

宝泉浆砌石重力坝三维有限元动力分析

焦爱萍^{1,2}, 刘宪亮¹, 许新勇³

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475001; 2. 北京航空航天大学 流体力学研究所, 北京 100083;
3. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 考虑地震动水压力作用和地基弹性的影响, 采用《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-2000)推荐的振型分解反应谱法, 对宝泉浆砌石重力坝进行三维有限元动力分析. 计算结果表明, 大坝整体上的应力和位移能满足抗震设计的要求. 在坝踵局部区域、范围很小的拉应力不会影响大坝的安全.

关键词: 振型分解反应谱法; 有限元动力分析; 应力; 位移; 宝泉浆砌石重力坝

中图分类号: TV312

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)01-0036-05

Three-dimension finite element dynamic analysis of Baoquan masonry gravity dam

JIAO Ai-ping^{1,2}, LIU Xian-liang¹, XU Xin-yong³

(1. *Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475001, China*; 2. *Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China*; 3. *North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China*)

Abstract: Considering the seismic dynamic water pressure and foundation elasticity, the dynamic response of Baoquan masonry gravity dam is calculated by using the three-dimensional finite element method and the mode-superposition response spectrum method given in Specifications for Seismic Design of Hydraulic Structures (DL5073-2000). Calculation results show that the seismic requirements for the whole dam's stress and displacement can be met, and that the local tensile stress on the dam heel has little effect on dam's safety.

Key words: mode-superposition response spectrum method; finite element dynamic analysis; stress; displacement; Baoquan masonry gravity dam

宝泉抽水蓄能电站枢纽工程位于河南辉县的峪河上, 工程等别为一等. 宝泉抽水蓄能电站枢纽的下水库大坝, 是利用已建的宝泉水库大坝进行加高加固而成, 坝型为整体式浆砌石重力坝. 该大坝为1级建筑物. 最大坝高107.5 m, 坝顶高程▽268.5 m. 水库正常蓄水位▽260 m, 相应的库容为6 750万m³. 大坝由与两岸相连的非溢流坝段和位于中间的溢流坝段组成. 溢流坝堰顶高程为▽257.5 m, 溢流堰宽109 m, 堰上设3 m高的橡胶坝, 以便在汛期塌坝泄洪. 坝址区的基本地震烈度为7度, 大坝的设计地震烈度为8度^[1]. 大坝加高后, 存在新老坝体浆砌石砌体的弹性模量不同、浆砌石材料的不同, 以及混凝土面板与加高的浆砌石等材料

收稿日期: 2006-06-22

作者简介: 焦爱萍(1968-), 女, 河南许昌人, 副教授, 硕士, 主要从事水工结构和流体力学的教学与科研工作.

接触共同受力等问题.坝体整体过长且没有分缝,坝体柔度可能较大.因此,需对加高加固后的浆砌石重力坝进行三维有限元动力响应分析,并对坝体在地震作用下的大坝整体安全性做出评价.

1 计算模型及计算方案

1.1 计算参数

坝址外露的基岩由约 10 m 厚的弱风化片麻岩和新鲜片麻岩组成,地质构造较为均匀.基岩的弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.3.坝体主要的力学参数:坝体重度为 23 kN/m^3 ,老坝体水泥砂浆砌块石的弹性模量为 6.75 GPa,新坝体 C15 细石混凝土砌块石的弹性模量为 9 GPa,溢流面板混凝土的弹性模量为 30 GPa,浆砌石体的泊松比为 0.2,混凝土的泊松比为 0.167.根据《水工建筑物抗震设计规范》^[2],坝体材料动态弹性模量可较静态弹性模量提高 30%.淤沙浮重度为 9 kN/m^3 ,泥沙内摩擦角为 15° ,库水重度取为 9.8 kN/m^3 .

1.2 计算模型

为便于系统地分析宝泉浆砌石重力坝三维有限元的计算结果,特选取了 7 个计算断面作为主要分析对象.通过对这些断面坝体应力、位移等的分析和判断,可综合评价坝体的强度和安全性.由于中间溢流坝段长达 109 m,故在溢流坝段选取了 3 个计算断面(即#3、#4 和#5 断面).在左右岸较高的挡水坝段各取 2 个计算断面(即#1、#2 和#6、#7 断面).为了避开由于溢流坝段挡水墙而产生的局部应力区,将挡水坝段的#2 和#6 断面均取在溢流坝段挡水墙左右侧各 15 m.宝泉浆砌石重力坝的平面布置和各计算断面见图 1.

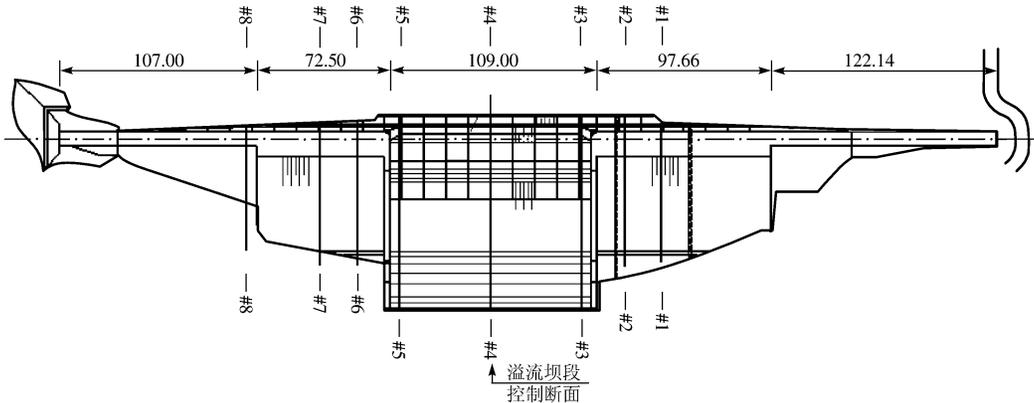


图 1 大坝平面布置和计算断面位置(单位:m)

Fig. 1 Layout of the dam and calculation sections position (unit: m)

为了解除山岩和坝基边界条件对坝体受力的影响,应尽量扩大坝体三维有限元整体模型的计算范围.本模型的坐标系见图 2.水平顺水流方向为 x 轴、竖直方向为 y 轴、水平正交于水流方向为 z 轴.计算范围取:沿 x 轴向自坝踵、坝趾分别向上、下游各取 150 m;沿 y 轴向自坝基面向下取 180 m(约为 2 倍坝高);沿 z 轴向自坝体左、右岸两端分别向外取 150 m,并高出坝顶 10 m.由于该有限元整体模型的计算范围已足够大,因此,坝基底面和坝周竖向岩面均可视为固端约束.

对建立的坝体三维有限元计算模型进行单元网格划分,采用六面体 8 节点等参单元,共划分了 105 454 个单元,114 830 个节点,整个坝体上的单元网格最大边长均不大于 5 m.整体和大坝模型计算网格剖分见图 2.

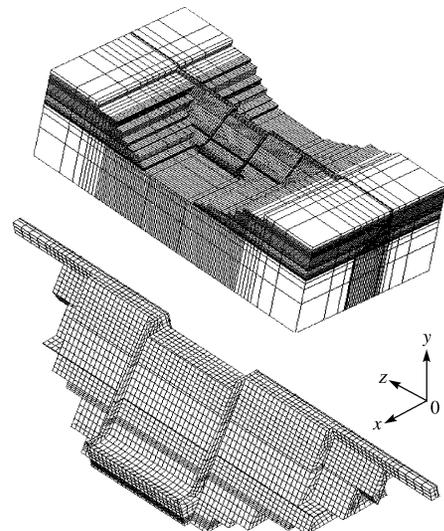


图 2 整体和大坝模型计算网格剖分

Fig. 2 Calculation meshes for the whole dam and dam body

1.3 有限元动力计算方案

采用有限元法进行动力反应分析时,整体模型系统的动力平衡方程^[3]为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = -M\delta_g \tag{1}$$

式中: M 为总体质量矩阵; C 为总体阻尼矩阵; K 为总体刚度矩阵; $\ddot{\delta}$ 为节点加速度向量; $\dot{\delta}$ 为节点速度向量; δ 为节点位移向量; δ_g 为地面运动加速度向量。

采用振型分解反应谱法分析大坝结构的地震动力响应.采用规范^[2]中推荐的标准反应谱,即最大谱值 $\beta_{max}=2.0$,阻尼比 $=0.08$,场地的特征周期 T_g 按 I 类场地取为 0.20 s.基岩水平向设计地震加速度 $a=0.2g$,竖向设计地震加速度峰值为水平向峰值的 2/3.

有限元动力计算时,取 10 阶振型进行分析.各振型之间采用 SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)法进行组合,即取各阶振型地震作用效应的平方总和的方根作为总的地震作用效应.水平和竖向地震之间的作用效应也采用 SRSS 法.地震动水压力采用水体附加质量施加到上游坝面.

2 计算结果分析

2.1 坝体振型

考虑动水压力时的坝体自振频率和振型分别见表 1 和图 3.一阶振型是以坝基为固端在坝体横断面内发生摆动的振型.由于大坝的整体长度过长,刚度小、柔性大,高阶振型表现为坝体在整个空间上的波动,产生扭转组合振型,反映了坝体平面内的平移和三维空间扭转振型的耦合.

表 1 坝体自振频率

Tab.1 Natural frequency of the dam body

振型/阶	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	2.942 9	3.529 6	4.342 8	4.555 0	5.204 9	5.335 6	6.234 1	6.375 8	6.475 4	6.822 9

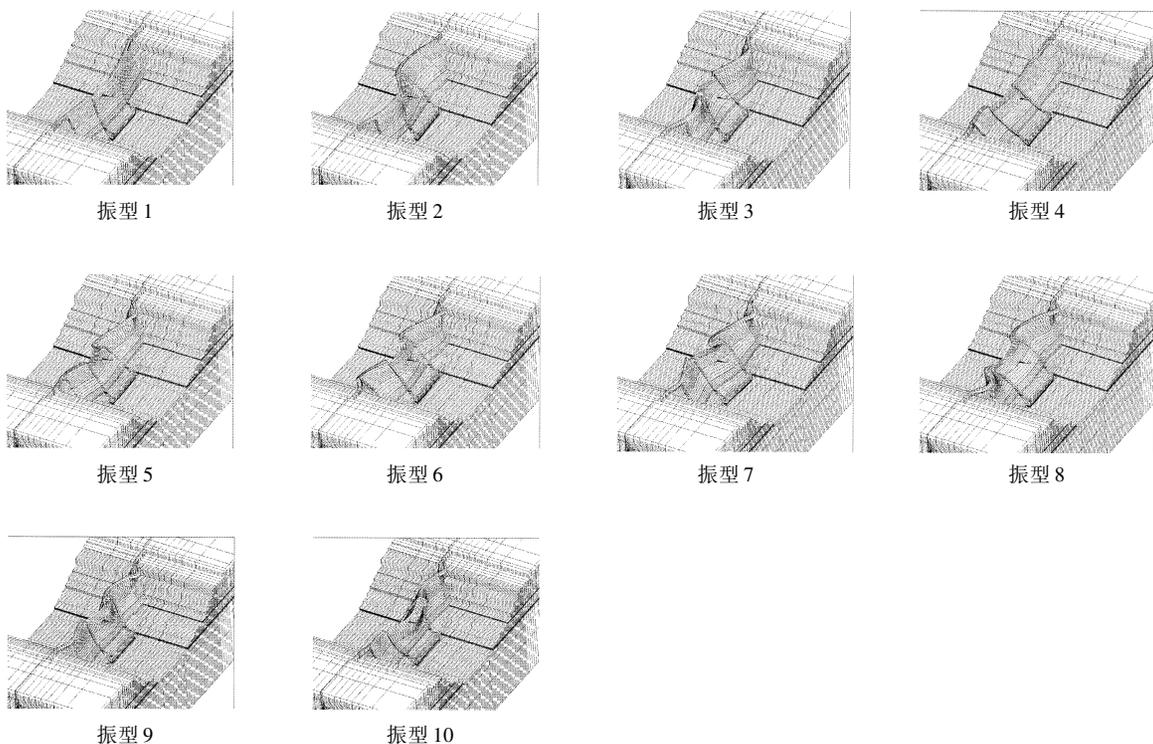


图 3 坝体各阶振型图

Fig.3 Vibration modes with different orders for the dam body

2.2 坝面动应力

将动力计算的结果与最不利静态荷载(坝体自重+正常蓄水位静水压力+泥沙压力+扬压力+动水压力)作用下静态计算的结果组合后,得到了大坝在地震作用下的综合反应^[4].经分析各计算断面的有限元动力计算结果,得出溢流坝段中间断面为动力计算的控制断面.溢流坝段的筑坝材料分区见图4.

坝踵、坝趾的动态应力(仅考虑地震单独作用时)和静态应力及其叠加结果见表2.其中, σ_x, σ_y 和 τ_{xy} 分别为水平正应力、竖向正应力和剪应力, σ_1 为第一主应力, σ_3 为第二主应力(正值表示拉应力;负值表示压应力). $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 按照同向或者反向直接叠加求得,同向叠加为动态计算值与静态计算值同号的代数和,反向叠加为动态计算值与静态计算值反号的代数和.主应力 σ_1, σ_3 按下式计算:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

表2 坝踵、坝趾动、静态应力及其叠加结果

Tab.2 Dynamic and static stresses and superposition results on the toe and heel of the dam (单位: kPa)

位置	计算情况	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_1	σ_3
坝踵	静态	584	-567	1 094	1 245	-1 228
	动态	740	3 002	360	3 058	683
	同向叠加	1 324	-3 570	1 453	1 723	-3 970
	反向叠加	-155	2 434	735	2 630	-350
坝趾	静态	-927	-3 201	972	-568	-3 560
	动态	183	602	197	680	105
	同向叠加	-1 111	-3 803	1 170	-673	-4 240
	反向叠加	-743	-2 599	775	-462	-2 880

地震单独作用时,溢流坝段中间断面的动态主应力等值线见图5.可见,靠近坝体的表面主应力较大,坝体内部的主应力相对较小.坝踵、坝趾及上游坝面接近坝的一半高程处出现应力集中.坝体的第一主应力 σ_1 极大值出现在坝踵处,为3 058 kPa,但范围较小.

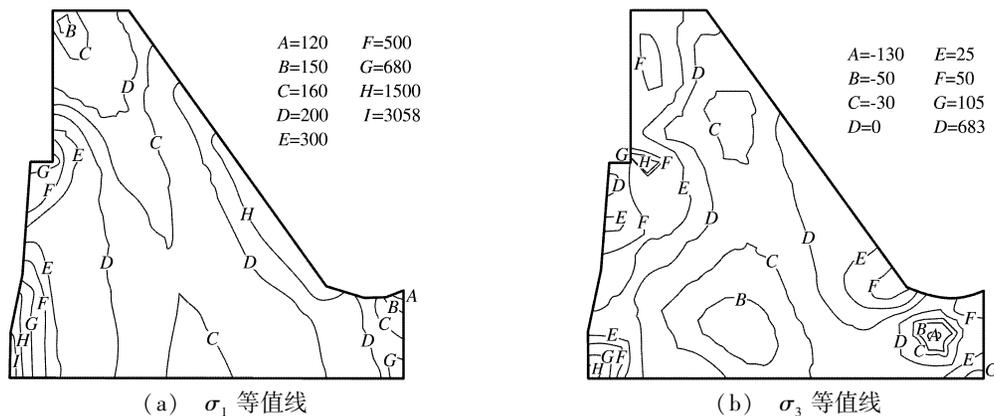


图5 溢流坝段中间断面 σ_1, σ_3 等值线(单位: kPa)

Fig.5 Contours of the intermediate section of the overflow section (unit: kPa)

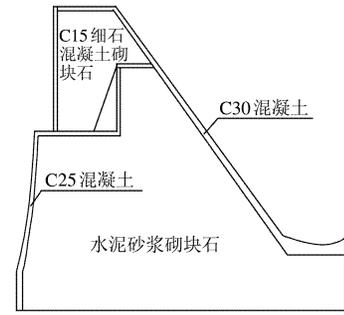


图4 溢流坝段筑坝材料分区
Fig.4 Construction material zoning in the overflow section

动态应力与静态应力叠加后,坝体可能最大总压应力 σ_3 为 -4 240 kPa,出现在坝趾. 坝体可能最大拉应力 σ_1 为 2 630 kPa,出现在坝踵处,但范围很小.

整个坝体的竖向正应力 σ_y 均为压应力,在坝体内部 σ_y 自底部至坝顶逐渐减小,最大压应力为 3 803 kPa,出现在坝趾处.

2.3 坝体位移

溢流坝段中间断面的 x, y 向及总位移响应见图 6. 可见, x 向动位移随坝体高程的升高而增大,最大值为 5.99 mm,同一高程水平截面上坝体各点水平动位移十分接近. y 向动位移在同一高程自上游面向下游面逐渐减小,坝体上游侧的 y 向动位移明显大于下游侧,最大值为 2.35 mm. 大坝总动位移自坝基至坝顶逐渐增大,在坝顶上游侧达到最大值为 6.47 mm.

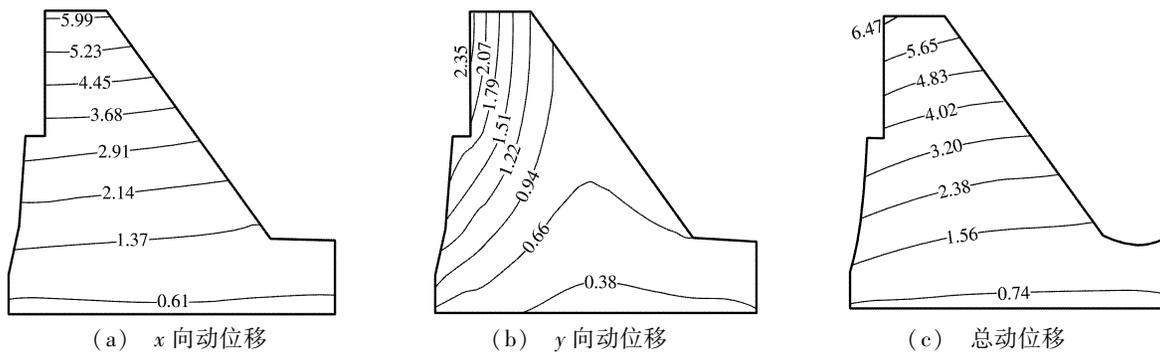


图 6 溢流坝段中间断面位移等值线(单位:mm)

Fig. 6 Contours of displacement on the intermediate section of the overflow section (unit: mm)

3 结 语

(1) 宝泉水库浆砌石重力坝三维有限元动力计算结果表明,在地震作用下,大坝的应力和位移分布合理,坝体的应力总体上均能满足强度要求. 在动力作用下,坝踵处出现了范围很小的拉应力区,只是局部不能满足抗拉强度的要求. 可提高坝踵的混凝土强度等级或局部采用钢筋混凝土结构.

(2) 坝体上游面及坝体内的正应力 σ_y 均未出现拉应力, σ_y 最大值出现在坝趾处,且小于水泥砂浆砌块石极限轴心抗压强度^[4],故坝体能满足强度要求.

参 考 文 献:

- [1] 黄河水利委员会勘测设计研究院. 宝泉抽水蓄能电站可行性研究报告[R]. 郑州:黄河水利委员会勘测设计研究院, 1997.
- [2] DL5073-2000, 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [3] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2000. 424-425.
- [4] SL25-91, 浆砌石坝设计规范[S].