

上犹江水电站大坝闸墩与廊道顶拱裂缝成因分析

强 晟, 朱岳明, 吉顺文, 王 腾, 胡 亭

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 : 针对江西上犹江水电站大坝闸墩裂缝和检查廊道顶拱的贯穿裂缝, 运用温度场和温度应力的有限元方法对施工和运行过程进行模拟计算, 在运行期重点考虑夏季泄洪冷击和冬季寒潮对开裂的影响, 根据计算结果对裂缝的成因进行分析。计算结果表明, 不同时期的温度应力是产生裂缝的主要原因。提出了裂缝处理和预防的建议。

关键词 : 混凝土重力坝 ; 闸墩裂缝 ; 廊道顶拱裂缝 ; 温度应力 ; 仿真计算 ; 上犹江水电站

中图分类号 : TV662.2 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2007)05-0038-04

Causes of formation of cracks in dam pier and arch crest of gallery at Shangyoujiang Hydropower Station// QIANG Sheng, ZHU Yue-ming, JI Shun-wen, WANG Teng, HU Ting(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The FEM for temperature field and temperature stress was applied to simulation of cracks going through the pier and arch crest of inspection gallery of the dam for Shangyoujiang Hydropower Station during its construction and operation periods. The influences of cool flood discharge in summer and cold wave in winter on cracking during the operation period were focused. According to the result of calculation, the temperature stress in different periods is the main influencing factor for cracking. Finally, some suggestions for crack prevention and treatment were made.

Key words : concrete gravity dam ; crack in pier ; crack in arch crest of gallery ; temperature stress ; simulative calculation ; Shangyoujiang Hydropower Station

始建于 1955 年的上犹江水电站是我国自行设计、自行施工的第一个坝内式厂房水电站。拦河坝为混凝土重力坝, 坝顶全长 153 m, 由 10 个坝段组成。中间 5 个坝段为溢流坝段, 最大坝高 67.5 m, 最大坝底宽度 58.3 m。溢洪道布置在河床部位, 设有 5 个 7 m × 12 m 的孔口。发电厂房设在溢流坝段的空腹内, 装有 4 台 15 MW 的竖轴水轮机组。

闸墩位于大坝中间 5 个溢流坝段内, 中间的 4 个闸墩下游部分内部设有母线洞, 在该部位的两侧均出现 1 条或数条形式各异的斜裂缝, 裂缝基本位于 4 个闸墩的同样部位, 总体成线状, 上游低、下游高, 角度大约 45°。另外 5 个闸墩的下游侧面各存在 1 条水平裂缝, 裂缝出现部位与中间 4 个闸墩的基本相同。检查廊道在庚坝段处廊道顶拱有 1 条约 3 m 长的贯穿裂缝, 下雨及泄洪时有渗漏, 在廊道顶拱部位有明显的析钙现象。经 2003 年 10 月 24 日检查, 分析认为廊道裂缝已贯穿至溢流坝表面。

本文以闸墩裂缝及庚坝段检查廊道顶拱裂缝为研究对象, 运用混凝土温度场和徐变应力场的有限

元法仿真计算分析法^[1-2], 考察大坝施工期和运行期各种因素对裂缝的影响, 分析裂缝成因和裂缝对大坝安全运行的影响。裂缝位置见图 1、图 2。



图 1 检查廊道顶部裂缝的位置



图 2 闸墩上裂缝的位置

1 计算模型和参数

1.1 计算模型

考虑工程的结构形式和结构的对称性,以庚坝段的一半为计算区域,参见图 3。坝前地基长度和坝后地基长度以及地基深度都取为 2 倍坝高,地基内有 2 条材料分界线。图 4 显示了坝内结构,位置较高的廊道为检查廊道,与厂房相连并通向上部的通道为母线道,母线道在闸墩上厚度仅为 1.0 m。



图 3 计算模型的有限元网格

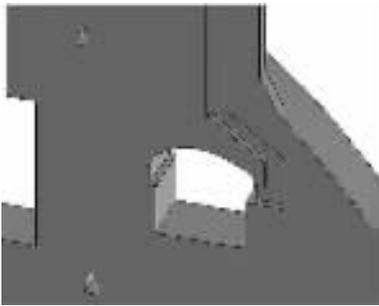


图 4 大坝内部结构

庚坝段的施工从 1956 年 1 月 12 日开始,到 1957 年 3 月 14 日结束。根据施工资料,分为 24 个浇筑块。按照浇筑分块情况,对模型进行网格剖分。共划分节点 37 593 个,六面体单元 28 276 个。坝体单元高度与浇筑层一致,为 0.3 m,裂缝处的单元划分为 1 cm 宽。

1.2 主要计算参数

根据资料,当地多年月平均气温拟合公式如下:

$$T_a(t) = 17.50 + 10.50 \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 7.17)\right] \quad (1)$$

式中 t 为月份。

混凝土绝热温升见表 1。

表 1 庚坝段混凝土绝热温升

混凝土标号	绝热温升	混凝土标号	绝热温升
140	$14.5(1 - e^{-0.34\tau^{0.75}})$	200	$26.3(1 - e^{-0.34\tau^{0.75}})$
170	$25.1(1 - e^{-0.34\tau^{0.75}})$	250	$34.8(1 - e^{-0.34\tau^{0.75}})$

由于混凝土的干缩变形和自生体积变形难以区

别,故将混凝土的干缩变形和自生体积变形统一考虑^[3]。

$$\epsilon_s(t) = 0.6 \times \frac{t}{152.79 + 3.27t} \times 10^{-3} \quad (2)$$

徐变:

$$\begin{aligned} \alpha(t, \tau) = & C_1(1 + 9.20\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.3\alpha(t-\tau)}] + \\ & C_2(1 + 1.70\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.003\alpha(t-\tau)}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $C_1 = 0.23/E_0$, $C_2 = 0.52/E_{00}$ 。

施工中采用木模板,混凝土表面养护采用的方式为:夏季用湿麻袋铺盖并喷雾或浸水养护,冬季在混凝土面上架设木炭火炉保温。

庚坝段主要包含 140 号、170 号、200 号和 250 号 4 种标号的混凝土,相应的弹性模量(28 d)分别为 23 000 MPa、26 000 MPa、29 000 MPa 和 32 000 MPa,泊松比均为 0.167,黏聚力均为 2.0 MPa,摩擦角均为 45°,密度均为 2 400 kg/m³。

温度场和应力场计算严格按照施工顺序,每铺筑 1 层混凝土计算 1 次,间歇期内计算若干次。因计算域在不断变化,每计算 1 次都必须重新变动网格,边界条件也相应变化^[4]。为了更精细地模拟施工环境及外部环境的变化,计算时按实际的混凝土浇筑过程划分时间步长,每层混凝土一般厚度为 30 cm,每层浇筑后 1 周内每 2 h 计算 1 次,第 2~4 周内每 4 h 计算 1 次,第 4 周以后每天计算 1 次。上下层浇筑的间隔时间随气温而异,夏季不超过 2 h,冬季不超过 6 h,春秋季不超过 3 h。

大坝于 1957 年 6 月落成,8 月 29 日开始蓄水。在施工期上游坝面处在空气中,边界条件可取施工期气温变化公式。大坝落成后几十年内,上游坝面温度可以取库水温度。运行期考虑太阳辐射热的影响,坝体下游面基本面对南面,表面温度变化规律可表达如下:

$$T_d(t) = 22.97 + 14.125 \cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 7.17)\right] \quad (4)$$

计算中运行期上、下游水位采用正常高水位,上游水位为 184.5 m,下游水位为 145.5 m。

计算模拟了具体施工过程以及裂缝开裂前后的运行过程,在运行过程中考虑了夏季泄洪和冬季寒潮的特殊情况^[5]。

2 计算结果分析

本文的计算结果分析中按惯例应力以拉为正、压为负。

根据计算结果,可以分析得到以下结论:

a. 检查廊道顶部的裂缝很可能在施工期就已出

现(见图5)。在1957年1月廊道顶部浇筑90d时,靠近坝段对称面一侧最大主应力达到2.9MPa,靠近横缝面一侧最大主应力达到3.5MPa,而当时的抗拉强度约是2.1MPa(见图6)。从数值上看,靠横缝面一侧应该裂得更严重一些,这与现场的裂缝贯穿位置是基本一致的。1957年1月该部位坝轴向应力在1.0~1.4MPa,而顺河向应力达到2.6MPa,顺河向应力本身已经超过了抗拉强度,所以大致的开裂方向应该是顺河向的,裂缝面的方向是坝轴向的。

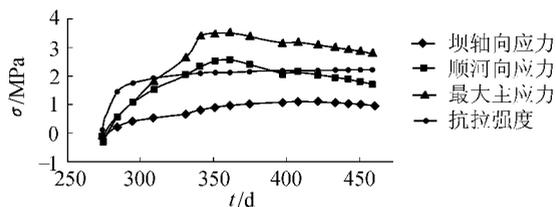


图5 检查廊道拱顶与横缝面交点施工期应力历时曲线

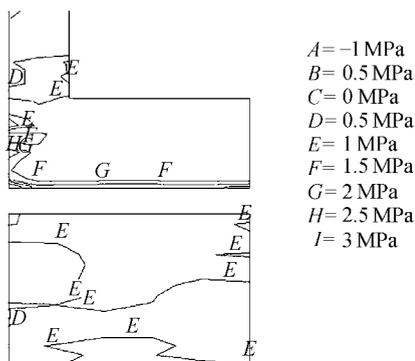


图6 1957年1月时检查廊道纵剖面主应力场

在水库蓄水后,检查廊道顶部在横缝面一侧的最大主应力峰值虽然有大幅度下降,但仍然接近3.0MPa,而且大部分时候最大主应力是大于抗拉强度的,所以长期处于开裂状态。

夏季泄洪冷击对库水经过的混凝土表面有较大的影响,对处于坝内3m深度的检查廊道附近的混凝土影响很小。当地冬季最强烈的寒潮导致一两天内温降达到20℃左右,但影响的主要范围还是表面的混凝土。

b. 闸墩上水平裂缝可能是从溢流面与闸墩的交界处开始开裂的。溢流面部分坝体相当于闸墩的基础,在交界处基础对闸墩的约束较明显。在施工期,这里的拉应力并没有超过抗拉强度,但有一个明显的水平条状拉应力区,主要是由坝轴向应力引起的。

表面混凝土由于受到内部混凝土的约束,高温时趋向受压,低温时趋向受拉。在运行期由于日照的影响,这里的温差很大,冬夏季温度变化在7~35℃之间。每年冬季温度最低的一个月这里的最大主应力会超过抗拉强度约0.5MPa,由此可能引起一些表面裂缝。

在夏季最不利的泄洪冷击情况下,这里的温降幅度达到14℃,应力增幅很大,最大主应力从0.2MPa很快增至2.9MPa,超过抗拉强度0.65MPa,很可能引起混凝土开裂(见图7和图8)。

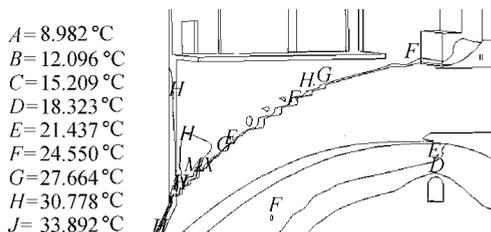


图7 夏季泄洪冷击时的温度场

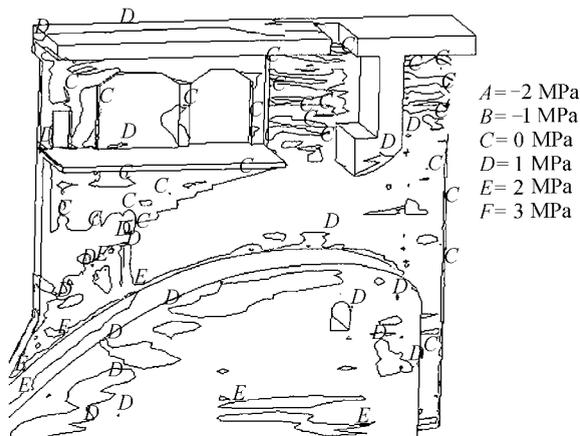


图8 夏季泄洪冷击时的应力场

冬季大寒潮对这里的影响非常明显,1970年11月发生的1次严重的寒潮使气温在2d内下降了21.4℃。溢流面和闸墩交界处某些点的最大主应力升至3.5MPa(见图9和图10),这无疑将引起比较严重的开裂。

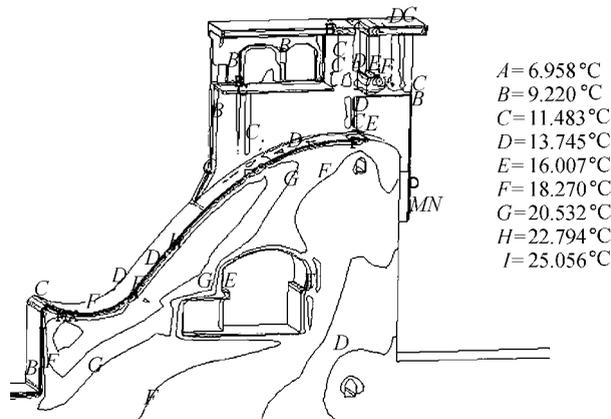


图9 1970年11月寒潮时的坝体温度场

c. 闸墩上母线道薄壁结构附近的斜裂缝可能是两端先裂,逐步扩展,最终连通。在施工阶段,由于前后温差和内外混凝土温差,这里的薄壁结构外表面有少数点已经出现有1个月最大主应力超过抗

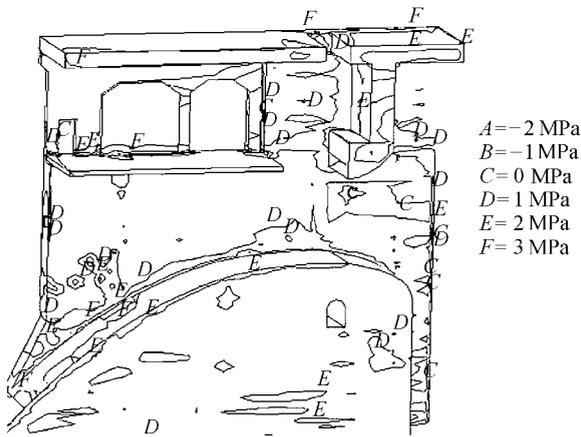


图 10 1970 年 11 月寒潮时的主应力场

拉强度 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 的情况,可能会导致这里有微小的表面裂缝。施工结束后 1 个月可以看出,沿着母线道有 1 条明显的竖向条状拉应力区域,且以顺河向应力为主。在运行期这里的最大主应力峰值与抗拉强度基本持平,不会进一步扩裂。

在夏季最不利的泄洪冷击情况下,薄壁结构淹没于水面线以下的部分有一些点状区域最大主应力值达到 3.5 MPa (见图 7 和图 8),会导致开裂。由于顺河向受约束较大,主要的应力增长方向是顺河向的,所以可能的开裂方向是顺河向的。另外水面线附近混凝土温度相差很大,水面线以上混凝土处于高温受压状态,水面线以下混凝土处于低温受拉状态,所引起的变形不协调可能会导致薄壁处沿着水面线开裂。

1970 年 11 月的大寒潮是模拟的实际情况,在这次寒潮中,这里的最大主应力突变为 $2.6 \sim 3.0 \text{ MPa}$,大于抗拉强度 $0.3 \sim 0.7 \text{ MPa}$ (见图 9 和图 10),很可能导致出现较严重的裂缝。当时闸墩和溢流面交界处也有很大的拉应力,这里除了发生水平裂缝以外,很可能还出现了向上发展的斜裂缝。

这里主要的拉应力区与薄壁结构位置是吻合的,且应力方向以顺河向为主。在多次的夏季泄洪冷击作用下,由于水面线以上是高温受压区,所以薄壁结构上的点状开裂区可能会沿着拉应力区向下扩展,闸墩和溢流面交界处的斜裂缝也可能沿着拉应力区向上扩展,最终相互连通,形成 1 条或多条长斜裂缝。

3 裂缝处理及预防建议

3.1 处理建议

对于庚坝段检查廊道顶部的裂缝,没有危害结构的稳定和安全运行,可以作防渗处理。对于庚坝段闸墩上的水平裂缝应该密实灌浆处理,消除这里的悬臂结构,否则可能向坝内发展。闸墩上 45° 的斜裂缝进一步发展的可能性较小,且不危害结构的稳

定,可以作防渗处理。庚坝段闸墩上与溢流面平行的裂缝在最不利的夏季泄洪冷击时有可能进一步扩展,虽然目前对结构稳定没有危害,但最好作密实灌浆处理,限制其进一步开裂。

3.2 预防建议

坝体拉应力往往在施工期就已经产生,且数值大小不可忽视^[6]。如果在施工期将应力控制在较低的水平,那么在运行期遭遇寒潮或泄洪冷击时,坝体表面的应力可以控制在抗拉强度范围以内。本工程施工期表面养护工作做得比较好,但夏季混凝土浇筑温度太高,另外如果在混凝土中掺一定比例的 MgO ,则可以降低混凝土自生体积变形,由此降低混凝土的拉应力。廊道施工时如果采用预制混凝土,则廊道的散热条件会较好,可以较好地控制顶拱的温度应力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王勳成, 邵敏. 有限元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [3] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土的收缩 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- [4] 贺金仁, 朱岳明, 冯树荣, 等. 龙滩高碾压混凝土重力坝的温控防裂研究 [J]. 红水河, 2003, 22(1): 8-13.
- [5] 朱岳明, 贺金仁, 石青春. 龙滩大坝仓面间歇和寒潮冷击的温控防裂分析 [J]. 水力发电, 2003, 29(5): 6-9.
- [6] 朱伯芳, 许平. 通仓浇筑常态混凝土和碾压混凝土重力坝的劈头裂缝和底孔超冷问题 [J]. 水利水电技术, 1998, 29(10): 14-18.

(收稿日期 2006-05-12 编辑: 高建群)

《中国水利水电市场》征订启事

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

《中国水利水电市场》设有“数字水利视点”、“水利工程”、“现代水务”、“用水节水”、“经验交流”和“信息快递”等栏目。面向水利系统各流域机构、各省市水利水电部门、科研单位、大型水利水电工程建设管理部门、大中型灌区等行业部门专向投递,另通过邮局、全国新华书店和水利、电力、建筑等专业书店向水利水电系统和相关行业公开发售。

《中国水利水电市场》为月刊,每月 25 日出版。国内订价每期 8 元,全年共计 96 元(含邮费),欢迎广大读者踊跃订阅。订阅电话: 010—63203738, 传真 010—63204992, 联系人: 石磊, E-mail: shuiligaojian@126.com, http://www.cnwwp.com。