

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.01.012

亭子口水电站厂坝间设置垫层管可行性研究

崔建华^{1 2} 苏 杰¹ 祁勇峰^{1 2}

(1. 长江科学院材料与结构研究所 湖北 武汉 430010 ;
2. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心 湖北 武汉 430010)

摘要 :为研究亭子口水电站厂坝间设置垫层管的可行性 ,以厂房坝段、厂房以及钢管为研究对象 ,采用三维有限元仿真计算技术模拟厂房坝段以及厂房的浇筑和运行过程 ,计算得到厂坝间相对位移及垫层管段钢管等效应力。计算结果表明 ,厂房蜗壳内设置止推环时 ,运行期高温季节垫层管的等效应力将大于钢材允许应力 ,如果采用垫层管方案 ,需采取必要的结构或工程措施以减小垫层管段的应力。

关键词 :三维有限元法 ;垫层管 ;止推环 ;亭子口水电站

中图分类号 :TV732.4⁺4 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)01-0050-04

Feasibility study on cushion pipes between dam and powerhouse of Tingzikou Hydropower Station//CUI Jian-hua^{1,2}, SU Jie¹, QI Yong-feng^{1,2}(1. Materials and Structure Department of Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China ; 2. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract :In order to study the feasibility of setting up a cushion pipe between the dam and the powerhouse of Tingzikou Hydropower Station, the dam, the powerhouse and the steel pipe were discussed. By use of 3D FEM simulation, the concrete placing process of the dam and powerhouse was simulated. The relative displacement between the dam and the powerhouse and the equivalent stress of the cushion pipe were calculated. The results indicate that the equivalent stress of the cushion pipe is larger than its allowable stress in hot season if the thrust ring is set in the spiral casing. In order to reduce the stress of the cushion pipe, some structural or technical measures should be taken when the cushion pipe is used.

Key words :3D FEM ; cushion pipe ; thrust ring ;Tingzikou Hydropower Station

亭子口水电站工程等级为Ⅰ等大(1)型 ,大坝坝顶高程为 466.00 m ,正常蓄水位为 458.00 m ,坝高为 110 m ,厂房为坝后式 ,共设有 4 台机组 ,设计水头为 120 m ,总装机容量为 1 100 MW ,单机容量为 275 MW。引水管道为坝后背管式 ,在厂坝分缝处暂采用垫层管方案。

大坝与厂房之间设有温度沉陷缝 ,使厂房、大坝各自受力明确。厂坝连接处的钢管一般采用伸缩节 ,以适应二者之间的相对变形 ,但伸缩节的制造和安装不仅增加了工程投资 ,也给运行期的止水和维护带来很多麻烦。近年来 ,国内外很多工程都提出采用外包软垫层的一段压力钢管(简称垫层管)取代伸缩节。很多学者针对实际工程开展了相应的研究 ,林绍忠等^[1]针对三峡工程 ,就垫层管合拢时间、垫层管下游端是否设止推环等进行了系统的分析比

较 ,吴海林等^[2]针对某实际工程 ,提出以一定长度的伸缩管代替常规伸缩节 ,使结构位移和钢管应力满足要求 ,申艳等^[3]针对紫坪铺水利枢纽工程 ,论证了引水系统取消伸缩节的可行性 ,赵德海等^[4]讨论了三峡工程取消厂坝间伸缩节后应采取的结构措施和施工过程。综上所述 ,这项技术的应用取决于垫层管段的应力是否满足设计要求 ,而该段钢管的应力分析比较复杂 ,除内水压力引起的钢管应力外 ,在水压和温度荷载作用下 ,大坝和厂房的相对变形所造成的垫层管两端的相对位移对钢管应力也有很大的影响。

垫层管取代伸缩节的技术曾应用于三峡工程厂房岸坡坝段^[1,4]。与三峡工程相比 ,亭子口水电站工程的坝高和管径都较小 ,但基岩弹性模量较低(最高约 20 GPa ,低的只有 1 ~ 2 GPa) ,这会影响到大坝

基金项目 :中央级公益性科研院所基本科研业务费(YWF0908) ;水利部公益性行业科研专项(200901066) ;“ 十一五 ”国家科技支撑计划(2006BAB04A01) ;国家自然科学基金(50539010)

作者简介 :崔建华(1972 —) ,男 ,河南叶县人 ,高级工程师 ,从事水工结构温度及结构应力计算工作。E-mail :cuijh@mail.cnrsi.cn

和厂房的相对变形。厂房坝段坝体管道以下采用碾压混凝土,降温较慢,合拢时达不到稳定温度,从而影响到运行期相对于合拢时的结构温度变形。厂房蜗壳采用外包垫层的埋入方式,在运行期内水压力的推动下,蜗壳在水平面上会产生绕水轮机中心轴的转动变形。基于上述原因,笔者以一典型机组段为研究对象,采用三维有限元仿真计算技术^[5-6],模拟厂房坝段和厂房的浇筑和运行过程,计算得到垫层管段的相对位移及钢管应力,为确定厂坝连接处管道的结构形式提供科学依据。

1 计算模型及计算条件

1.1 计算模型及边界条件

选取厂房坝段某一机组段为研究对象,坝段宽度为 28 m,建基面高程为 349.00 m。计算模拟范围包括坝体、厂房、尾水管及部分基础,其中基础在上下游及深度方向上各模拟 1 倍坝高。计算模型见图 1,模型单元数为 133993 个,节点数为 147029 个。

温度计算边界条件为:基础各侧面、底面及坝体两侧面取绝热边界,上、下游水面以下取水温边界,流道内表面运行期取水温边界,其他位置取气温边界。应力计算边界条件为:基础底部取三向约束,上、下游面及两侧面取法向约束,坝段两侧自由。

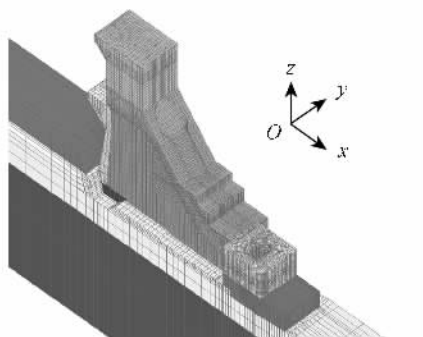


图 1 计算模型(含部分基础)

1.2 主要温度曲线

气温曲线由库区多年旬平均气温拟合得出,公式为 $T_{\text{空}}(t) = 16.6 + 10.3 \sin \omega(t - 105)$, t 为时间(d),以 2010 年 1 月 1 日为计算起点; $\omega = 2\pi/365$ 。参考文献[6],由年气温值确定库水温,水库表面水温表达式为 $T(t) = 18.7 + 10.2 \sin \omega(t - 110)$,距表面 70 m 以下取恒温 13℃,中间高程水温按线性取值。运行期蜗壳内表面水温 $T(t) = 17.3 + 9.0 \sin \omega(t - 120)$ 。

1.3 材料性能参数

a. 混凝土:C15,C20,C25 的弹性模量分别取为 22 GPa,25.5 GPa,28 GPa。泊松比均取为 0.167。导热系数均取为 0.004 2 m²/h,线胀系数均取为 1.04 × 10⁻⁵/℃。C15,C20,C25 的绝热温升 θ 分别为

17.30 $\tau/(2.91 + \tau)$,23.06 $\tau/(1.76 + \tau)$,25.40 $\tau/(1.76 + \tau)$, τ 为混凝土龄期。

b. 基岩:根据地质资料,基岩分为 4 层材料,从下至上依次记为 $K_{\text{I}C}^1, K_{\text{I}C}^2, K_{\text{I}C}^3, K_{\text{I}C}^4$,弹性模量分别取为 2 GPa,20 GPa,2 GPa,8 GPa,泊松比分别取为 0.28,0.20,0.28,0.23,不计自重。热学性能参数同混凝土。

c. 钢材:钢管、座环、固定导叶等钢材的弹性模量取为 210 GPa,泊松比为 0.3,线胀系数为 1.2 × 10⁻⁵/℃。根据有关规范拟定允许应力分别为:膜应力区 217.8 MPa、局部弯曲应力区 276.3 MPa。

d. 垫层:垫层管段垫层厚度为 5 cm,弹性模量为 2.5 MPa。蜗壳部位上半圆垫层厚度为 3 cm,弹性模量为 2.5 MPa,不计泊松比的影响。

1.4 结构荷载

主要结构荷载包括:上、下游水压力,管道内水压力,上游淤沙压力及坝体建基面扬压力。

1.5 垫层管布置

根据设计图纸,背管下平段长度约 8 m,厂房内设有止推环,位于厂坝分缝以下约 2.5 m 处。垫层管位于厂坝分缝处,在厂房区内应设在止推环的上游。考虑到止推环及其肋板的长度,拟定垫层管总长度为 8 m,其中,厂坝分缝线上游(大坝一侧)为 7 m,分缝线下游(厂房区内)为 1 m。垫层管直径为 8.7 m,钢管厚度为 36 mm。

1.6 浇筑与施工资料

a. 厂房坝段施工安排。2010 年 9 月开始进行碾压混凝土浇筑,2012 年 10—11 月浇筑至坝顶高程 465.00 m。混凝土入仓温度:碾压混凝土 12 月至次年 3 月份自然入仓,其他月份采用预冷混凝土入仓浇筑,预冷混凝土出机口温度为 12~14℃。

b. 电站厂房施工安排。2010 年 10 月开始进行混凝土浇筑,2012 年 9 月底完成。浇筑温度如下:11 月为 13℃;12 月、1 月均为 11℃;2 月为 13℃;3 月为 14℃;4 月、10 月基础约束区为 14℃,脱离基础约束区均为 16℃;其他月份为 18℃。

c. 厂坝连接段钢管的合拢时间。垫层管段钢管在合拢后才会承受荷载而产生应力,因此合拢时间是关系到大坝与厂房的相对变位以及运行期钢管温差荷载的重要因素。分别对一年中春夏秋冬 4 个合拢时间进行研究。

2 计算方法与计算方案

2.1 计算过程

根据上述计算模型及计算条件,采用三维有限元法进行仿真计算,模拟厂房坝段和厂房的浇筑及

运行过程,计算运行期相对于合拢时的大坝和厂房的相对变形(厂坝间的变位)以及温度荷载,得到垫层管两端位移及温度荷载,然后取设定长度、位置的垫层管段作为隔离体,将垫层管两端位移(包括线位移与转角)作为边界条件,考虑内水压力、温度荷载,采用精细网格计算运行期垫层管的应力分布,结合钢材允许应力来判断垫层管是否满足设计要求。

2.2 计算方法

2.2.1 温度场和温度应力仿真计算

瞬态温度场采用常规方法计算^[6],即在空间上用有限元离散,在时间上采用向后差分的隐式差分格式。计算中模拟了大坝和厂房的浇筑过程,各个浇筑块的单元组根据浇筑顺序依次生成。考虑到垫层管在合拢后才会承受荷载,因此在应力与变形的分析中,仅从合拢后开始计算,合拢前的荷载(包括结构自重荷载)在其中不产生作用。

2.2.2 接触问题计算方法

在应力与变形的分析中,针对蜗壳钢管与外包混凝土之间的接触问题^[7]进行非线性计算。采用厚度趋于零的八节点接触单元对缝面进行模拟,认为缝面能传递压应力、剪应力和有限的拉应力。设缝面摩擦因数、黏聚力和抗拉强度分别为 f 、 c 和 σ_p ,初始法向间隙为 w_0 ,在荷载作用下产生的缝面两侧法向(n)、切向(t, s)的相对位移分别为 w_r, u_r, v_r ,当 $w_r + w_0 \leq 0$ 时,缝面接触应力与相对位移之间的关系为

$$\begin{cases} \sigma_n = k_n(w_r + w_0) \\ \tau_t = k_t\left(1 - \frac{w_0}{w_r}\right)u_r \\ \tau_s = k_s\left(1 - \frac{w_0}{w_r}\right)v_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_n 为缝面单位面积的法向刚度; k_t, k_s 为缝面单位面积的切向刚度; σ_n 为缝面的法向应力; τ_t, τ_s 为缝面的切向应力。

$w_r + w_0 \leq 0$ 表示此时是法向闭合,如果 $w_0 = 0$,且 $w_r > \sigma_p/k_n$ 则表示此时是法向张开。当缝面法向张开时,缝面不传递任何应力;当缝面法向闭合时,切向应力可能超过抗剪强度而产生滑移,因此切向应力还要满足条件 $\sqrt{\tau_t^2 + \tau_s^2} \leq c - f\sigma_n$ 。

在全过程仿真计算中,以上一时段的缝面接触状态和接触应力作为本时段的初始值,用变刚度法进行接触问题非线性迭代,直至前后 2 次的计算结果接近为止,然后转入下一计算时段。

2.3 计算方案

考虑到温度荷载以及蜗壳钢管设置的止推环会对垫层管位移产生影响,本文重点研究了年气温变

化时厂房蜗壳钢管设止推环(方案 1)与不设止推环(方案 2)全过程仿真时厂房蜗壳钢管设止推环(方案 3)与不设止推环(方案 4)4 种情况下垫层管的变形与应力,并进行了不同基础弹性模量对垫层管段位移的影响分析。

3 成果分析

为使大坝内部温度降到准稳定状态,仿真计算从大坝浇筑混凝土开始至 2035 年。

3.1 温度场

图 2 为厂坝间钢管冬季合拢时施工仿真计算得到的温度场与年气温变化下结构准稳定温度场之间的差值(前者 - 后者)。与年气温变化下的结构温度场相比,坝体内的温度高约 5℃,即合拢时坝体内温度尚未完全降下来。考虑到若干年后降至准稳定温度状态,那么,这个温差会对垫层管段的位移与应力产生影响。

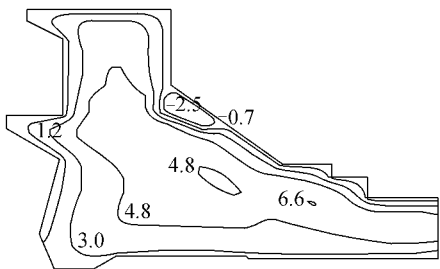


图 2 厂坝冬季合拢时的温差(单位:℃)

3.2 运行期相对于合拢时的垫层管端部位移

垫层管端部位移随时间的变化具有周期性,准稳定温度状态下,每年 2 月份和 8 月份的两端相对位移基本上对应于相对位移的 2 个极值,8 月份的相对位移最大,2 月份的相对位移最小,见表 1。由表 1 可知,垫层管上、下游端相对位移均为负值,表明不论什么季节合拢,垫层管均呈压缩变形。夏季、秋季合拢时相对位移较小,春季、冬季合拢时相对位移较大。设止推环方案(方案 1、方案 3)的相对位移明显大于不设止推环方案(方案 2、方案 4)的相对位移。全过程仿真计算(方案 3、方案 4)的相对位移略小于年气温变化(方案 1、方案 2)时的相对位移。

表 1 垫层管段两端管轴向相对位移 mm

合拢季节	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
	2 月	8 月	2 月	8 月	2 月	8 月	2 月	8 月
春季	-3.15	-5.67	-1.38	-1.92	-2.98	-5.51	-1.50	-2.00
夏季	-1.77	-4.30	-0.77	-1.31	-1.67	-4.19	-0.90	-1.40
秋季	-1.90	-4.43	-1.29	-1.83	-1.61	-4.13	-1.25	-1.75
冬季	-3.28	-5.81	-1.61	-2.15	-2.95	-5.47	-1.58	-2.08

3.3 运行期相对于合拢时的垫层管段应力

表 2 为各方案钢管等效应力最大值,根据第四强度理论,等效应力的计算公式如下: $\sigma_e =$

表 2 各方案钢管等效应力最大值 MPa

方案	运行期	膜应力区	弯曲应力区
1	2月	175	195
1	8月	314	401
2	2月	128	148
2	8月	192	260
3	2月	162	182
3	8月	298	378
4	2月	128	150
4	8月	191	258

注:合拢季节为冬季。

$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta + 3\tau^2}$ 其中 $\sigma_x, \sigma_\theta, \tau$ 分别为管轴向应力、环向应力以及板内剪应力。当 σ_x 与 σ_θ 符号相反时,等效应力较大。

运行期高温季节,管道温升和管轴向变形大,管轴向压应力变大,而环向应力为正值,导致等效应力变大,因此,各方案运行期 8 月时钢管等效应力大于 2 月时的等效应力。设止推环时钢管等效应力明显大于不设止推环时的应力,这是由于止推环限制了垫层管下游端向下游的位移,造成较大的管轴向压缩变形和压应力。设止推环方案,全仿真计算等效应力略小于年气温变化时的等效应力,主要是因为大坝内部逐渐降温,将向上游方向拉动钢管,使垫层管产生拉伸变形,从而减小管轴向的压应力及等效应力。冬季合拢时,设止推环钢管等效应力均超过钢材允许应力,不设止推环等效应力均满足钢材允许应力设计标准。

3.4 基础弹性模量对大坝及垫层管段位移的影响

地质资料显示,与坝体建基岩紧连的约 25 m 深的岩层弹性模量为 20 GPa,再往下约 60 m 高度范围 K_{IC}^1 层的弹性模量仅为 2 GPa。本文针对设止推环方案来研究基础弹性模量对大坝及垫层管段位移的影响。计算结果表明,基岩弹性模量取值 2 GPa、20 GPa 时,坝顶位移分别为 29.32 mm、16.39 mm,两者差值为 12.93 mm;垫层管段端部相对位移则分别为 -3.6 mm、-1.7 mm,两者差值为 1.9 mm,说明 K_{IC}^1 层弹性模量对结构变形有较大的影响。

4 结 语

不论什么季节合拢,垫层管段均呈压缩变形,设止推环时压缩量较大,全过程仿真时,垫层管端部轴向相对位移略小于年气温变化时的数值。 K_{IC}^1 层基岩弹性模量对结构变形有较大的影响。

用垫层管取代伸缩节是否可行,关键在于垫层管段应力情况是否满足设计要求。结果表明,运行期高温季节,垫层管的等效应力将大于钢材允许应

力,此时可以考虑在厂房蜗壳内不设止推环,但应注意垫层管两端相对位移的变化。另外,也可考虑选择合适的合拢时机(如夏、秋季),人工创造垫层管合拢时的温度环境、提高基础弹性模量等措施,以减小垫层管段的应力,使之满足设计要求。

参考文献:

- [1] 林绍忠,刘宁,苏海东.三峡工程水电站厂坝间压力钢管取消伸缩节研究[J].水利学报,2003,34(2):1-5.
- [2] 吴海林,伍鹤皋,张伟.水电站厂坝联结形式与取消伸缩节研究[J].水力发电学报,2006,25(2):118-112.
- [3] 申艳,伍鹤皋,蒋逢超,等.紫坪铺水利枢纽引水系统取消厂前伸缩节研究[J].中国农村水利水电,2004(6):72-74.
- [4] 赵德海,董毓新,陈婧.某大型水电站取消厂坝间压力钢管伸缩节研究[J].大连理工大学学报,2000,40(4):492-496.
- [5] 朱伯芳.有限单元法原理及应用[M].2版.北京:中国电力出版社,1998.
- [6] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [7] 崔建华,苏海东,陈琴.三峡左岸电站蜗壳保压浇筑外围混凝土仿真计算[J].长江科学院院报,2009,26(7):43-47.

(收稿日期 2010-05-06 编辑 骆超)

· 简讯 ·

第十一届全国渗流力学学术会议暨国际渗流力学研讨会将在重庆召开

第十一届全国渗流力学学术会议暨国际渗流力学研讨会将于 2011 年 4 月在重庆市召开。本次会议主办单位为中国力学学会、中国石油学会、中国煤炭学会、中国岩石力学与工程学会,承办单位为重庆大学,协办单位为西南石油大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、重庆交通大学、重庆科技学院。会议主题为:渗流力学的前沿与进展。会议议题如下:渗流力学的新进展、新挑战与战略思考;资源能源开发(石油、天然气、煤层/成气、地热、核能等)与渗流力学;实验渗流力学;计算渗流力学;非达西、非牛顿、非等温、非线性渗流力学新理论;生物渗流力学;环境、化工与渗流力学;物理化学渗流力学;地下水渗流与污染控制;多场多相耦合渗流理论及应用;多孔介质传热与传质分析;其他与渗流相关内容。会议网站: <http://pe.upc.edu.cn/disp.asp?ID=1061> (本刊编辑部供稿)