

块泽河电站拱坝有限元等效应力强度校核

苏志敏¹, 肖伟荣¹, 王洪¹, 李新才²

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051; 2. 中国水利水电十四局设计院, 云南 昆明 650041)

摘要: 有限元等效应力法是拱坝设计新规范规定的两种强度校核方法之一,也是新规范规定的拱坝强度设计标准.文中借助于有限元软件 ANSYS7.1,对块泽河电站拱坝进行有限元计算及其等效应力计算,并按规范规定的相应强度标准进行校核.介绍有限元等效应力法在拱坝设计中的运用实例.

关键词: 有限元等效应力;强度设计标准;ANSYS7.1

中图分类号: TU459.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)01-0028-05

Strength Checkout of Finite Element Equivalent Stresses for Kuaizehe Arch Dam

SU Zhi-min¹, XIAO Wei-rong¹, WANG Hong¹, LI Xing-cai²

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. Design Institute, Hydraulic and Hydropower Fourteenth Engineering Bureau, Kunming 650041, China)

Abstract: The finite element equivalent stress method is one of the two checkout criteria ordered by the new design specification for concrete arch dams, and it is a new strength design criterion too. The finite element stresses and the finite element equivalent stresses in the arch dam in KUIZHE river power plant are calculated by using today's popular international finite element software ANSYS7.1, and the latter is checked by the corresponding strength criterion in the design specification. An example of the finite element equivalent stress method in engineering design practice is described.

Key words: finite element equivalent stress; strength design criterion; ANSYS7.1

0 引言

《混凝土拱坝设计规范》(SL282-2003)已于2003-06-01开始实施.新规范中,关于拱坝强度分析规定:“拱坝应力分析应以拱梁分载法或有限元法计算成果,作为衡量强度安全的主要标准;用有限元法计算时,应补充计算‘有限元等效应力’”.借助于有限元软件 ANSYS,在块泽河电站拱坝设计中,我们对坝体进行了3种设计方案、共计13种工况的有限元计算.同时,借助于 ANSYS 的后处理功能,完成了特征结点等效应力计算^[1].文中介绍推荐方案的计算成果,作为有限元等效应力法的运用实例.

推荐方案为单心圆单曲薄拱坝,坝体壳体结构最大高度74 m、最大厚度15 m,壳体结构以下为约20 m的人工混凝土基础.

块泽河电站位于云南省富源县块泽河上,为引水式电站.坝址处河谷狭窄,宽高比仅0.8,为V形河谷,平面上向下游收缩,坝肩岩体坚硬完整,风化深度浅,但河床冲击层较深.

收稿日期:2004-07-15.

第一作者简介:苏志敏(1961~),男,副教授.主要研究方向:水工结构研究.

1 计算情况

1.1 荷载及荷载组合

块泽河电站拱坝为薄拱坝、高坝, 坝址处风速不大, 处于亚热带地区, 水库不结冰。因此, 计及的荷载有: 自重、静水压力、泥沙压力、温度荷载、地震荷载、扬压力、浪压力、冰压力不计。其中, 自重、温度荷载按体荷载考虑, 静水压力、泥沙压力、地震荷载按面荷载考虑。荷载计算见后。

按照规范, 选择 6 种工况进行计算。基本组合工况有 2 种, 特殊组合工况有 4 种, 分别如下:

- 1) 基本组合有: 正常蓄水位情况 + 设计正常温降(工况 1);
正常蓄水位情况 + 设计正常温升(工况 2);
- 2) 特殊组合有: 校核洪水位情况 + 设计正常温升(工况 3);
正常蓄水位情况 + 设计正常温降 + 地震荷载(工况 4);
正常蓄水位情况 + 设计正常温升 + 地震荷载(工况 5);
1561 m 水位情况 + 设计正常温升 + 地震荷载(工况 6)

水压力荷载按面荷载三角形分布径向作用于坝面; 温度荷载为计算体各结点的温度与封拱温度的温差, 按体荷载作用于计算体。计算体各结点的温度通过规范^[2]规定的温升温降边界温度按有限元热分析得到; 地震荷载按拟静力法计算, 仅考虑水平向地震惯性力和水压力, 按规范^[3]计算, 以面荷载的方式径向作用于坝面。

1.2 有限元计算模型

计算模型的几何结构和单元结构见图 1。坝基面距模型地基下游边界 90 m 左右, 一倍多坝高, 距上游边界 30 m 左右, 坝顶端部距左右边界 60 m 左右, 坝顶距顶边界 11 m, 坝底距底边界 30 m 左右。热分析时, 模型地基左、右、底边界取多年平均气温约束; 地表和坝面取温升或温降的规范计算值约束。结构分析时, 坝表面、地基表面、地基上边界、地基顶边界自由; 地基下边界顺河流向约束, 底边界竖向约束, 左右边界垂直河流向约束。模拟地表面曲面变化, 模拟坝基开挖轮廓, 模拟坝体泄水表孔的存在。严格按照设计图纸的坝体形状及尺寸建立模型。体形状规则部分采用 20 结点六面体曲边单元, 坝体形状不规则部分及坝基采用 10 结点四面体曲边单元。模型结构由以上两种单元集合组成。单元总数 20 728 个, 结点总数 30 753 个。单元边界尺寸在坝体部分不大于 5 m, 由坝体部分向模型边界逐渐放大。模型由基岩和坝体混凝土两部分材料组成。材料参数见表 1。

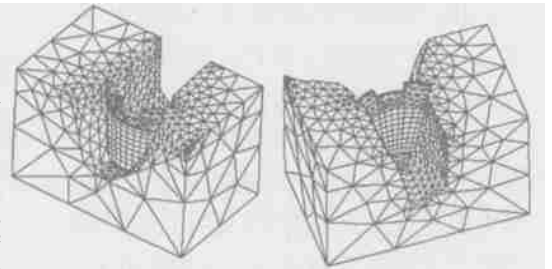


图 1 计算模型
Fig. 1 Calculation model

每种工况的计算均分两步完成。首先进行温度场的计算, 包括边界温度和结构内温度场的计算。边界温度的计算采用规范公式, 结构内的温度场计算采用有限元法。然后进行结构计算, 包括温度场与封拱温度的温差荷载、自重、静水压力、泥沙压力、地震荷载的计算以及它们的各种组合工况产生的应力场、位移场的计算。温差荷载、自重、静水压力、泥沙压力、地震荷载的计算采用规范公式, 结构应力场、位移场的计算采用有限元法。

因坝址附近无气象站, 边界温度的计算资料按罗平县气象站 30 年统计资料采用, 两地海拔基本一致。

表 1 基岩和坝体混凝土材料参数

Tab. 1 Material parameters of rock foundation and dam concrete

材料	参 数				
	密度 / $g\ cm^{-3}$	弹性模量 / MPa	泊松比	热导率 / $W(m\ k)^{-1}$	热膨胀系数 / $m\ c^{-1}$
混凝土	2.45	2.8×10^4	0.17	2.4	1×10^{-5}
基岩	2.7	3×10^4	0.2	1.8	1×10^{-5}

2 有限元计算成果及分析

限于篇幅,文中只给出正常水位加温降的坝体第1和第3主应力成果.第2主应力值位于第1和第3主应力之间.见图2(左图为上游面,右图为下游面.拉为正,压为负).

由图2可以看出,温降时坝体中部上游面受压下游面受拉,而边缘上游面受拉下游面受压.最大拉应力发生在上游面边缘,为4.5 MPa;最大压应力发生在下游面边缘,为5.2 MPa.

总结6种工况的计算成果,可得如下结论:(1)温降情况下各种工况的坝体应力分布规律基本一致,温升情况下各种工况的坝体应力分布规律也基本一致.说明温度作用十分显著,其作用效果占主导地位.(2)温降对坝体应力不利,温升对坝体应力有利,温降使坝顶向下游位移,温升使坝顶向上游位移,符合通常规律.温降不仅使上游面边缘产生较大的拉应力(基本工况时为4.5 MPa,地震工况时为5.4 MPa左右),也使下游面中部产生较大的拉应力(基本工况时为3 MPa,地震工况时为3.5 MPa左右);温升不仅使下游面中部较大的拉应力消失,也使上游面边缘应力由受拉转变为受压.温升产生的坝顶附近下游面边缘拉应力(为3 MPa左右)也比温降时小.同时,温升使坝顶附近上游面边缘压应力加大到12 MPa左右.(3)温降与温升的变化使坝体应力在同一部位拉压对调.坝顶附近边缘温降时上游面受拉、下游面受压,而温升时上游面受压、下游面受拉.(4)温降时坝体下游面中部产生较大拉应力的原因可能是下游坝面和河谷表面温度较低(为7.8℃),同时收缩造成的.(5)由各种工况计算成果可推断,温降是拉应力控制工况,温升是压应力控制工况.

3 有限元等效应力计算及成果

根据新规范有限元等效应力的计算原理及Ansys 7.1的后处理功能,对各种控制工况下坝体上下游面上的结点,采用以下方法和步骤计算等效应力^[4]:

3.1 等效内力的计算

效内力为结点径向对应的单位单元上的内力.单位单元定义为拱圈中心线宽度为1的梁截面、单位高度拱径向拱截面及上下游面共同组成的体单元.作用在该单元上的内力通过局部坐标下的有限元应力沿厚度积分而得.局部坐标为计算层拱圈中心线上的柱坐标.计算公式如下:

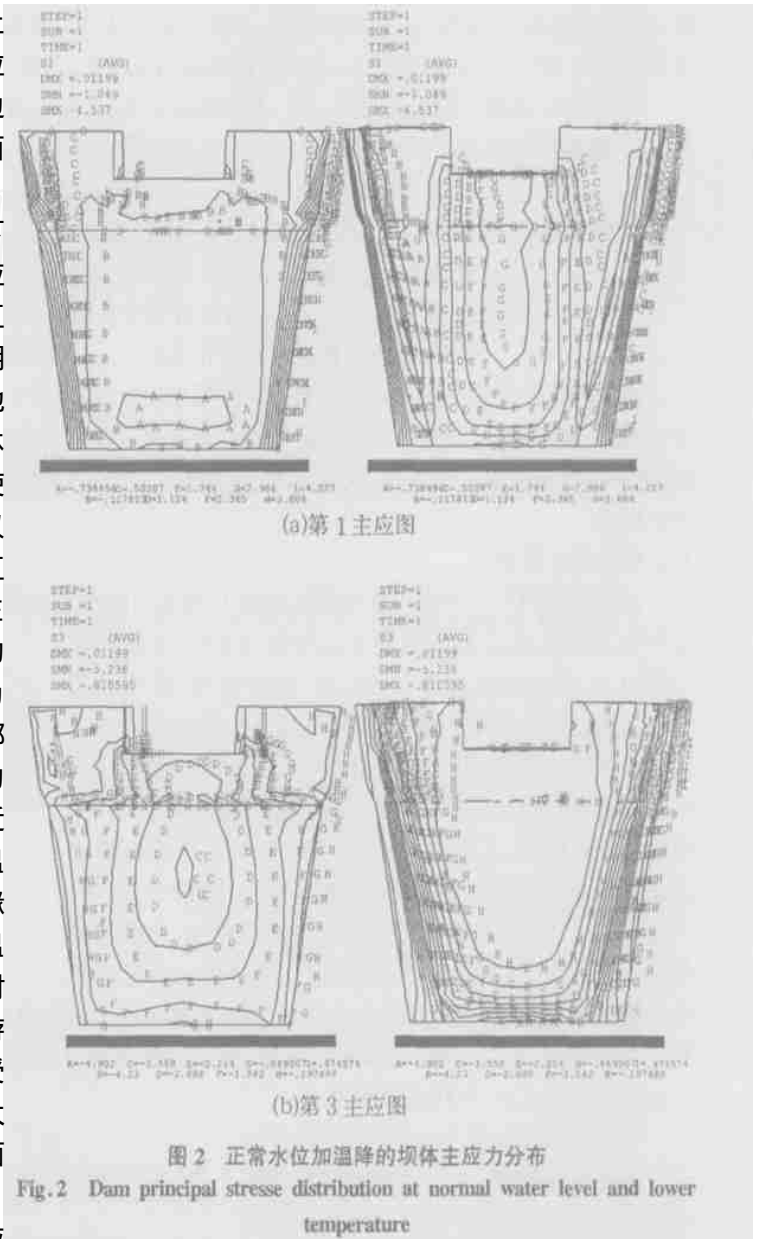


图2 正常水位加温降的坝体主应力分布
Fig.2 Dam principal stress distribution at normal water level and lower temperature

1) 梁截面内力

$$W_b = \int z(1 + y/r) dy; \quad M_b = \int (y - y_0) z(1 + y/r) dy$$

$$Q_b = \int xy(1 + y/r) dy; \quad V_b = \int xy(1 + y/r) dy$$

各公式分别为弯矩、切向剪力、径向剪力和扭矩, y_0 为截面形心坐标. x 为切向、 y 为径向、 z 为竖向, 坐标原点在拱圈中心线上.

2) 拱截面内力

$$W_a = \int x dy; \quad M_a = \int xy dy; \quad V_a = \int xy dy$$

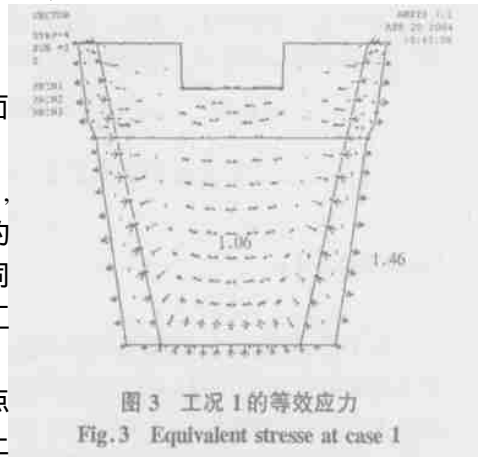
分别为切向推力、径向弯矩、径向剪力.

3.2 等效应力的计算

在获得单位单元的内力后, 就可按材料力学公式^[4]计算坝面即结点上的等效主应力. 由于具体计算公式繁杂, 这里不再列出.

由有限元计算成果可看出, 相对于水位变化和地震荷载而言, 温降、温升的变化对应力的影响占主导地位. 工况 1 是基本组合的拉应力控制工况, 工况 4 是特殊组合的拉应力控制工况; 工况 2 同时是基本组合和特殊组合压应力控制工况. 因此, 只计算此 3 种工况坝体的有限元等效应力.

利用 ANSYS7.1 后处理的路径操作, 首先创造需要计算结点的径向路径, 将需要的有限元计算值映射到路径上, 然后对路径上的值按公式进行积分和四则运算, 可得到该计算结点的等效应力. 操作较为繁琐. 特征点的特征应力成果如下.



工况 1 的等效应力最大拉应力发生在上游坝面边缘中下部, 为 1.46 MPa (见图 3).

表 2 坝体应力与控制标准

Tab.2 Dam stress and controlling criterion

拉应力控制/MPa				压应力控制/MPa			
工况 1(基本荷载加温降)		工况 4(地震加温降)		工况 2(基本荷载加温升)		其它工况	
最大拉应力	标准	最大拉应力	标准	最大压应力	标准	最大压应力	标准
1.46	1.5	1.76	2.0	4.97	10.9	<4.97	10.9

3). 工况 4 的等效

应力最大拉应力发生在上游坝面边缘中上部, 为 1.76 MPa. 工况 2 的等效应力最大压应力发生在上游坝面边缘中上部, 为 4.97 MPa. 最大等效应力与标准的比较见表 2.

由表 2 可看出, 坝体应力满足强度标准.

4 结 语

有限元等效应力法是拱坝设计规范新规定的坝体强度校核方法, 其实用性仍然需要工程实践的检验. 在运用中总结完善有限元等效应力法, 将有助于发挥有限元计算能反映坝体开孔、体形局部变化和复杂地基对坝体应力影响的优势, 促进有限元法运用于工程设计, 改进传统的半经验型设计准则, 使强度设计理论更加接近于实际. 通过本次计算分析, 可得到如下一些结论:

- 1) 块泽河电站拱坝的推荐设计方案以有限元等效应力的方式满足规范规定的强度标准. 通过拉压应力及其标准的比较, 拉应力起到更加重要的控制作用.
- 2) 在各种荷载中, 温度作用十分显著, 其作用效果占主导地位. 不仅使得温降情况下各种工况的坝体应力分布规律基本一致, 温升情况下各种工况的坝体应力分布规律也基本一致. 而且使得温降与温升情况下坝体应力在同一部位拉压对调.
- 3) 温降对坝体应力不利、温升对坝体应力有利, 符合通常规律.

4) 与专业软件相比,ANSYS5的优点是交互式三维图形处理功能非常强大.采用它来完成不规整的三维拱坝和地基的力学计算,建模快、计算快,计算成果直观多样化.但虽然其后处理强大,若用GUI操作计算有限元等效应力时,仍十分繁琐.为完成整个坝体各结点的等效应力计算,今后仍需利用软件的UPFs特性,编程专门计算模块,使有限元计算和等效应力计算一次性完成,促进ANSYS运用于拱坝设计.

参考文献:

- [1] 苏志敏,李新才,肖伟荣,等.块泽河电站拱坝结构安全分析报告[R].昆明理工大学,2004,2~24.
- [2] 上海勘测设计研究院.混凝土拱坝设计规范(SL282-2003)[S].北京:中国水利水电出版社,2003.71~76.
- [3] 中国水利水电科学研究院.水工建筑物抗震设计规范(SL203-97)[S].北京:中国水利水电出版社,1997.31~35.
- [4] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,等.拱坝设计与研究[M].北京:中国水利水电出版社,2002.251~268.
- [5] ANSYS Inc, ANSYS Inc. Theory Reference, ANSYS 7.1[Z]. IP Inc., 2002, 89~170.
- [6] 苏志敏,张翔,周禹.土工问题的气固液耦合弹塑性有限技术[J].昆明理工大学学报(理工版)2003,28(5):60~63.

(上接第12页)

为了更科学、更合理地取得变形监测的成果,除了采用推荐的拟稳平差处理方法之外,还要求在具体的工程实际中为利用这一方法创造条件,如前面提到的两核电站,其一是将部分点直接建造在相对稳定的基岩上,另一个建造在稍远离受施工影响的区域.拟稳平差的引入和在实践中的合理运用,对经典平差是一种很好的补充.当在数据处理软件开发过程中,能自动实现拟稳点选取的优化,便可以极大程度地带来计算上的灵活性与科学性.随着核电工程在能源领域里的广阔发展前景,相关数据的不断累积,拟稳平差在核电测量中的应用技术会更加成熟.

参考文献:

- [1] 李青岳.工程测量学[M].北京:测绘出版社,1992.79~409.
- [2] 武汉测绘科技大学.测量平差基础(第三版)[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.183~202.
- [3] 於宗俦,于正林.测量平差原理[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1990.270~274.
- [4] 工厂建设测量手册编写组.工厂建设测量手册[M].北京:测绘出版社,1990.214~224.
- [5] 周江文,欧吉坤.测量误差理论新探[M].北京:地震出版社,1999.1~5.
- [6] 郭建锋,归庆明.基于敏感度分析的病态性诊断[J].测绘科学,2004,29(1):22~23.
- [7] 王旭华,韩涛.边角网粗差定位的改进带权数据探测法[J].测绘通报,2004,322(1):14~16.
- [8] Lirakis C B, Bongiovanni K P. Automated Multibeam Data Cleaning and Target Detection[J]. Proc. IEEE Oceans, 2000.719~723.