

混凝土坝及坝后式厂房整体地震响应分析

蔡 新¹,武颖利²,郭兴文¹

(1. 河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院材料结构研究所,江苏 南京 210024)

摘要 以某水电站工程为例,建立了独立坝体计算模型、独立厂房计算模型和考虑大坝坝体、背管及厂房的整体三维有限元仿真计算模型.在对这 3 个模型进行自振特性分析和基于反应谱法的地震动力响应计算的基础上,分析了地震条件下整体计算模型坝体、背管和厂房连接处的位移工作性态及其相互作用,比较了分块计算模型和整体计算模型对工程影响的差异.结果表明:独立模型不能反映坝体厂房之间相互作用对固有频率产生的影响.在进行谱分析时,整体模型要选取更多阶的谱值才能反映高阶频率对位移的影响.

关键词 混凝土坝;背管;厂房;地震响应

中图分类号 TV312

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2008)01-0049-05

目前,对于混凝土坝厂房坝段的设计研究,大多采用将坝体和厂房分开建模并进行有限元计算分析的方法.这种方法的优点是模型比较简单,计算量相对较小,一般情况下采用分块模型就能满足工程设计需要.实际上,采用坝后背管形式设计的坝后式厂房,一般在坝体与厂房之间设置接缝,坝体、背管和厂房形成了不完全独立的一个系统,分块计算模型不能反映坝体和厂房之间的相互作用.因此,利用大坝坝体、背管及厂房的整体三维有限元仿真计算模型进行计算分析,结果能更好地反映结构的实际工作性态,为工程设计提供更可靠的依据.

本文以某水电站工程为例,对 3 个不同的计算模型分别进行了自振特性分析和基于反应谱法的地震动力响应计算,比较了分块计算模型和整体计算模型对工程影响的差异.

1 动力分析基本原理

1.1 自振特性分析

结构的自振特性(频率与振型)是结构动力计算的主要内容,也是利用振型叠加法计算动力响应的基础.研究表明,结构的阻尼对结构的频率和振型的影响很小,因而求频率和振型时可以不考虑阻尼的影响.求解结构自振频率的方程为

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (1)$$

式中: K ——劲度矩阵; M ——质量矩阵; ω ——频率.

1.2 地震反应谱分析

工程上常采用反应谱法求结构在地震作用下的最大响应值.其具体方法是,首先求出结构的振型和频率,然后利用反应谱求出各阶振型的最大响应,再采用适当的方法将各阶振型的最大响应组合成总的最大动响应.

设结构第 i 阶振型为 Φ_i ,其自振频率为 ω_i ,则结构第 i 阶振型的最大位移 δ_i 和最大应力 σ_i 分别为

$$\delta_i = \frac{\eta_i \beta_i k \Phi_i}{\omega_i^2} \quad \sigma_i = \frac{\eta_i \beta_i k \sigma_i^0}{\omega_i^2} \quad (2)$$

式中: η_i ——振型参与系数; k ——地震系数; σ_i^0 ——第 i 阶振型所对应的应力; β_i ——加速度动力放大系数^[1],可根据第 i 阶振型的自振周期 $T_i = 2\pi/\omega_i$ 和阻尼比 ξ_i ,利用 DL5073—2000《水工建筑物抗震设计规

范》^[2] 给出的设计加速度标准反应谱进行计算。

由式(2)求出对应各阶振型的结构最大响应后,即可通过适当的方法组合得到总的最大动响应.本文采用平方和方根法(SRSS)将各阶振型的最大响应组合成总的最大动响应,即

$$S_{j\max} = \sqrt{\sum_i S_{ji}^2} \quad (j = x, y, z)$$

(3)

式中: j ——地震方向; $S_{j\max}$ ——结构总的最大动响应; S_{ji} ——第 i 阶振型 j 方向的结构最大响应.

2 工程实例计算分析

2.1 有限元分析模型及计算参数

某水电站工程位于 8 度地震区,工程由拦河坝、泄水建筑物和发电引水系统及电站厂房等主要建筑物组成.整个坝体建在岩基上,最大坝高 51 m,水库总库容 1.21 亿 m^3 ,装机容量 140 MW.发电引水系统布置在混合坝碾压混凝土重力坝段右侧,由坝式进水口、坝后背管组成.引水建筑物采用三管三机的引水布置方式,每个进水口在水力条件和结构上各自独立,每个进水口单元轴线中心间距 21.5 m,以进水口中心线对称布置,由拦污栅段、闸门井段组成.发电厂房采用坝后式厂房.坝体和厂房之间设厂坝分缝.建筑物级别为 3 级.该工程规模属大(2)型,工程等级为 II 等.机组坝段由混凝土坝体、坝后背管及坝后式厂房组成,坝体和厂房之间设有 5 cm 的永久分缝.选取厂房坝段中间机组段并利用 ANSYS 软件建立 3 个有限元计算模型.图 1 给出了坝体、背管及厂房的整体三维有限元仿真计算模型,模型取地基深度为坝高的 2 倍,坝前和坝后的距离均取坝高的 1.5 倍.模型在坝体分缝处为自由面.坝体和厂房的独立模型以厂坝分缝为分界面,并将分界面设为自由面.计算考虑竣工期和正常蓄水位 2 种载荷工况,着重讨论坝体和厂房的动力相互作用.

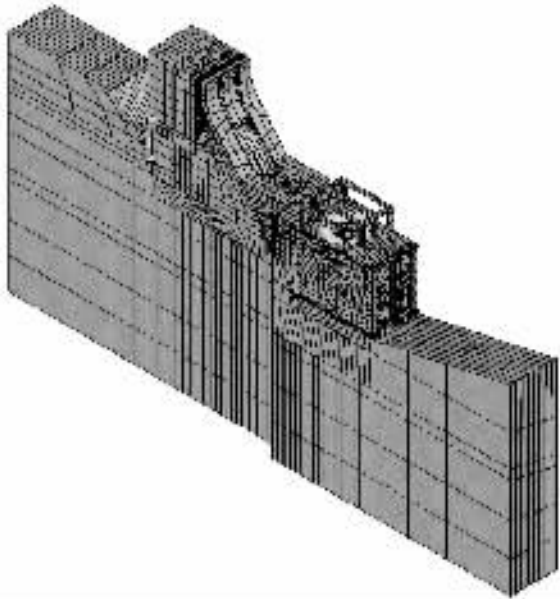


图 1 整体计算模型

Fig.1 Integral calculation model

在模型底部施加 3 个方向的约束,在地基上下游侧及横河向两侧施加法向位移约束.采用质量单元将发电机及水轮机的质量施加于模型,以比较真实的模拟厂房部分的振型.采用 8 节点 6 面体单元和线弹性的本构模型,材料计算参数如表 1 所示.在进行动力分析时,选取材料的动弹模为材料静弹模的 1.3 倍.

表 1 材料计算参数

Table 1 Calculation parameters of materials

材料(在模型中的位置)	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	材料(在模型中的位置)	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1. 弱风化砾岩(第 1 层地基)	3.50	0.300	0	10. C25(背管外衬)	45.36	0.167	2400
2. 弱风化砂岩(第 2 层地基)	21.50	0.200	0	11. C20(外包防渗变态混凝土)	31.60	0.167	2400
3. 新鲜砾岩(第 3 层地基)	3.80	0.200	0	12. 拦污栅段	24.60	0.167	2400
4. 泥质粉砂岩(第 4 层地基)	12.20	0.200	0	13. C25(水轮机二期混凝土)	45.36	0.167	2400
5. 新鲜砾岩(第 5 层地基)	3.80	0.200	0	14. C20(厂房底板和上下游墙钢筋混凝土)	31.60	0.167	2400
6. 泥质粉砂岩(第 6 层地基)	12.20	0.200	0	15. C25(厂房柱子和梁)	45.36	0.167	2400
7. 砂岩(第 7 层地基)	36.00	0.200	0	16. C20(变态混凝土之下)	31.60	0.167	2400
8. 三级配材料(碾压坝体内部)	38.60	0.167	2400	17. 伸缩节材料	0.50	0.000	0
9. C15(回填混凝土)	31.00	0.167	2400				

2.2 自振特性结果对比分析

对于独立坝体模型,计算了前 20 阶频率;对于独立厂房模型,计算了前 30 阶频率;对于整体模型,计算了前 40 阶的自振频率.表 2 仅列出了 3 种模型的部分频率及振动方向.为了进行对比分析,表 2 将独立坝体

模型与独立厂房模型的计算频率按从小到大的顺序排列。

表 2 独立计算模型和整体计算模型自振特性结果的对比

Table 2 Comparison of natural-vibration characteristics with separate models and integral model

坝体或厂房	独立计算模型			整体计算模型		
	阶次	频率/Hz	振动方向	阶次	频率/Hz	振动方向
坝体	1	4.73	坝体横河向振动	1	4.75	坝体横河向振动
厂房	1	5.78	厂房横河向振动	2	5.81	厂房横河向振动
坝体	2	5.96	坝体顺河向振动	3	6.01	坝体顺河向振动
厂房	2	6.98	厂房顺河向振动	4	7.16	厂房顺河向振动
厂房	3	7.61	厂房横河向振动	5	7.59	厂房横河向振动
坝体	3	8.12	坝体顺河向振动	6	7.72	厂房横河向振动及坝体顺河向振动
厂房	4	8.23	厂房扭转	7	8.49	厂房扭转
厂房	5	8.49	厂房顺河向振动	8	8.95	厂房顺河向振动
厂房	6	9.24	厂房横河向振动	9	9.51	厂房横河向振动
厂房	7	9.51	厂房扭转及横河向振动	10	9.92	厂房扭转及横河向振动
厂房	8	9.92	厂房扭转及横河向振动	11	9.99	厂房扭转及横河向振动
厂房	9	9.98	厂房顺河向振动	12	10.37	厂房顺河向振动
厂房	10	10.50	厂房横河向振动	13	10.57	厂房横河向振动
厂房	11	10.57	厂房横河向振动	14	10.63	厂房横河向振动
坝体	4	11.99	坝体顺河向振动	15	12.21	坝体、厂房顺河向振动
厂房	12	13.19	厂房竖向振动	16	13.37	厂房竖向振动
厂房	13	13.47	厂房竖向振动	17	13.48	厂房竖向振动
厂房	14	13.49	厂房竖向振动	18	13.61	厂房竖向振动
厂房	15	13.78	厂房竖向振动	19	13.78	厂房竖向振动
厂房	16	13.94	厂房竖向振动	20	13.94	厂房竖向振动
厂房	17	14.51	厂房顺河向振动	21	14.52	厂房顺河向振动
厂房	18	14.74	厂房横河向振动	22	14.75	厂房横河向振动
厂房	19	15.34	厂房及下部横河向振动	23	15.44	厂房及下部横河向振动
厂房	20	15.95	厂房及下部顺河向振动	24	16.28	厂房及下部顺河向振动

从计算结果可以看出,整体计算出的各阶频率与分块独立计算出的各阶频率基本上一致,特别是前几阶频率,整体模型与独立模型得出的结果非常接近。在方案论证和初步设计阶段,采用分块计算模型可减少计算的难度及工作量。但是,当坝体和厂房 2 部分固有频率比较接近时,整体模型能反映出坝体和厂房比较接近的固有频率之间的相互影响,而独立模型不能反映这种影响^[3-5]。

2.3 地震反应谱结果对比分析

采用单点谱分析方法^[6],首先根据上一步计算出的各阶固有频率,求出各阶频率所对应的地震加速度谱,将这些加速度谱值施加到模型的 3 个方向上,然后将计算出的结果按照 SRSS 模态组合方式进行模态合并,就可以得出每个节点上位移的最大值,同时也可以得到每个节点上的位移随固有频率变化的曲线。本文分别取 3 种模型计算了前 20 阶频率所对应的谱值^[3,7-9]。

表 3 列出了 3 种计算模型得到的坝顶最大位移,厂房顶的最大位移。

由表 3 可知,整体模型计算结果比独立模型计算结果小。这是因为在整体模型计算时,谱分析选取的固有频率值包括了坝体和厂房 2 部分,频率比较密,其中只包含了坝体的前 4 阶固有频率,计算结果反映出的主要是低阶频率对位移的影响。从表 3 还可以看出,2 种模型计算结果相差不大。可见,对位移影响较大的是前几阶频率,高阶频率的影响很小,实际工程可以忽略高阶频率的影响。

表 3 3 种计算模型最大位移响应值

Table 3 Response values of maximum displacement of 3 calculation models cm

计算模型	坝顶 位移	厂房顶 位移	背管与厂房 连接处位移
独立坝体	0.315		
独立厂房		0.542	
整 体	0.292	0.526	0.045

图 2~5 分别给出了 3 种计算模型得到的坝顶、厂房顶同一节点 x,y,z 3 个方向位移随频率变化的

曲线.

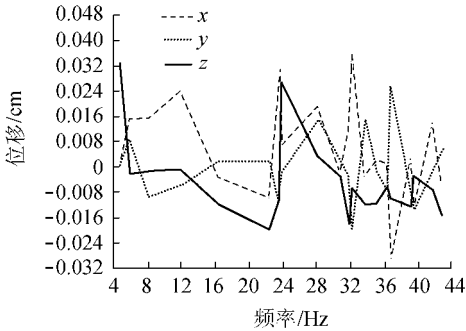


图 2 独立模型坝顶节点位移-频率曲线

Fig.2 Displacement-frequency curve for nodes at top of dam in separate model

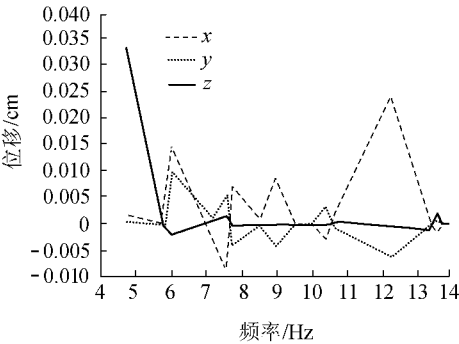


图 4 整体模型坝顶节点位移-频率曲线

Fig.4 Displacement-frequency curve for nodes at top of dam in integral model

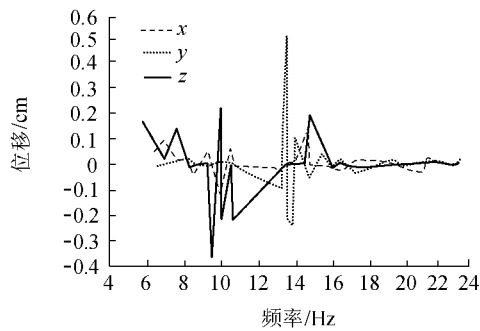


图 3 独立模型厂房顶节点位移-频率曲线

Fig.3 Displacement-frequency curve for nodes at top of powerhouse in separate model

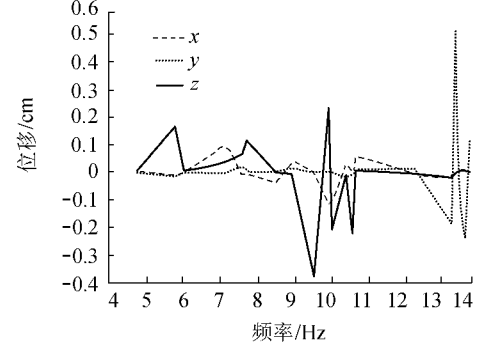


图 5 整体模型厂房顶节点位移-频率曲线

Fig.5 Displacement-frequency curve for nodes at top of powerhouse in integral model

从图 2~5 可以看出,采用相同阶次计算时,独立计算模型选取的固有频率值范围比较广,它反映出了高阶频率对位移的影响,因此得出的位移-频率曲线可以反映较小计算量情况下较大频率范围内的实际情况.对整体模型而言,用更多阶的谱值进行计算,计算结果可反映高阶频率对位移的影响,虽然计算量会比独立计算模型大很多,但整体模型反映出了厂房和坝体之间的相互作用.

3 结 语

a. 模态分析时,独立计算模型可以反映坝体和厂房的各阶模态,但不能反映坝体和厂房之间的相互作用.特别是当坝体和厂房存在比较接近的固有频率时,独立计算模型不能反映两者相互作用对固有频率的影响,整体计算模型可以清楚地反映上述问题.

b. 在相同阶次前提下进行地震谱分析,独立计算模型可以较好地反映高阶频率对位移响应的影响,而整体计算模型由于包含的频率比较密,要反映高阶频率对位移的影响,则需要选取更多阶的谱值进行计算.

参考文献:

[1] 顾淦臣.土石坝地震工程[M].南京:河海大学出版社,1989.
[2] DL5073—2000,水工建筑物抗震设计规范[S].
[3] 郝文化. ANSYS 在土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
[4] 胡志刚.大型水电站地下厂房结构振动计算研究[D].天津:天津大学,2003.
[5] 李正农,杨世浩,蔡元奇,等.混凝土重力坝厂房坝段单、双孔口方案动力有限元分析与比较[J].武汉水利电力大学学报,1998,31(2):22-24.
[6] 万文智,窦兴旺.关于地震动输入机理的分析与探讨[J].大坝观测与土工测试,2000,24(6):18-19.
[7] 陈建云,李静,林皋.基于率性损伤模型的混凝土重力坝地震响应分析[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(6):786-789.

[8] 何蕴龙,陆述远,王宏硕.碾压混凝土重力坝地震动力分析[J].武汉水利电力大学学报,1998,31(1):11-15.
[9] 黄劲松,潘燕芳,闫慧玉.大朝山碾压混凝土重力坝静、动力有限元计算分析[J].武汉大学学报·工学版,2003,36(6):22-26.

Integral seismic response analysis of concrete dam and powerhouse at dam toe

CAI Xin¹, WU Ying-li², GUO Xing-wen¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract :A case study was performed on a hydropower station, and two separate calculation models respective for the dam body and powerhouse and a 3D integral finite element simulation model for dam body, back pipe, and powerhouse were developed. Based on the natural-vibration characteristic analysis of 3 models and seismic response calculation with the response spectrum method, the working behavior of the integral calculation model about displacement at joints of the dam body, back pipe and powerhouse and their interaction during earthquakes were analyzed, and the differences between the effects of the separate models and integral model on structures were compared. The result shows that the separate models could not reflect the effect of the interaction between the dam body and powerhouse at natural frequency, while for spectrum analysis by the integral model, more spectrum values should be selected to reflect the influences of high-order frequency on displacement.

Key words :concrete dam ; back pipe ; powerhouse ; seismic response

+++++

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考.

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响.刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得首届中国高校优秀科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号.

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版,国内外公开发行,每期定价 12.00 元,全年 6 期共 72.00 元.欢迎广大读者通过全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系.编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部.联系电话:025-83786343;E-mail:xb@hhu.edu.cn.