

河床式水电站厂房结构流固耦合振动特性研究

李守义, 吕汶蔚

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 鉴于厂房结构在地震作用下可能出现的严重后果,地震时动水压力对厂房结构的振动特性的影响就成为厂房结构设计的一个重要控制因素。结合某河床式水电站厂房实际工程,以有限元软件 ANSYS 为平台,建立三维有限元模型,分析地震动水压力对其振动特性的影响。分析结果表明:地震动水压力作用增加了坝面附加质量,从而降低了厂房的自振频率,并且对振型产生了一定的影响,尤其是进水口闸墩、尾水管闸墩等局部振型变化,因此对其作用下的厂房自振频率进行分析显得极为必要;随着上游水位的降低,厂房整体质量减小了,地震动水压力作用下的厂房自振频率随之增大,不同水位下厂房振型明显有所改变。

关键词: 河床式厂房; 流固耦合; 有限元法; 自振特性; 地震动水压力

中图分类号: TV731

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0205-05

Study on vibration characteristics of structural fluid-solid interaction for powerhouse of riverbed-hydropower station

LI Shouyi, LÜ Wenwei

(Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the possible serious consequence of hydropower structure under seismic action, the influence of dynamic water pressure produced by seismic on the vibration characteristics of hydropower structure has become an important control factor of hydropower structure design. Combining with practical powerhouse engineering of a riverbed-hydropower station, the paper used ANSYS as a platform to establish three-dimensional finite element model and analyze the influence of seismic dynamic water pressure on the vibration characteristics of hydropower structure. The results shows that seismic dynamic water pressure increases the added mass of dam surface, and then reduces the vibration frequency of powerhouse itself, and has certain influence on vibration mode, especially the local vibration mode changes of water inlet gate pier and draft tube gate pier etc. So it is necessary to analyze the frequency of natural vibration under the effect of seismic dynamic water pressure; with the reduction of upstream water level, the overall quality of hydropower is decreased and the frequency of natural vibration of hydropower under the action of seismic dynamic water pressure is increasing. The vibration modes of powerhouse under different water levels are obviously changed.

Key words: riverbed-hydropower station powerhouse; fluid-solid interaction; finite element method; natural vibration characteristics; seismic dynamic water pressure

1 研究背景

我国地域辽阔、江河众多,径流丰沛、落差巨大,蕴藏着极为丰富的水能资源。随着我国水电事业的迅猛发展,水电站厂房的种类和数量越来越多,厂房的体型也越来越复杂^[1]。河床式厂房作为挡水建

筑物和发电建筑物的综合体,其发展日益趋于巨型化和复杂化,河床式厂房本身的质量和刚度分布不均匀,且厂房上下游面直接与水接触,结构的稳定性、动力特性变得更为复杂^[2],尤其是厂房的振动问题日益突出。地震时,库区的水随着地面的运动,形成了作用在坝面的附加动水压力,对这种激振荷

收稿日期:2015-01-21; 修回日期:2015-03-10

作者简介:李守义(1955-),男,陕西西安人,教授,研究方向:水工结构应力分析。

通讯作者:吕汶蔚(1991-),女,陕西咸阳人,在读研究生,研究方向:水工结构分析及数值仿真研究。

载作用下厂房的振动问题的研究显得极为重要。流体与结构的相互作用是属于流固耦合问题^[3]。

自 1993 年以来,美国学者韦斯特伽德(Wester-gaard)研究了刚性直立坝面动水压力,假定库水向上游无穷远、库底为刚性水平面、库水做无旋小变形运动并忽略表面波影响^[4],在对水体-重力坝体系的动水压力响应的研究基础上,提出的一种考虑水体对结构作用的简化的动力分析计算方法,它是将动水压力等效成质量附加在结构上,因为动水压力的特点与惯性力相似,所以可以用附着在坝面的一定质量的水体来代替水的动力学效应,达到等效的动力响应的目的,即忽略库水的可压塑性的附加质量法^[5-6]。自 20 世纪 70 年代起,由于计算机的大量应用,用数值方法研究流固耦合问题取得了很大的进展,使得用数值方法来模拟流体与结构的相互作用成为可能,其研究方法可分为弱耦合法和强耦合法。所谓弱耦合法是指对流固耦合作用问题的力学模型进行简化,作一些必要的假设,从而将流体对结构的作用以附加质量和附加阻尼的形式表达出来。这种方法形式简单,计算量较小,在工程中已被广泛接受^[7-9]。

由于地震作用是偶然的,而地震动水压力对厂房的作用与水位有着密切关系,对于水位是如何影响动水压力作用下厂房结构流固耦合振动特性的研究还很少。本文结合实际工程,利用 ANSYS 有限元软件,建立韦斯特伽德附加质量模型,通过模态分析^[10]对水库地震动水压力作用下坝体-库水相互作用下的厂房自振频率进行研究分析,同时分析其作用下的厂房自振频率对水位的敏感性,以此作为预测厂房结构的安全性和可靠性的基础,从而为提出减振防振措施、避免共振提供参考依据,保证厂房安全稳定运行。

2 基本理论

厂房在地震激振影响下随着地基产生位移,这种位移带动着库水的运动,从而产生动水压力,而动水压力反过来又作用于厂房,它们之间相互作用,联合受力,这就需要将库水与厂房作为一个整体进行动力特性研究。

当库水作为不可压缩液体时,它对厂房的动力作用就可以看作是作用于坝面的附加质量 $[M_p]$,厂房的有限元动力控制方程见(1)式

$$[M^*]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M^*]\{\ddot{u}_g\}$$

(1)

式中: $[\ddot{u}]$ 、 $[\dot{u}]$ 、 $[u]$ 分别为相对加速度、速度和位移; $\{\ddot{u}_g\}$ 为地面加速度; $[M^*] = [M] + [M_p]$ 即整体质量矩阵为厂房自身质量矩阵与附加质量矩阵之和; $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为厂房自身质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $[M_p]$ 为附加质量矩阵^[11-12]。

3 计算模型的建立

某水电站为大(2)型工程,根据水电站厂房机组间结构分缝的特点,取 2[#]机组段为研究对象,建立三维有限元模型。

3.1 计算模型及边界条件

计算模型的范围:基础向上游延伸 70 m,向下游延伸 70 m,底部向下延伸 70 m。

计算模型应用的坐标系为:水流方向为 X 轴方向,向下游为正;沿高度方向为 Y 轴方向,向上为正;坝轴线方向为 Z 轴方向,向右岸为正;整体坐标系原点取在坝段右侧与地基相交处。计算模型的基础部分底部为三向约束,上、下游面及左、右侧面各施加相应法向约束;水电站厂房上、下游面及左、右侧面为自由边界。基岩和混凝土材料的力学指标见表 1。

表 1 材料力学性能参数

材料	动弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN·m)
基岩	10.40	0.250	
C20	33.15	0.167	25.0
C25	36.40	0.167	25.0

3.2 厂房结构单元划分

单元划分主要采用八节点六面体实体单元 SOLID45,部分通过四面体实体单元进行过渡。主要结构部位沿厚度方向混凝土划分不少于 3 层,并且网格尺寸不大于 1.5 m。节点和单元总数分别为 61 488 个和 173 902 个。厂房坝段整体有限元模型见图 1。

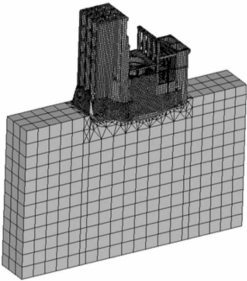


图 1 厂房坝段整体有限元模型

3.3 计算荷载

采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行计算,通

过模态分析来计算结构的自振频率。厂房上下游坝面地震动水压力按照目前坝工界普遍采用的维斯特伽特(Westergaard) 公式(2)进行计算,即

$$p_w = \frac{7}{8} \rho_w \alpha_h \sqrt{H_0 h}$$

(2)

式中: p_w 为作用在坝体单位面积上的动水压力; ρ_w 为水的密度; α_h 为水平向设计地震加速度代表值; H_0 为库水总深度; h 为计算位置距水面的深度; 计算的库水地震动水压力折算为坝面附加质量来考虑,质量单元用 MASS21 模拟^[13]。

对于河床式厂房流道空腔内的地震动水压力参照文献[14],采用乘以修正系数的进水塔附加质量公式计算。

4 自振频率分析

4.1 地震动水压力

地震使大坝产生振动时,在大坝-水库之间会产生耦合作用,由此而引起地震动水压力,为研究其对厂房自振特性的影响,采用不考虑地震动水压力和考虑地震动水压力两种方案进行对比分析,上游库水无穷远。模型Ⅰ为图1所示,模型Ⅱ为在模型Ⅰ的基础上考虑地震动水压力的模型。采用附加质量单元模拟地震动水压力,其他部位与模型Ⅰ完全一样,为保证两模型具有可比性,网格剖分均相同。以上述模型为基础,计算两个模型前20阶自振频率,本文列出前20阶频率及对应的振型,见表2。

表 2 模型Ⅰ和模型Ⅱ自振特性

阶次	不考虑地震动水压力		考虑地震动水压力(水位 2762 m)		频率相差 百分比/%
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	
1	2.038	整体绕 X 轴转动	1.908	整体顺河向摆动	6.38
2	3.223	整体顺河向摆动	2.027	整体绕 X 轴转动	37.11
3	3.416	排架顺河向摆动	3.397	排架顺河向摆动	0.56
4	4.219	排架绕 Y 轴扭转	4.166	上游部分,排架分别绕 Y 轴反向扭转	1.26
5	5.096	上游部分,排架和副厂房分别绕 Y 轴同向扭转	4.498	上游部分,排架和副厂房分别绕 Y 轴同向扭转	11.73
6	5.680	上游部分,排架分别绕 Y 轴反向扭转	5.444	上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向相向摆动	4.15
7	6.846	上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	5.491	上游部分,排架与副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	19.79
8	6.895	上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	5.898	整体沿高度伸缩摆动	14.46
9	7.357	上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向相向摆动	6.177	上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	16.04
10	8.479	上游部分横河向摆动,排架与副厂房绕 Y 轴反向扭转	8.345	上游部分横河向摆动,排架与副厂房绕 Y 轴反向扭转	1.58
11	10.535	上游部分与副厂房,排架沿水流方向相向摆动	9.126	上游部分与副厂房,排架沿水流方向相向摆动	13.37
12	11.233	上游部分与副厂房,排架分别绕 Y 轴反向扭转	10.813	上游部分与副厂房,排架分别绕 Y 轴反向扭转	3.74
13	12.188	副厂房沿高度伸缩摆动,排架顺河向摆动	11.059	上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向相向摆动	9.26
14	12.920	进水口闸墩沿横河向同向摆动,副厂房绕 Y 轴扭转	11.750	进水口闸墩沿横河向同向摆动,排架与副厂房沿水流方向相向摆动	9.06
15	12.997	排架中间向上游,两边向下游摆动	11.784	进水口闸墩沿横河向同向摆动,排架顺河摆动,副厂房绕 Y 轴扭转	9.33
16	13.056	进水口闸墩沿横河向两两反向摆动	12.195	进水口闸墩沿横河向两两反向摆动	6.59
17	13.891	进水口闸墩沿横河向同向摆动,排架与副厂房绕 Y 轴反向扭转	12.804	进水口边墩与中墩沿横河向反向摆动,排架和副厂房绕 Y 反向扭转	7.83
18	14.448	上游部分横河向摆动,排架与副厂房绕 Y 轴反向扭转	12.989	排架中间向上游,两边向下游摆动	10.10
19	16.068	进水口边墩和中墩横河向相反摆动,副厂房沿 Y 轴扭转	13.496	上游部分横河向摆动,排架和副厂房绕 Y 反向扭转	16.01
20	16.563	厂房整体顺河向摆动,尾水管中墩横河向摆动	13.960	进水口边墩与中墩沿横河向反向摆动,排架和副厂房绕 Y 同向扭转	15.72

由表 2 可知,地震动水压力的作用,增加了厂房的整体质量,致使厂房整体满库时的自振频率较空库时明显降低,降低的幅度在 0.56% ~ 37.11%,呈现出非线性变化。从振型特点来看,前两阶振型相互交换,第六阶振型在动水压力作用下由扭转变形变为上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向的相向摆动,第八阶出现了厂房与地基整体沿高度方向的伸缩摆动,第九阶则由摆动变形变为上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转,第十三阶副厂房沿高度的伸缩摆动变为顺水流方向的摆动,从第十四阶之后出现了闸墩的振动。可见自十三阶以后,振型明显差异较大。通过以上分析可知,厂房的低阶振型主要反映上游部分、排架结构和副厂房的整体变形,高阶振型除了上游部分、排架结构和副厂房的整体变形外,还出现了进水口闸墩、尾水管闸墩

等局部的振动变形,地震动水压力的作用除了对整体的振型产生影响外,对局部的影响作用更大。可见,地震动水压力使得厂房的振动变得极为复杂,为防止地震引起的振动效应对厂房产生重大破坏,对于动水压力作用下的厂房进行振动特性的研究极为必要。

4.2 水位敏感性分析

由 4.1 节可知地震动水压力对厂房自振频率有一定的影响,地震动水压力是由于水库在地震作用下引起的,因此有必要分析动水压力作用下厂房自振频率与水位的关系。本文采取上游水位 2762, 2760, 2758 m 3 种方案(下游水位相同),研究地震动水压力作用下厂房自振频率对水位的敏感性。前 10 阶频率及对应的振型见表 3。2762 m 水位方案的厂房前 4 阶振型图见图 2。

表 3 2762、2760 两种水位下厂房自振特性

阶次	上游水位 2762m		上游水位 2760m		频率相差	上游水位 2758m		频率相差
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	百分比/%	频率/Hz	振型	百分比/%
1	1.908	整体顺河向摆动	1.996	整体顺河向摆动	4.61	2.029	整体绕 X 轴转动	6.34
2	2.027	整体绕 X 轴转动	2.029	整体绕 X 轴转动	0.10	2.088	整体顺河向摆动	3.01
3	3.397	排架顺河向摆动	3.398	排架顺河向摆动	0.03	3.398	排架顺河向摆动	0.03
4	4.166	上游部分,排架分别绕 Y 轴反向扭转	4.181	上游部分,排架分别绕 Y 轴反向扭转	0.36	4.191	上游部分,排架分别绕 Y 轴反向扭转	0.60
5	4.498	上游部分,排架和副厂房分别绕 Y 轴同向扭转	4.566	上游部分,排架和副厂房分别绕 Y 轴同向扭转	1.51	4.634	上游部分,排架和副厂房分别绕 Y 轴同向扭转	3.02
6	5.444	上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向相向摆动	5.504	上游部分,排架与副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	1.10	5.518	上游部分,排架与副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	1.36
7	5.491	上游部分,排架与副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	5.566	上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向相向摆动	1.37	5.683	上游部分与排架,副厂房分别沿水流方向相向摆动	3.50
8	5.898	整体沿高度伸缩摆动	5.940	上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	0.71	5.984	上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	1.46
9	6.177	上游部分与排架,副厂房分别绕 Y 轴反向扭转	6.206	整体沿高度伸缩摆动	0.47	6.238	整体沿高度伸缩摆动	0.99
10	8.345	上游部分横河向摆动,排架与副厂房绕 Y 反向扭转	8.353	上游部分横河向摆动,排架与副厂房绕 Y 反向扭转	0.10	8.360	上游部分横河向摆动,排架与副厂房绕 Y 反向扭转	0.18

注:上述频率相差百分比为各自水位与 2 762 m 水位的频率对比结果。

由表 3 可知,随着上游水位的降低,作用在坝面上的附加质量减少,厂房整体质量降低,致使地震动水压力作用下厂房同阶次的自振频率随之提高,逐渐逼近于无地震动水压力作用下厂房自振频率。从振型特点来看,这

3 种水位的振型明显有所改变, 2 762 m 水位与 2 760 m 水位的厂房第六阶与第七阶振型产生了互换,2 758 m 水位与 2 762、2 760 m 水位的厂房前两阶振型同样产生了互换。通过上述分析可见,水位对于地震作用下厂房的

振动特性也有很大影响,由于地震是偶然情况,为保证厂房在地震影响下的安全,就有必要对厂房在不同水位情

况下的振动特性进行分析,以保证其不会与激振震源产生共振,从而造成不可避免的事故。

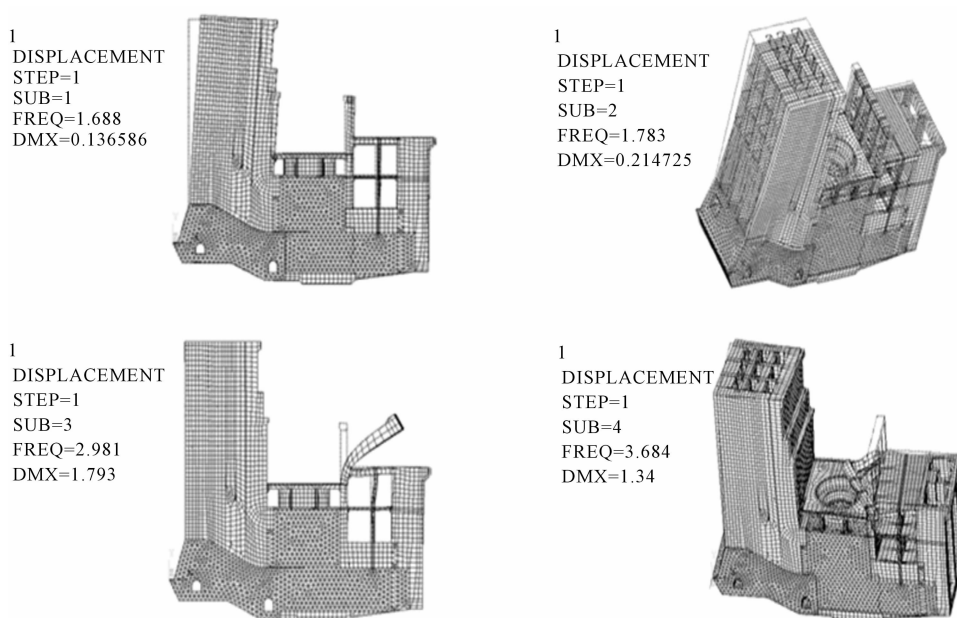


图2 2762 m 水位的厂房前4阶振型

5 结 语

本文针对某河床式水电站厂房,建立三维模型,采用大型通用有限元软件 ANSYS,从地震动水压力、水位敏感性两方面对其自振频率进行研究分析,分析结果如下:

(1)地震动水压力作用于厂房后,致使厂房同阶自振频率明显减小,对于低频振型影响较小,即对于上游部分、排架系统和副厂房整体变形影响较小,对于进水口闸墩、尾水管闸墩这些局部部位变形影响较大,因此有必要对考虑地震动水压力后的厂房振动特性进行深入研究。

(2)在地震动水压力作用下,降低上游水位使得厂房整体质量减小,从而导致了厂房自振频率的增大,并且随着水位变化,振型也产生了变化,地震是偶然发生的,为保证在任意水位下厂房在地震作用下不会与其它激振震源产生共振,所以实际工程中在地震作用下的厂房共振校核不能忽略水位对其影响。

参考文献:

- [1] 刘波,伍鹤皋,李冲.大型水电站地下厂房结构自振特性研究[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(4):419-422.
- [2] 于倩倩.河床式水电站厂房结构的地震响应分析方法研究[D].天津:天津大学,2012.

- [3] 陈锋,王春江,周岱.流固耦合理论与算法评述[J].空间结构,2012,18(4):55-63.
- [4] 徐金英,李德玉,郭胜山.基于 ABAQUS 的两种库水附加质量模型下重力坝坝体动力分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2014,12(1):98-103.
- [5] 杜修力,王进廷.动水压力及其对坝体地震反应影响的研究进展[J].水利学报,2001,32(7):13-21.
- [6] 张辉东,周颖.大型水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J].水力发电学报,2007,26(5):134-137,111.
- [7] 张存慧,马震岳,周述达,等.大型水电站厂房结构流固耦合分析[J].水力发电学报,2012,31(6):192-197.
- [8] 王基盛,杨庆山.流体环境中结构附加质量的计算[J].北方交通大学学报,2003,27(1):40-43.
- [9] 钱若军,董石麟,袁行飞.流固耦合理论研究进展[J].空间结构,2008,14(1):3-15.
- [10] 苏礼邦,刘云贺,李守义.灯泡贯流式水电站厂房坝段的抗震分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):202-206.
- [11] 张书华,赵中华.基于 ANSYS 的水电站厂房结构自振特性分析[J].山西建筑,2014,40(9):23-24.
- [12] 黄耀英,孙大伟,田斌.两种库水附加质量模型的重力坝坝体动力响应研究[J].人民长江,2009,40(7):64-66.
- [13] 党国强,李守义,鞠静春,等.河床式水电站厂房坝段动力分析[J].电网与水力发电进展,2008,24(3):70-73.
- [14] 徐国宾,张婷婷,王海军,等.河床式水电站流道水体附加质量计算方法研究[J].水利水电技术,2012,43(3):19-22+62.