的“集中质量矩阵”计算.计算得到的塔楼提升段与平衡重段的自振频率(船厢中)见表4.

2.2.2 结构动力反应

在唐山波、人工波作用下结构的动力反应(包括动应力、动位移、最大加速度)与试验规律是一致的.典型高程处的垂直方向最大动应力见表5;74.0 m高程平衡段、提升段左岸、右岸最大位移和加速度反应见表6.

表5 主要高程的最大动应力反应的计算值

Table 5 Maximum dynamic stress responses at main elevations												MPa
地震波	平衡段最大动应力						提升段最大动应力					
	74.0 m		43.5 m		1.64 m		74.0 m		43.5 m		1.64 m	
	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸
人工波	0.14	0.14	2.33	1.64	1.53	0.05	0.21	0.20	1.72	2.36	1.12	0.09
唐山波	0.19	0.29	3.01	3.14	2.47	0.01	0.37	0.30	1.81	4.61	2.12	0.02

3 成果分析

a. 在动力试验过程中,对于如地基采用无刚度、边界完全固定等理想化条件,不可能绝对模拟,而在数值分析中很容易实现,因此数值分析与模型试验的结果不可能完全一致.

b. 动力试验中地基(包括右岸高岩基地基)由于边界无约束,在地震输入时会有较小的响应放大,而不可能如计算中假设的地基有约束且无质量,故试验时测得的结构动力响应(应力、位移、加速度)比计算值

表3 74.0 m高程最大位移、加速度反应的试验值

Table 3 Maximum displacement and acceleration responses at elevation 74.0 m								
地震波	平衡段				提升段			
	位移/mm		加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)		位移/mm		加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	
	左	右	左	右	左	右	左	右
人工波	20	10	2.7	2.4	15	10	2.7	2.9
唐山波	30	13	3.1	3.9	22	17	3.7	3.7

表4 塔楼提升段与平衡重段的自振频率的计算值

Table 4 Calculated natural frequencies of lifting section and counterweight section of tower			
阶次	自振频率/Hz		
	提升段	平衡段(左)	平衡段(右)
一	1.43	0.93	1.63
二	1.80	1.84	2.68
三	2.31	4.05	4.3
四	3.57	4.43	4.54
五	4.30		
六	4.95		

表6 74.0 m高程最大位移、加速度反应的计算值

Table 6 Maximum displacement and acceleration responses at elevation 74.0 m								
地震波	平衡段				提升段			
	位移/mm		加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)		位移/mm		加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	
	左	右	左	右	左	右	左	右
人工波	16.0	5.0	1.35	1.30	12.0	9.0	1.70	1.07
唐山波	29.0	8.0	1.85	1.50	19.0	14.0	2.24	1.89

比计算值

- 略高.
- c. 动力试验测得提升段六阶自振特性 ,平衡重段七阶自振特性 ,其中有整体特性 ,也有局部振动 .这些与计算结果基本一致 ,而数值上略小 .
- d. 唐山波输入时的结构响应(应力、位移、加速度)均比人工波输入时大 ,计算、试验的结构响应规律基本一致 .
- e. 从有连接大梁的提升段与无连接大梁的平衡段的比较得到如下印象 :加有连接大梁的提升段在 43.5 m 高程处应力变化较明显 ,左岸应力集中现象和缓 ,应力值降低 ,右岸则应力集中现象更明显 .结构左、右侧顶部位移得以均化 ,有所降低 .大梁与板柱连接处应力加大 ,顶部机房排架柱根部应力较大 .

4 结 语

- 采用模型试验与数值计算 2 种方法 ,对水口水电站升船机塔楼结构的抗震性能进行了研究 ,结果表明 :
- a. 试验与计算所得结构的自振特性(自振频率、振型) 结构动力响应(应力、位移、加速度)分布规律基本一致 .
- b. 在 43.5 m 高程处 ,由于塔楼结构发生突变 ,因此出现应力集中现象 ,通过对提升段和平衡段的比较 ,加有连接大梁的提升段 ,顶部位移较没有加连接大梁的平衡段低 ,但局部应力增加较多 .建议在结构应力变化明显的部位加强配筋 ,或局部改变该处截面面积 ,以缓和应力集中现象 .
- c. 研究结果可作为结构抗震设计的依据 .

参考文献 :

[1] 龙海飏 ,吴红华 . 垂直升船机筒柱部分地震位移反应的计算分析 [J]. 湖北水力发电 , 2004(4) :45—47 .

[2] 易方民 ,高小旺 ,张维瘦 ,等 . 高层建筑钢结构在多维地震动输入作用下的反应 [J]. 建筑结构学报 , 2003 ,24(3) :33—43 .

[3] 李德玉 ,侯顺载 ,张艳红 ,等 . 龙羊峡重力拱坝动力特性和抗震安全评价 [J]. 土木工程学报 , 2003 ,36(10) :41—45 .

[4] 解伟 ,夏颂佑 . 漫湾电站 GIS* 楼动力整体模型试验及与有限元数值分析的比较 [J]. 华北水利水电学院学报 ,1998 ,19(2) :5—8 .

[5] 胡文俊 ,张楚芳 . 三峡升船机上闸首结构动力试验研究及数值分析 [J]. 地震学刊 , 1997(4) :40—46 .

[6] 张燎军 ,傅作新 ,朱岳明 ,等 . 三峡升船机上闸首结构抗震分析研究 [J]. 水力发电 , 2000(4) :19—23 .

[7] 平静 . 水口水电站垂直升船机闸首挡水闸门 [J]. 水力发电 , 1997(7) :32—35 .

[8] 李克文 ,贺雯 ,陈安元 ,等 . 高层结构抗震试验研究 [J]. 武汉水利电力大学学报 , 1999 ,32(6) :85—91 .

[9] 彭翠玲 ,李声平 ,吴杰芳 ,等 . 水布垭水电站进水塔结构抗震分析与安全评估 [J]. 长江科学院院报 , 2005 ,22(2) :50—52 .

Dynamic test research and numerical analysis on tower structure of ship lift for Shuikou Hydropower Station

HE Heng , LI Tong-chun
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The dynamic vibration model experiments and FEM-based numerical calculation were adopted to study the aseismic performance and further to comprehensively evaluate aseismic safety of the tower structure . The results from model test and finite element calculation are in good agreement with each other . The research can provide a scientific basis for aseismic design of structures .

Key words :hydropower station ; ship lift ; tower structure ; model test ; finite element calculation