

三峡升船机上闸首的自振特性分析

张燎军¹,傅作新¹,钮新强²

(1. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2. 长江水利委员会,湖北 武汉 430010)

摘要:导出三峡升船机上闸首闸墙、航槽和工作门上动水压力附加质量的统一算式,利用直接滤频法分别求解上闸首顺河向和横河向的自振特性,并对上闸首在空库和满库时的自振特性进行比较分析.分析结果表明:上闸首结构振动时,起决定作用的是第 1 阶振型,水体在动水压力作用下结构的自振频率将有所降低.

关键词:三峡;升船机;闸首;自振特性;动水压力;附加质量

中图分类号:U64 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2000)05-0034-04

三峡工程垂直升船机提升高度为 113m,提升重量为 11800t.其上闸首结构顺水流方向总长 130m,垂直水流方向总宽 62m,中间航槽宽 18m.航槽两侧边墩宽为 13~22m,高为 44m.上闸首顶面高程为 185m,建基面在上游 80.9m 长范围内高程为 95m,下游按 1:0.3 陡岩坡深切开挖至高程 48m 处,使上闸首基岩在下游形成高达 47m 的临空陡岩坡面,上闸首结构最大高度达 137m.上闸首左侧在 112m 高程处与左岸非溢流坝 7 号坝段建基面相连,右侧在 95m 高程处按 1:0.6 开挖至 79.5m 高程处,与左岸非溢流坝 8 号坝段建基面相连,右前角与 F₂₃断层斜交.上闸首结构的设计采用整体式 U 型结构,但由于尺寸较大,施工时用纵缝和横缝分割成若干柱状块进行浇筑.垂直水流方向设置 3 条横缝,平行水流方向设置 2 条纵缝.结构底板部分施加预应力锚索进行加固处理.由于结构体系规模大,且布置有纵横交叉的施工缝,因而对结构的整体性影响较大.

三峡水利枢纽升船机工程按 7 度地震烈度进行设防.由于升船机上闸首为一级建筑物,因而需要用动力分析方法研究结构地震反应.地震反应分析的关键问题是求解结构的自振特性.由于施工缝的存在,使上闸首的动力分析问题成为一个相当复杂的非线性动力分析问题.本文在静力分析成果^①的基础上,对接缝的接触情况进行了简化,将一个复杂的非线性动力分析问题简化成一个较简单的线性动力分析问题.据此,对三峡升船机上闸首(图 1)分别进行了无水和挡水两种情况自振特性的计算.

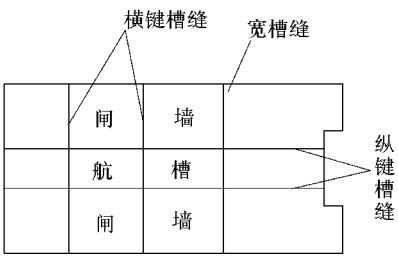


图 1 上闸首平面布置

Fig.1 Plan layout of the upper head-bay

1 计算方法

1.1 自振特性求解^[1]

动力有限元法中求解结构自振特性问题的特征值方程为

$$(K - \omega^2 M)\delta = 0 \tag{1}$$

式中: K ——结构的整体劲度矩阵; $M = M_D + M_p$, M_D 为结构的质量矩阵, M_p 为计入库水与结构相互作用的水体附加质量; δ ——结点振幅列阵,即振型; ω ——振型对应的圆频率.

采用直接滤频法求解方程(1),令 $\lambda = \frac{1}{\omega^2}$ (称为特征值)则方程(1)可改写成

$$\lambda \delta = K^{-1} M \delta \tag{2}$$

求解方程(2)时,设已求得第 r 个特征值和特征向量,可求得第 $r + 1$ 个特征值的滤频方程为

收稿日期:1999-04-25

作者简介:张燎军(1962—),男,江苏昆山人,教授级高级工程师,主要从事水工混凝土结构和岩土工程分析研究.

①陈和群,等.三峡升船机上闸首结构的整体性分析研究.河海大学工程力学研究所,1998.

$$\lambda \delta_{0r+1} = (K^{-1}M - \sum_{i=1}^r \frac{\lambda_i \delta_{0i} \delta_{0i}^T M}{\delta_{0i}^T M \delta_{0i}}) \delta_{0r+1}$$

(3)

迭代求解时,用 Rayleigh 商来加快求特征值的速度.

直接滤频法是以反幂法为基础的迭代解法.这个算法较适用于考虑有动水压力作用的水工结构的动力分析问题,在求解少数几个最低频率和振型时具有收敛速度快、存贮小的优点.

1.2 动水压力附加质量计算

在进行挡水建筑物的抗震分析时,必须考虑水体的影响,因此笔者通过附加质量矩阵来反映水体动水压力的影响.为了考虑水体质量对结构动力反应的影响,笔者利用水体不可压缩条件下动水压力的理论.根据水动力学理论,当刚性矩形水域作简谐水平平移振动,即

$$\ddot{u} = \ddot{u}_0 \cos \omega t$$

(4)

时(参见图 2),可导出侧墙动水压力幅的解为

$$p^*(0,z) = -p^*(a,z) = \frac{8}{\pi^2} \rho h \ddot{u}_0 \left(\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \tanh \frac{n\pi a}{4h} \cos \frac{n\pi z}{2h} \right)$$

(5)

式中: $\ddot{u}_0$ ——水平加速度振幅; ω ——简谐振动圆频率; $p^*(x,z)$ ——水域动水压力幅; ρ ——水体密度.

根据侧壁动水压力与附加惯性力相等的条件,可以导出求动水压力附加质量的表达式

$$m_x(z) = \frac{8}{\pi^2} \rho h \left(\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \tanh \frac{n\pi a}{4h} \cos \frac{n\pi z}{2h} \right)$$

(6)

式中: $m_x(z)$ ——侧墙单位面积上作用的附加质量; h ——侧墙的挡水深度.

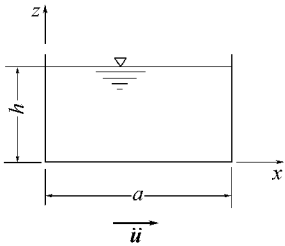


图 2 刚性矩形水域

Fig.2 Rigid rectangular water body

从式(5)(6)可以看出,当 $\frac{a}{h} > 3$ 时, $\tanh \frac{n\pi a}{4h} \approx 1$. 上述解答与韦斯脱伽特关于无限水域的解答相同,可统一用于计算闸首上游面、工作闸门与航槽等挡水面上作用的附加质量①.

2 上闸首自振特性计算

2.1 有限元模型

由静力分析成果可知,上闸首第 1、第 2 条横缝为键槽缝,在上游水沙荷载作用下,绝大部分是紧贴的,而第 3 条横缝是宽槽回填缝,不会分离.因此,笔者假设水平振动时各横缝两侧的墩体没有相对运动,即全部作为无缝处理.平行水流方向的 2 条纵缝,由于预应力的影响,除了航槽底面以下的宽槽回填缝外,再往下一定深度内的键槽缝也是紧贴的,见图 3.在动力分析时,假设图中阴影线部分墩体也是始终接触的,而其他部分则是完全分离的(即接缝两侧不发生接触).当发生较大地震时,接缝接触情况可能将发生一些变化,但不会改变原先的接触规律.根据上述假设,可以把一个相当复杂的非线性动力分析问题简化为一个比较简单的线性动力分析问题,用动力有限元法进行计算.

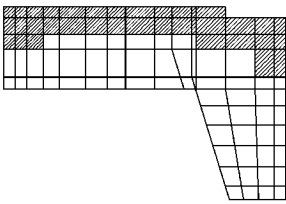


图 3 上闸首纵缝网格(阴影表示接触)

Fig.3 Mesh of the longitudinal joint of the upper head-bay(shadow means contact)

网格剖分时坐标系选择为:以升船机中心线为 x 轴,指向下游,原点位于上闸首迎水面; y 轴从右岸指向左岸; z 轴竖直向上.计算采用的主要参数为:混凝土:容重 $\gamma = 24.5 \text{ kN/m}^3$,动弹性模量 $E_d = 32.5 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.167$.基岩:不计容重,动弹性模量 $E_d = 43.75 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$. F_{23} 断层:不计容重,动弹性模量 $E_d = 15.0 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$.

2.2 计算成果分析

在求解三峡升船机上闸首自振特性时,笔者假设岩基是无质量的弹性地基.由于上闸首结构对顺水流向

① 傅作新,等.三峡升船机上闸首与闸顶排架的抗震分析研究.河海大学工程力学研究所,1998.

的中心面是基本对称的,故而可以不计横河向地震和顺河向地震耦合的影响,计算时,可以分别研究沿两个主平面方向的自振周期和频率.

为了比较水体动水压力对上闸首自振特性的影响,分别计算了无水 and 挡水两种情况的自振周期和频率.对无水和挡水的顺河向和横河向,各计算了前 5 阶频率和振型.表 1 列出了上闸首的各阶自振周期、频率及振型参与系数.图 4 为挡水时顺河向上闸首结构部分的第 1~第 3 阶振型图,图 5 为挡水时横河向第 1~第 3 阶振型图.低阶无水时振型图与挡水时振型图很接近.为节省篇幅,略去无水时相应的振型图.

表 1 上闸首的自振周期与自振频率

Table 1 Natural period and natural frequency of the upper head-bay

阶次	工况	顺河向振动				横河向振动			
		周期/s	频率/Hz	η_{xx}	η_{xz}	周期/s	频率/Hz	η_{yy}	η_{yz}
1	无水	0.282	3.552	1.437 76	-0.109 84	0.386	2.589	1.913 89	0.078 63
	挡水	0.406	2.462	1.543 15	-0.037 20	0.495	2.020	1.898 01	0.044 75
2	无水	0.145	6.880	-0.035 50	0.326 17	0.296	3.373	0.011 66	0.100 60
	挡水	0.203	4.923	0.025 75	-0.027 01	0.369	2.708	0.018 96	0.056 78
3	无水	0.137	7.293	0.042 66	1.483 75	0.242	4.139	-0.097 05	-0.071 54
	挡水	0.174	5.732	-0.703 86	-0.062 96	0.305	3.274	-0.114 22	-0.036 88
4	无水	0.114	8.755	1.054 06	0.084 73	0.212	4.712	-0.013 02	-0.014 40
	挡水	0.143	7.015	0.001 01	0.787 11	0.263	3.798	-0.007 44	-0.009 24
5	无水	0.088	11.344	-0.017 38	0.064 04	0.147	6.781	-1.163 69	-0.735 40
	挡水	0.140	7.153	-0.170 65	1.144 21	0.167	5.982	-1.230 43	-0.287 34

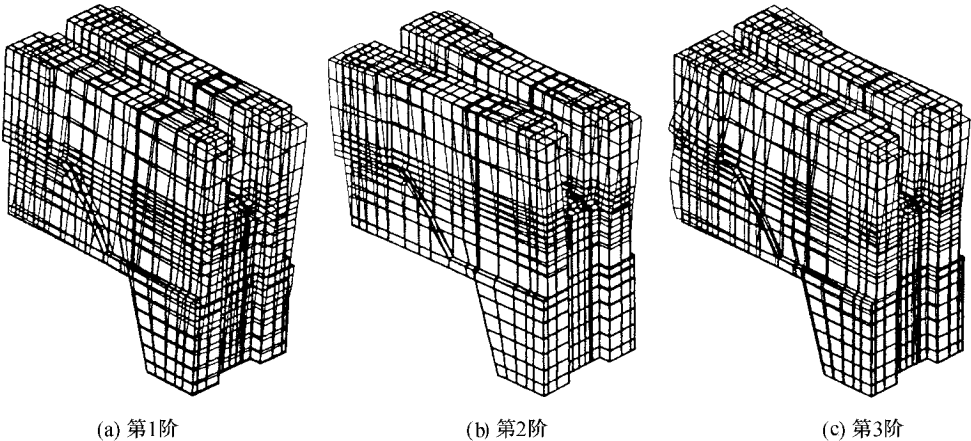


图 4 上闸首顺河向振型

Fig.4 Concurrent mode shape of the upper head-bay

从表 1 看出,无论是顺河向振动还是横河向振动,无水时的自振频率都比挡水时的自振频率高.这是由于上闸首增加水体附加质量后降低结构自振频率所造成的.计算结果还表明,顺河向振动的频率均高于横河向振动的频率.这反映了上闸首结构顺河向刚度大于横河向刚度的特征.

由无水和挡水情况的前 5 阶频率及其振型参与系数并结合其振型图可看出,顺河向和横河向振动均以第 1 阶振型为主.顺河向振动的基频在无水 and 挡水时分别为 3.552 Hz 和 2.462 Hz,挡水后降低约 31%,两种情况的 x 向振型参与系数分别达 1.438 和 1.543,相应的周期分别为 0.282 s 和 0.406 s.横河向振动的基频在无水 and 挡水时分别为 2.589 Hz 和 2.020 Hz,挡水后降低约 22%,两种情况的 y 向振型参与系数分别达 1.914 和 1.898,相应的周期分别为 0.386 s 和 0.495 s.

计算成果及振型图上反映出,顺河向振动时,第 2 阶振型左右两闸墩沿 x 向相反方向振动,第 3 阶振型无水时以垂直方向振动为主,而挡水时左右两闸墩则以弯扭振动为主;第 4 阶振型无水时以 x 方向振动为主,而挡水时则以垂直方向振动为主;第 5 阶振型无水时频率达 11.344 Hz,但振型参与系数都很小,挡水时则以垂直方向振动为主.横河向振动时,第 2 阶振型左右两闸墩无水 and 挡水时均沿 y 向相向振动, x 和 z 向振型参与系数都较小;第 3、4 阶振型无水 and 挡水时都以弯扭变形为主,但第 3 阶振型两闸墩以同方向弯扭为

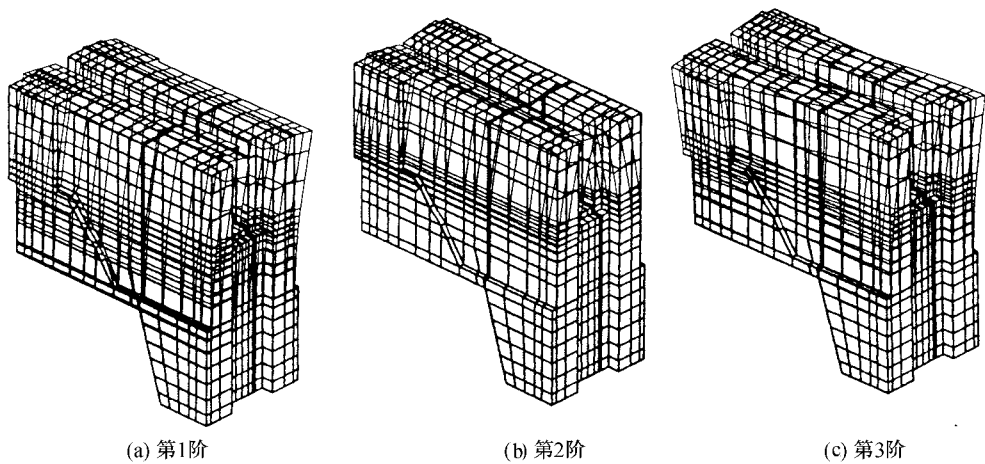


图 5 上闸首横河向振型

Fig.5 Cross current mode shape of the upper head-bay

主,而第 4 阶振型两闸墩则以反方向弯扭为主,第 5 阶振型无水 and 挡水时两闸墩均以 y 方向振动为主.

3 结 论

三峡升船机上闸首是一个长 130 m、宽 62 m、高 137 m、中间带有航槽、下游有深 97 m 楔状构造的分缝大体积混凝土结构.本文利用上闸首结构沿中心面基本对称的特点,将一个复杂的非线性动力分析问题简化为一个线性动力分析问题,并利用刚性矩形水域简谐振动理论导出了上闸首闸墙上游面、航槽及工作门上动水压力附加质量的统一表达式,利用直接频法求解横河向和顺河向的自振特性,并对上闸首结构空库和满库时的自振特性进行了详细的比较分析.计算结果表明,无论是横河向还是顺河向振动,起决定作用的均是第 1 阶振型,水体在动水压力作用下结构的自振频率将有所降低.本文计算结果可进一步用于结构的地震反应分析.

参考文献 :

[1] 华东水利学院.弹性力学问题中的有限单元法[M].北京:水利出版社,1982.180 ~ 201.

Free Vibration Characteristics Analysis of the Head-Bay
of the Three Gorges Ship Lift

ZHANG Liao-jun¹,FU Zuo-xin¹,NIU Xin-qiang²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Changjiang Water Resources Commission , Wuhan 430010 , China)

Abstract : A unified formula of the attached mass of dynamic water pressure on the lock walls and the gates of the head-bay of the Three Gorges Ship Lift is derived. By means of Direct Filter Frequency Method , the free vibration characteristic of the head-bay under concurrent and cross current is calculated. And the characteristics of the head-bay under idle pool and full pool are compared and analysed. Results show that the dominant mode is the first one in the head-bay vibration. The results provide a scientific basis for the earthquake-resistant design of head-bays.

Key words : Three Gorges ; ship lift ; head-bay ; direct filter frequency method ; dynamic water pressure ; attached mass