

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.010

五强溪大坝表孔预应力闸墩应力复核

赵 春¹,张 军²,杨国祥³,张 蕊¹,裴安荣¹

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100038;2. 中国水利电力对外公司,北京 100011;
3. 湖南五凌电力工程公司,湖南 长沙 410004)

摘要:五强溪表孔闸墩采用预应力钢筋混凝土结构型式.因监测仪器失效,目前难以掌握预应力锚索的预应力损失情况.为论证当前预应力闸墩的安全性,选取 22 号坝段预应力混凝土闸墩作为典型对象,采用三维有限元计算方法进行应力复核计算.对预应力荷载的模拟采用敏感性分析的方法,设定 3 种工况进行计算.通过对计算结果进行分析,并结合监测资料,认为目前闸墩的位移、应力状态正常.

关键词:预应力闸墩 预应力锚索 有限元 应力复核

中图分类号:TV662+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2008)05-0624-04

五强溪大坝泄水建筑物设在河床中部及左侧^[1-2],共布置有 9 个溢流表孔、5 个泄洪底孔、1 个泄洪中孔.表孔闸墩有中墩及边墩 2 种型式,其中中墩厚 5.5 m,边墩厚 4.0 m.溢流表孔采用 19 m×23 m(宽×高)弧形闸门挡水.在正常蓄水位时,表孔闸墩承受弧门支铰传来的推力 52 074 kN,开门瞬时承受的最大门推力为 60 200 kN.根据设计经验和计算、试验结果,表孔闸墩拐角附近的拉应力远远超过混凝土的允许拉应力,为此五强溪表孔闸墩采用了预应力钢筋混凝土结构型式,即弧门支铰支承体采用钢梁型式,并用预应力锚索将闸墩与钢梁连成一体,弧门支臂推力全部由预应力锚索承担.

在预应力锚索施工安装期间,共布置了 29 台锚索测力计^[3],对锚索预应力情况进行监测,获得大量有价值的监测数据,对监控锚索的运行发挥了重要作用.后由于运行年限过长等多种原因,锚索测力计陆续失效,因此目前难以直接掌握预应力锚索的应力损失情况.为论证当前预应力混凝土闸墩的安全性,本文选取表孔 22 号坝段预应力混凝土闸墩作为典型对象,采用三维有限元计算方法^[4-10]进行应力复核计算,并依据计算结果,结合监测资料,对预应力混凝土闸墩的应力分布、变形特点进行分析.

1 预应力混凝土闸墩概况

预应力混凝土闸墩为宽尾墩型式,头部为半圆柱,设有平板检修门槽、弧形工作门槽.门轴推力方向与水平面夹角为 15°11'18".闸墩中预留 5 个施工圆孔,孔径 1.5 m.支承钢梁横断面呈梯形,沿门推力方向高 2.7 m,上游面宽 4.2 m,下游面宽 3.2 m,长为 8.3 m(中墩).

预应力锚束布置形式采用辐射式平行布置.立面上锚索呈扇形布置,将门推力通过锚索分散到闸墩中,平面上采用平行布置.

闸墩主锚束布置型式.在立面上按 5 层由下游向上游呈放射状布置,每层锚束间的夹角为 5.25°.锚固端分别设于预留孔内和支承钢梁下游面上.平面上锚束呈平行布置,每排锚束间的中心距离为 0.5 m.中墩以闸墩中心线为对称轴,每侧各布设 3 排,共 6 排,每排各分 5 层,总计 30 束.

预应力锚束施工采用后装后张法.张拉采用一端整束张拉,单束设计张拉力为 4 280 kN,设计预应力损失 18%,永存吨位 3 500 kN,超张拉力 4 500 kN,超张拉系数 1.051.根据设计,中墩施加 135 000 kN 的预应力.

收稿日期:2008-05-18

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAC14B00)

作者简介:赵春(1975—),男,湖南衡东人,硕士,高级工程师,主要从事大坝安全监测、安全评价方面的研究.

2 三维有限元分析

2.1 计算范围与材料特性

本文选取表孔 22 号坝段预应力混凝土闸墩作为典型对象,建立三维有限元计算模型,除模拟预应力混凝土闸墩、预应力锚索、溢流坝段外,还模拟了宽尾墩、泄洪底孔、钢梁、底孔启闭机桥、检修门槽、挑坎等细部结构.计算范围以建基面高程 30.00 m 作为固定边界,左右方向取中坝块全宽 24.5 m,并视为自由边界;下游方向取至桩号 0+065.00 m.坐标系采用右手直角坐标系,原点为上下游桩号 0+0.00 m,高程 0.00 m,位于预应力混凝土闸墩中心面上;X 轴指向下游为正,Y 轴垂直向上为正,Z 轴指向右岸为正.单元类型采用十节点四面体块体单元,节点总数 193 369,单元总数 134 258.

混凝土密度为 2.4 g/cm³,泊松比 $\mu = 1/6$.混凝土标号有 C10,C15,C20,C25,C30 和 C40 共 6 种,对应 6 个混凝土分区.预应力闸墩混凝土标号主要为 C30 和 C25,钢梁附近区域提高到 C40.单元划分时考虑了坝体的混凝土分区.支承钢梁采用 16 Mn,其弹性模量 $E_s = 205.94$ GPa,泊松比 $\mu = 0.3$,钢梁密度调整为 3.0 g/cm³.

2.2 计算荷载工况

为了解预应力混凝土闸墩在实际运行中不利荷载组合时的应力状态,选取正常蓄水位 110.00 m 时的挡水状态,对应下游水位为 49.10 m.考虑主要荷载为:坝体自重+闸墩预应力(3 种工况)+弧门推力+上游水位荷载(两侧弧门全关,底孔关闭)+下游水位荷载.其中,上游水位荷载作用在闸墩迎水面、闸墩侧面、溢流坝面、底孔四周;下游水位荷载作用在闸墩下游侧、溢流坝下游侧.计算模型施加荷载及边界约束见图 1.

2.3 计算模型

2.3.1 闸墩预应力模拟

鉴于本文计算目的主要是进行预应力损失程度的敏感性分析,闸墩预应力采用集中力来模拟.30 束锚索的预应力作用简化为 30 对集中力荷载.预应力分 3 种情况考虑:(a)实际预应力,即当前吨位.根据施工期锚索预应力监测情况,考虑后期预应力损失较小,当前单支锚索预应力约为 3 900 kN,该工况接近实际情况.(b)永存预应力,即永存吨位.单支锚索预应力为 3 500 kN,该工况属于设计保证情况.(c)预应力严重损失,达到 33% 以上.单支锚索预应力为 3 000 kN,属于恶化工况.

在预应力混凝土闸墩施工孔锚固端,闸墩不同坝轴线桩号(Z 坐标分别为 -2.25 m,-1.75 m,-1.25 m,1.25 m,1.75 m,2.25 m)的 6 个竖直面内,分别对 5 个控制点(即施工圆孔的锚固端位置,分别为表 1 中的 A,B,C,D,E 点)作用 5 个不同方向的集中力,共计 30 个力.在钢梁锚固端,由于力的作用点相距较近,为简化计算,将同一竖直面的力全叠加到中间点上(表 2 中的 C' 点),共计 6 个力.同一竖直面内力的大小和作用点位置见表 1.

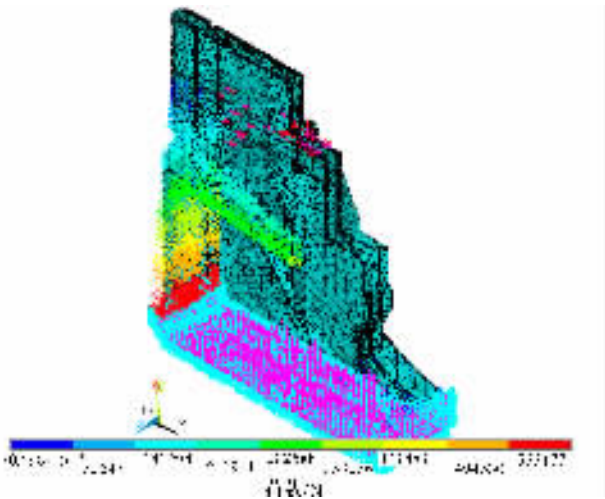


图 1 计算模型施加荷载及边界约束
Fig.1 Loading and boundary restrictions
in calculation model

表 1 施加预应力的控制点坐标和集中力大小

Table 1 Control point coordinates and concentrated force values of the pre-stress loads								
点号	高程/m	桩号	工况 1		工况 2		工况 3	
			单支锚索预应力为 3 500 kN		单支锚索预应力为 3 900 kN		单支锚索预应力为 3 000 kN	
			向下游	竖向上	向下游	竖向上	向下游	竖向上
A	102.103	11.230	3 488.29	286.07	3 886.95	318.77	2 989.96	245.21
B	99.877	16.551	3 447.48	604.06	3 841.48	673.09	2 954.98	517.76
C	95.974	12.304	3 377.74	916.97	3 763.77	1 021.77	2 895.21	785.98
D	94.755	17.942	3 279.67	1 222.20	3 654.49	1 361.88	2 811.15	1 047.60
E	90.144	14.476	3 154.08	1 517.16	3 514.54	1 690.55	2 703.50	1 300.43
C'	102.943	37.974	-16 747.26	-4 546.47	-18 661.23	-5 066.07	-14 354.80	-3 896.97

2.3.2 双侧弧门推力模拟

双侧弧门推力简化为 2 个集中力进行模拟. 整个弧门库水推力为 52 074 kN, 单支臂为 26 037 kN, 弧门支铰中心位置为: 高程 102.0 m, 上下游桩号 0 + 34.5 m, 距闸墩中心线距离 3.31 m.

2.3.3 十节点四面体块体单元

因需要模拟不规则体, 故采用十节点四面体块体单元.

2.3.4 边界约束

建基面高程 30.00 m 处全约束. 左右方向视为自由边界.

3 计算结果分析

各种工况下位移及应力计算结果基本相似, 因第 1 种工况最接近实际情况, 结果分析以该工况为主.

3.1 闸墩整体变形

图 2 为工况 1 的总位移情况. 由图 2 可以看出, 预应力混凝土闸墩具有较大的刚度, 整体变形微小, 且由于结构对称, 变形表现出良好的对称性, 符合实际规律. 各点位移表现出向下游、竖直向下、背向闸墩中心线的形态, 总矢量位移在 0 ~ 3.262 mm 之间, 位移最大点位于闸墩顶部下游侧钢梁附近.

3.2 闸墩应力分布

对工况 1 下整体的第 1 主应力(见图 3)、第 3 主应力分布图进行分析可知, 闸墩区拉应力较大的区域为预应力闸墩的颈部附近和施工预留孔附近, 绝大部分区域拉应力小于 1.04 MPa. 闸墩区压应力较大的区域为预锚固区, 压应力达到 1.65 MPa, 闸墩其他区域的压应力不超过 0.745 MPa. 闸墩内部拉应力较大区也为预应力闸墩的颈部附近和施工预留孔附近. 拉应力最大剖面为桩号 0 + 1.75 m 的剖面, 最大拉应力达到 3.65 MPa, 属于圆孔处的应力集中, 影响区域较小. 闸墩内部压应力较大的区域仍为锚固区, 在施工预留孔附近也产生受压区, 压应力最大值达到 - 4.36 MPa, 大部分区域的压应力在 - 1.65 MPa 以内.

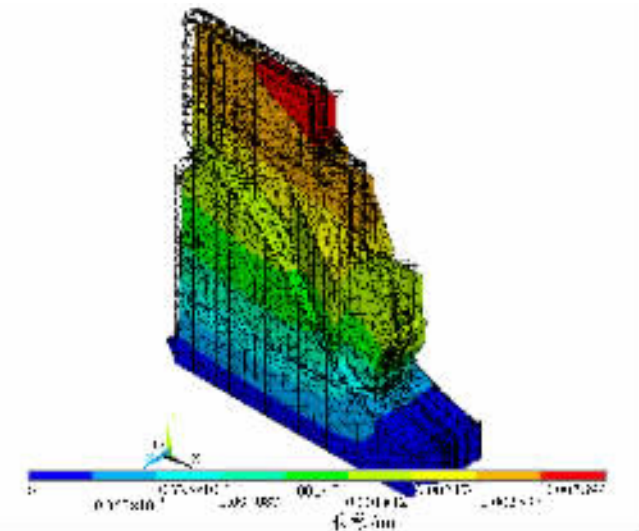


图 2 工况 1 位移矢量云图(与未变形时叠加)

Fig.2 Vector figure of the displacement under the No. 1 condition

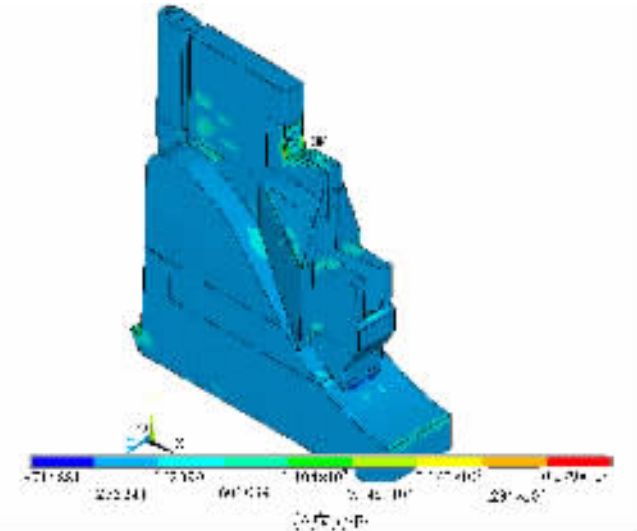


图 3 工况 1 的第 1 主应力(拉应力)量值云图

Fig.3 Vector figure of the first principal stress (tensile stress) under the No. 1 condition

另一方面, 22 号坝段预应力混凝土闸墩布有三向应变计组 26 组(对应无应力计 26 支). 通过应力计算和监测资料分析得知, X 向应力在 - 5.37 ~ 2.53 MPa 之间, Z 向应力在 - 5.25 ~ 2.60 MPa 之间. 实测应力值及其规律与有限元计算结果相符.

因此, 通过设定预应力荷载值的大小, 计算当前吨位、永存吨位及最恶化情况下的结构应力分布情况, 可知施工预留平孔与预应力闸墩的颈部都是较易产生拉应力集中的部位. 从计算结果来看, 拉应力峰值为 3.65 MPa, 影响范围不大. 锚固区的应力状态表明, 整个锚固区基本上为压应力状态. 可以认为, 在目前的荷载组合下, 闸墩的应力状态是正常的.

4 结 语

本文应用三维有限元计算方法,对五强溪大坝 22 号预应力混凝土闸墩进行了应力复核计算.在预应力荷载处理上,采用敏感性分析的方法,预设预应力荷载的 3 种工况.计算结果表明,预应力混凝土闸墩的整体变形量值微小,分布对称,符合实际规律.闸墩施工预留平孔与预应力闸墩的颈部附近拉应力集中,但影响范围较小.整个锚固区应力状态基本为受压.闸墩的位移分布、应力状态正常,闸墩的变形和应力均是安全的.

参考文献：

[1] 五强溪大坝设计复核报告[R].长沙:中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,2006.
[2] 五强溪水电站技施设计报告(水工、科学实验研究)[R].长沙:湖南五凌水电开发责任有限公司,1999.
[3] 五强溪水电站闸墩预应力锚索测试成果(竣工报告)[R].长沙:中国水利水电第八工程局,1997.
[4] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及应用[M].南京:河海大学出版社,1990.
[5] 刘祥生.葛洲坝二江泄水闸预应力闸墩的工作性态[J].人民长江,1994(10):1-5.
[6] 李刚,徐卫军,黄祥,等.三峡升船机结构预应力锚索试验研究[J].长江科学院院报,2004(4):43-46.
[7] 孙乃波,陈胜宏.碗米坡预应力闸墩三维有限元分析[J].水电能源科学,2005(3):74-76.
[8] 宋维胜.预应力锚索技术在鱼潭电站大坝闸墩结构处理中的应用[J].武汉水利电力大学学报,1999,32(4):48-51.
[9] 李守义.预应力锚固闸墩有限元分析研究[J].水资源与水工程学报,2007(6):35-38.
[10] 邹小红.居甫渡水电站预应力闸墩的三维有限元分析[J].云南水电技术,2007(4):29-31,35.

Stress recheck of pre-stressed pier for surface outlets in Wuqiangxi Dam

ZHAO Chun¹, ZHANG Jun², YANG Guo-xiang³, ZHANG Rui¹, PEI An-rong¹

- (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China ;
2. China International Water and Electric Corporation, Beijing 100011, China ;
3. Hunan Wuling Power Engineering Corporation, Changsha 410004, China)

Abstract : Pre-stressed reinforced concrete was used in the piers of surface outlets of the Wuqiangxi Dam. It is difficult to grasp the current condition of pre-stress loss of the pre-stressed cables because of the failure of monitoring instruments. Using the pre-stressed pier of the No.22 dam block as a typical object, a stress recheck was conducted to demonstrate the current safety of the pre-stressed pier using a 3-D finite element method. A sensitivity analysis method was adopted to simulate the pre-stressed loads and three calculation work conditions were considered. Bases on the analysis of calculation results and monitoring data, it is concluded that the pier displacement and stress are in a normal state at present.

Key words : pre-stressed pier ; pre-stressed cable ; FEM ; stress recheck