

高拱坝表孔对坝体应力变形影响分析

杨 胜¹, 彭显国²

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 拱坝坝顶开设大孔口, 破坏坝顶拱圈的连续性, 造成孔口局部应力集中, 而孔口受进出口悬臂结构和闸墩影响, 应力分布复杂, 在多荷载联合作用下可能导致孔口局部混凝土开裂和裂缝的发展, 进而影响坝体的正常运行, 对大坝的安全造成影响。结合实际工程, 建立了不同表孔结构形式的拱坝模型, 基于 ANSYS 中的子模型技术进行了三维有限元静、动力计算分析。通过分析不同孔口宽度、高度、不同形式的水平梁及闸墩情况下表孔局部应力分布情况及其对坝体应力变形分布的影响, 为高拱坝表孔的布置及优化设计提供了参考依据, 对节省工程投资具有重要意义。

关键词: 拱坝; 孔口应力; 三维有限元; 子模型; 水平梁; 闸墩

中图分类号: TV7; TV222; TV642. 4

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2014)05-0074-03

1 概 述

目前我国西南地区涌现出一大批已建和待建的高拱坝, 泄洪量不断攀升, 坝顶开设表孔尺寸日益增大。坝顶开设大孔口, 造成坝顶不能形成连续性拱圈, 且坝顶一般较薄, 设置弧形闸门又需要一定的空间, 从而要求在表孔的上、下游增设支承水平梁及闸墩, 使得表孔结构变得十分复杂。此外, 孔口会造成局部应力集中, 可能导致孔口局部混凝土开裂和裂缝的发展, 进而影响坝体的正常运行, 对大坝的安全造成影响, 是大坝设计中较为关注的问题之一。拱坝应力状态呈典型三维分布特征, 孔口简化为二维计算必然损失精度, 无法真实地描述孔口周围的应力分布规律, 分析其影响因素。笔者以某工程的表孔为研究主导, 建立了不同表孔结构形式的拱坝模型, 基于 ANSYS 中的子模型技术进行了三维有限元计算分析, 以了解不同孔口尺寸、不同形式的水平梁及闸墩情况下表孔局部应力分布情况及其对坝体应力变形的影响, 从而为高拱坝表孔的布置及优化设计提供了参考依据, 对节省工程投资具有重要意义。

某水电站枢纽位于高山峡谷区, 拦河大坝为对数螺旋线双曲薄拱坝, 最大坝高 250 m。坝身泄洪采用表孔、深孔(底孔)联合泄流方式。三个泄洪表孔布置于坝顶中部, 由进口段、平直段、WES 曲线段和反弧段(左、右表孔包括鼻坎段)或斜直段(中表孔包括跌坎)组成。三个进口共用

一扇平板检修门, 每孔布置一扇弧形工作门, 单孔净宽 13 m; 消能工为椭圆及蝙蝠型舌型挑(跌)鼻坎。

2 计算模型

拱坝整体模型包括整个坝体、地基及表孔闸墩结构等, 没有考虑坝体廊道及深孔(底孔)的影响。子模型选取表孔所在位置的四个坝段, 并通过比较切割边界上的应力结果与整体模型相应位置的结果是否一致验证了子模型边界的合理性。在保证计算精度的前提下, 对表孔结构的主要研究部位尽量精确模拟, 对次要部位合理简化。整体模型、子模型网格剖分基本采用八节点六面体单元, 部分通过四面体实体单元进行过渡。拱坝整体、子模型有限元模型见图 1、2。

计算工况为正常蓄水位、设计洪水位两种, 主要考虑的荷载有水压力、扬压力、泥沙压力、坝体

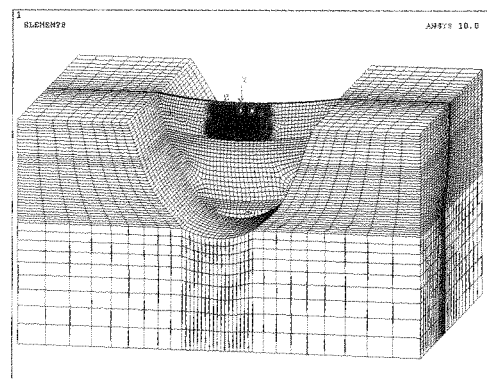


图1 拱坝整体有限元模型示意图

收稿日期: 2014-06-01

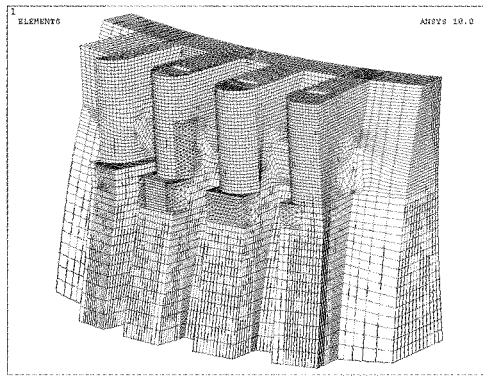


图2 子模型有限元模型示意图

自重、弧门推力以及温度荷载等,荷载组合情况见表1。其中水荷载简化计算,即在上、下游坝面施加静水压力,坝底及坝肩施加扬压力(坝底扬压力的计算考虑了防渗帷幕及排水管的作用);表孔泄流时根据水工模型试验所得水面线简化施加水道水压力;弧门挡水时,弧门上游均为相应水头的静水压力;检修情况考虑进口事故检修门挡水,检修门上游为相应水头的静水压力,检修门后无水压力。根据设计施工资料计算得到坝体温度场(泄水时孔内为孔口库水温边界,检修时孔内是气温边界),进而计算出温度引起的初应变,而后求得相应的初应变引起的等效结点温度荷载,最后按通常的求解应力方法求得温度应力。

表1 荷载组合表

工况	荷载				
	自重	静水压力	温度荷载	扬压力	泥沙压力
工况1.正常蓄水位	√	√	温降	√	√
工况2.设计洪水位	√	√	温升	√	√

3 表孔对坝体应力影响分析

通过对坝体开设表孔及不开孔模型有限元计算成果进行对比分析可知:坝顶开设表孔后,由于拱向作用被削弱,孔口周边的X、Y、Z向应力受到很大的影响。上、下游的孔口周边均出现小范围的X、Z向拉应力;孔口附近的Y向应力总的趋势是压应力较无孔时有所减小,且越接近孔口降低越多,局部出现拉应力。孔口侧壁三向均出现大范围的拉应力,但其值不大;孔口角沿应力集中现象较明显,Y、Z向压应力均有较大幅度的增加;孔口各向位移均略有增大。现从开孔尺寸(不同宽度、高度)、孔口形式(水平梁、不连续牛腿)等方面分别进行计算分析,进一步研究了表孔应力变

形分布及其对坝体应力变形的影响。由于两种工况下坝体应力变形分布规律基本一致,故笔者仅对工况1下的计算结果进行分析。

3.1 孔口宽度对坝体应力变形影响分析

为了探讨开孔宽度(孔口总宽度)对坝体应力变形的敏感性分析,分别对坝顶开设3孔、5孔、7孔、9孔几种情况进行计算分析。每孔尺寸为13 m×17 m(宽×高),孔之间设有闸墩,孔口总的宽度占顶拱弧长比例分别为8.36%, 13.93%, 19.5%, 25.1%。各方案孔口关键部位的应力值见表2。从计算成果分析可知,坝顶设置不同数目的孔口,对坝体下部的影响很小,随着孔口宽度(总的宽度)的增大,坝体上部X、Z向位移逐步增大,而Y向位移基本不变。

开设不同数目孔口时,孔口周边及附近应力均有变化。5孔方案坝体上、下游面孔口周边及孔口侧壁的拉应力值最大;表孔数目由3孔增加到5孔时,孔口周边及附近的拉应力略有增大;由5孔增到7、9孔时,拉应力值逐步降低,但Y向应力降幅很小。可见,总孔口宽度占顶拱弧长比例较小时,加大孔口宽度使得孔口局部的拉应力值增大;但是,当比例增到20%左右时,再增加总宽度,使得顶部拱圈进一步被削弱,传递的力减小,孔口局部应力反而开始降低。

3.2 孔口高度对坝体应力变形影响分析

为了进一步研究坝体表孔尺寸对坝体应力变形分布规律的影响,以坝顶开设3孔的情况为例,分别计算孔口高度为7 m、12 m、17 m、22 m四种方案的坝体及表孔局部应力变形分布,各方案孔口关键部位的应力值见表3。从计算成果可知,改变表孔的孔口高度对坝体下部的影响很小。随着孔口高度的增大,坝体上部X、Y、Z三向位移均逐步增大,但最大值出现的部位一致。孔口高度为22 m时坝体位移最大,X、Y向拉应力最大,Z向压应力最大,而孔口高度为7 m时,Z向拉应力最大(1.5 MPa)。

孔口高度由7 m渐变为22 m时,孔口局部应力变化趋势为X、Y向应力略有增大,Z向应力减小,Y向拉应力区域分布位置变化很大。当孔口高度与坝高之比达到一定程度(22/250=8.8%)时,进一步增加孔口高度,Y向拉应力仍有增加,但X、Z向拉应力基本不变。

表2 不同孔口数目时孔口关键部位应力值表

方案	部 位								
	上游面孔口周边			孔口侧壁			下游面孔口周边		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
3表孔	-0.2	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	-0.1	-0.5	0.5
5表孔	-0.1	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	-0.1	-0.3	0.8
7表孔	-0.1	0.7	0.5	0.5	0.7	0.5	-0.1	-0.3	0.5
9表孔	-0.1	0.7	0.4	0.3	0.7	0.4	-0.1	-0.5	0.4

注:压应力为负,拉应力为正。

表3 不同孔口高度时孔口关键部位应力值表

方案	部 位								
	上游面孔口周边			孔口侧壁			下游面孔口周边		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
3表孔	-0.2	0.3	0.6	0.4	-0.4	1.5	-0.2	-0.4	0.6
5表孔	-0.1	0.3	0.6	0.4	0.6	0.6	-0.1	-0.5	0.6
7表孔	-0.2	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	-0.1	-0.5	0.5
9表孔	-0.2	0.7	0.5	0.5	0.7	0.5	-0.2	-0.5	0.5

注:压应力为负,拉应力为正。

3.3 孔口形式对坝体应力变形的影响分析

表孔流道、上下游悬臂、闸墩、水平大梁、不连续牛腿等区域的应力变形是设计中极为关注的问题,关系到结构设计、孔口配筋、体型优化等,不同孔口形式势必影响到孔口及周边应力变形的分布。笔者分别以水平梁式孔口方案和不连续牛腿式方案为例对此进行探讨。

设置水平梁及闸墩后,表孔边墩侧壁的X、Y向拉应力大幅度增加,主要分布于边墩与水平梁交接部位的上游及下部,X向最大拉应力为3.5 MPa,Y向最大拉应力为2.5 MPa;下游悬臂与边墩交接处外侧Y向拉应力增大,最大拉应力为1.9 MPa;Z向应力变化较小。表孔其余部位应力变化不大。与水平梁方案相比,不连续牛腿方案的边墩过流侧壁X向应力降低,由3.5 MPa减小到2.7 MPa,且拉应力区下移;Y向拉应力明显降低,最大拉应力由2.5 MPa减小到1.7 MPa,且拉应力区域明显减小,主要分布于牛腿与边墩交接处及牛腿下部;边墩进、出口外侧壁的Y向拉应力明显增大,最大拉应力为2.9 MPa,比水平梁方案增大1 MPa。可见,两种方案各有优越性及不足,应根据泄水、交通、金结安装等要求综合考虑采用。

4 结 语

研究表明:拱坝坝顶开设表孔及增设水

平梁和闸墩对坝体应力变形影响是局部的,主要集中在孔口周边及附近,而对坝体的下部几乎没有影响。这是由于孔高与坝高之比(17 m/250 m)较小之故,仅为0.07。增设弧门支撑结构及闸墩增加了孔口附近坝体的厚度,能缓解孔口周边的应力状态,明显改善了孔口对坝体的削弱作用,但表孔边墩侧壁的X、Y向拉应力大幅度增加,水平梁上产生了一定的应力集中,孔口周边强度需进一步加强,水平梁及不连续牛腿方案各有优势,在满足泄水、交通、金属结构安装要求的前提下,有待进一步优化表孔结构形式,改善应力状态。

参考文献:

- [1] 陈进,黄薇,丁茜.大坝矩形孔口应力状态分析[J].水力发电,2000,46(12):21-24.
- [2] 赵小莲,张仲卿.增设孔口牛腿对双曲拱坝应力的影响[J].广西大学学报(自然科学版),2003,28(4):333-336.
- [3] 车铁,宋玉普.混凝土高拱坝孔口三维非线性分析[J].大连理工大学学报,2003,23(2):218-221.
- [4] 王进廷,杨剑,王吉焕,等.二滩拱坝应力仿真及参数敏感性分析[J].水利学报,2007,38(7):832-837.

作者简介:

杨胜(1983-),男,四川巴中人,工程师,硕士,从事水利水电工程移民安置设计工作;

彭显国(1982-),男,四川攀枝花人,工程师,学士,从事水电工程开发建设管理工作。

(责任编辑:李燕辉)