

太平哨水电站溢流坝闸墩裂缝成因数值分析

苏远波 马震岳 张宏战 管军华

(大连理工大学土木水利学院 辽宁 大连 116024)

摘要 :应用三维有限元方法对太平哨水电站溢流坝闸墩竖向开裂的原因进行数值分析 ,计算中主要考虑了温度作用、静水压力、自重及冰压力的影响。通过对裂缝实际发生位置的应力变化规律进行分析 ,发现大坝在正常挡水情况下 ,冰压力对闸墩应力的影响很小 ,不足以使闸墩混凝土开裂 ;冬季温降荷载对闸墩应力影响很大 ,很多典型位置拉应力已经超过混凝土抗拉极限值 ,从而认为温度荷载是闸墩出现裂缝的主要因素。

关键词 溢流坝闸墩 ;闸墩裂缝 ;有限元法 ;第一主应力 ;太平哨水电站

中图分类号 :TV662⁺.2 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)S1-0103-04

水电站泄水建筑物闸墩上产生裂缝 ,是一个较普遍的现象 ,100 多座大坝的定检结果发现 ,近 10% 的大坝溢流坝闸墩上发现了规模较大的裂缝 ,这些裂缝大多数为竖直裂缝^[1]。太平哨水电站位于辽宁省宽甸满族自治县 ,大坝自蓄水发电至 2008 年 6 月已运行近 28 年。2000 年 6 月在 19 号闸门大修施工中 ,在 13 号、15 号、18 号、22 号坝段坝轴线下右侧 10 m 附近发现竖直向裂缝也都已贯通整个闸墩 ,见图 1。2007 年又发现 17 号、20 号、21 号坝段闸墩有程度不同的细微垂直裂缝^[2]。

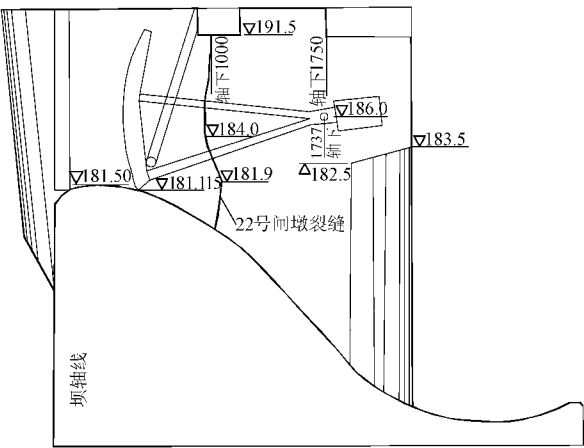


图 1 闸墩裂缝分布示意图(高程单位 m,距离单位 cm)

太平哨大坝地处东北 ,气候寒冷 ,温差变化大 ,冬季坝前冰厚可达 0.8 m ,闸室内最大冰厚可达 1.5 m。国内一些专家和学者^[1,3-5]曾就太平哨溢流坝闸墩裂缝成因进行过研究 ,研究成果认为 ,闸墩开裂

主要是由于溢流坝前静冰压力过大、温度应力超限以及闸墩配筋不足等原因引起的。但这仅是定性分析的结果 ,尚不能明确上述原因中哪一个对闸墩的开裂起主导作用。

目前对 13 号、15 号、18 号、22 号号坝段闸墩已采取了裂缝内部灌浆 ,外部粘贴钢板的加固措施 ,17 号、20 号、21 号坝段闸墩的加固工作即将开始。明确闸墩开裂的确切原因对现有加固措施的评价、今后加固措施的选择及采取必要预防措施避免其他闸墩开裂都有着重要的意义。本文以太平哨水电站 22 号溢流坝为研究对象 ,通过三维有限元方法 ,计算闸墩混凝土未开裂情况下坝体温度场及温度应力场 ,分析温度荷载、冰压力等其他荷载对闸墩混凝土裂缝位置处应力的影响 ,进而确定闸墩混凝土开裂的主要原因。

1 计算模型与计算参数

1.1 三维有限元计算模型

本文采用大型结构分析软件 ANSYS 对太平哨水电站 22 号溢流坝闸墩整体进行仿真分析 ,模拟闸墩未开裂时的受力情况。计算中考虑了温度作用、静水压力、自重及冰压力等荷载。

22 号溢流坝段闸墩为中墩 ,由于对称性 ,在对称面的 z 向位移为已知 ,在对称面上施加 z 向对称约束 ,取整个坝段的 1/2 进行计算 ,有限元模型见图 2。整个模型单元总数为 11837 个 ,节点总数为

作者简介 苏远波(1983—)男 黑龙江牡丹江人 硕士研究生 ,从事水工结构安全性分析及数值仿真研究。E-mail :yuanbosu@hotmail.com

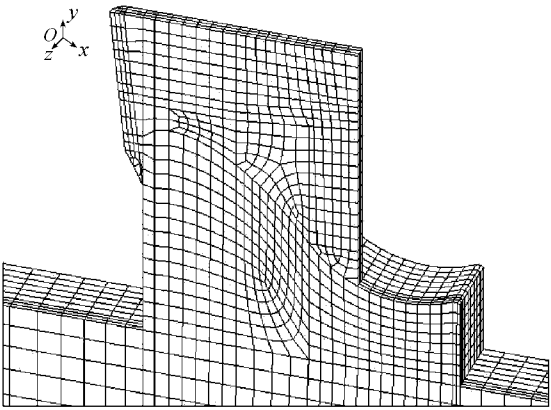


图2 坝体结构及网格剖分

14 229 个。闸墩模型全部采用六面体 8 节点单元,热分析采用 70 单元,参照文献[6]对应的热分析边界条件取为:坝体混凝土与水接触的边界,表面温度等于已知的水温;地基铅直面、地基地面为第二类边界,其余与空气接触的界面视为第三类边界。结构分析采用 8 结点 73 实体单元,对应的结构计算边界条件取为:在地基铅直面上施加水平法向单向约束,在其底面施加固定约束。采用右手直角坐标系,取顺水流方向为 x 轴的正方向; y 轴竖直向上; z 轴为沿坝纵轴线,从左岸指向右岸。

1.2 岩体及坝体混凝土的计算参数

有关岩体及坝体混凝土等的计算用力学及热学参数^[7-9]见表 1。

2 计算荷载和工况组合

2.1 计算荷载和工况组合

裂缝实际位置在弧形闸门牛腿的上游侧,裂缝将闸墩混凝土分为前后 2 部分。弧形闸门打开泄流时,闸墩混凝土的前半部分承受向下游的水压力和侧向水压力,后半部分则只承受侧向水压力;当两侧弧形闸门处于挡水状态时,闸墩前部分承受水压力,后部分承受闸门传过来的推力。由此可知,弧形闸门处于挡水状态时对闸墩的安全更为不利。计算时只需要计算弧形闸门挡水的工况。

太平哨水库运行水位变化不大,设计洪水位与正常运行水位相同,为 191.5 m,所以计算上游静水

压力时库水位均取为正常运行水位 191.5 m。根据计算,当坝体受温升荷载作用时,产生向上游的水平变形,此时坝体迎水面受静水压力向下游作用;当坝体受降温荷载作用时,产生向下游的水平变形,而坝体受水压力作用也向下游变形,所以冬季降温荷载对坝体最为不利,考虑温度荷载时只考虑冬季降温作用。坝址和库区经鉴定为 6 度地震区,计算荷载中不考虑地震作用。此外,需要关注的是闸墩裂缝位置及其周围混凝土强度,在分析闸墩开裂的原因时可以忽略扬压力和淤沙压力的影响。根据以上分析,计算时考虑了 4 种组合,见表 2。工况 2 及工况 4 分别考虑了集安地区多年平均冰厚(0.82 m)和闸室内最大冰厚(1.5 m)2 种情况来说明冰压力对闸墩应力分布的影响。

表2 荷载组合情况

工况	静水压力	自重	冰压力	温度作用
1	✓	✓		
2	✓(191.5 m)	✓	✓(冰厚 0.82 m) ✓(冰厚 1.5 m)	
3	✓	✓		✓(冬季)
4	✓(191.5 m)	✓	✓(冰厚 0.82 m) ✓(冰厚 1.5 m)	✓(冬季)

2.2 温度荷载的计算

大坝在长期运行过程中受到一年四季周期变化的水温、气温、水位的影响,产生温度应力。为了计算温度应力,必须先计算出坝体内的温度场,该温度场在一年四季的不同时间是不断变化的,但与上一年的同一时刻是基本相同的(这里假定每年的气温、水温、水位变化基本相同)。当施工期的初始影响完全消失以后,建筑物内的温度与初始条件无关,只与边界上的气温和水温有关。实际温度场可以分解为稳定温度场和准稳定温度场,对于准稳定温度场可以根据温度场的瞬态理论进行计算^[10]。

3 计算结果分析

为了考察闸墩开裂的原因,分析时选出实际裂缝位置附近的 2 排节点,分析它们在各种工况下的节点应力变化,从而探讨引起闸墩开裂的主要荷载。所选节点具体位置和编号见图 3,各节点高程见表 3。

表1 计算用力学及热学参数

结构材料	弹性模量/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	表面放热系数/ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)		线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$
						空气中	流水中	
R ₂₈ 150 混凝土	23 000	2 350	0.167	2.944	963	22.22	∞	10^{-5}
R ₂₈ 200 混凝土	26 000	2 350	0.167	2.944	963	22.22	∞	10^{-5}
岩石	32 900	1 670	0.180	2.362	1 172.3		∞	0.4×10^{-5}

注:闸墩顶部到 181.5 m 高程的混凝土设计标号为 R₂₈150,相应的抗拉标准值为 1.28 MPa;181.5 m 高程到闸墩底部混凝土设计标号为 R₂₈200,相应的抗拉标准值为 1.57 MPa。

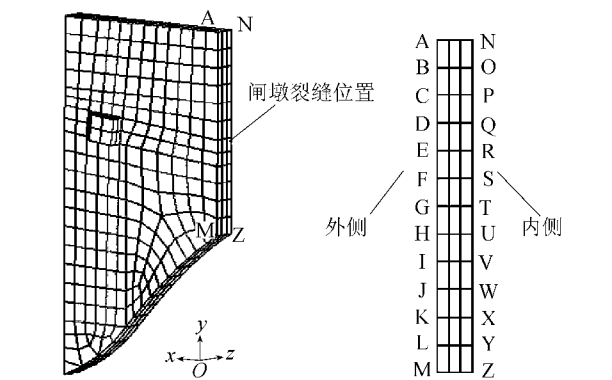


图3 裂缝实际发生的近似位置与附近的节点

表3 各节点对应的高程

结点位置	高程/m	结点位置	高程/m
A ,N	194.5	H ,U	185
B ,O	193	I ,V	184
C ,P	192	J ,W	183
D ,Q	190	K ,X	181
E ,R	189	L ,Y	180
F ,S	188	M ,Z	179
G ,T	186		

图4(a)(b)(c)给出了工况1、工况2下闸墩混凝土典型位置节点第一主应力随高程的变化。从图4(a)可以看出,工况1下,裂缝实际发生位置附近节点第一主应力值普遍较小,闸墩外侧节点第一主应力从闸墩顶部(高程194.5m)到高程184.0m范围内逐渐增大,然后从高程184.0m到高程180.0m范围内又逐渐减小,在闸墩底部(高程179.0m)与溢流面交接处应力发生突变,应力达到最大,为0.16MPa;闸墩内侧应力变化较均匀,从闸墩顶部(高程194.5m)到高程185.0m范围内逐渐增大,然后从高程185.0m到高程179.0m范围内又逐渐减小,此时应力达到最小,为0.04MPa。工况2比工况1增加了冰压力,主要是考察冰压力对闸墩裂缝发生位置应力的影响,为了分析裂缝发生位置应力对冰压力的敏感性,冰厚分别采用为0.82m和1.5m计算,见图4(b)(c),可以看到冰压力对闸墩典型位置的

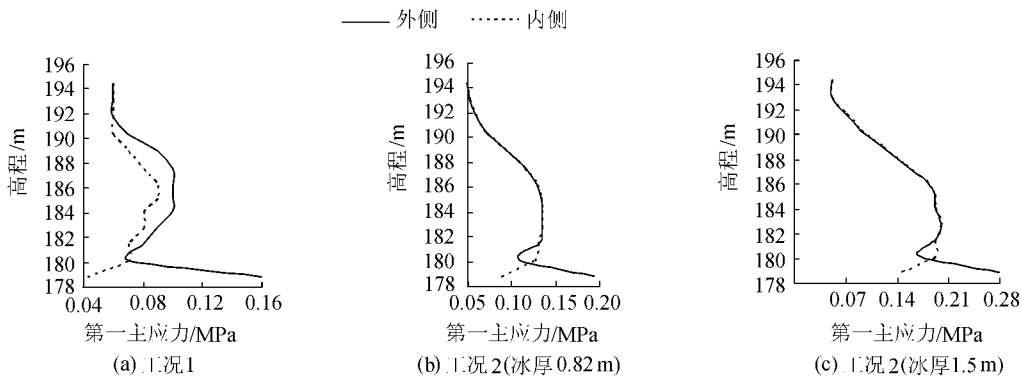


图4 闸墩混凝土典型位置第一主应力随高程的变化

拉应力影响不大,裂缝实际发生位置内外侧拉应力从闸墩顶部至高程181.0m的变化趋势一致,应力逐渐增大;闸墩内侧拉应力从高程181.0m到闸墩底部逐渐减小,外侧拉应力变化同工况1时外侧变化规律相似,在闸墩底部应力发生突变。冰厚1.5m与冰厚0.82m时实际裂缝位置处的应力变化规律基本一致,只是拉应力数值有所增大,提高到0.28MPa,但这也不足以使混凝土开裂。由以上分析可知,冰压力不是产生裂缝的主要原因。

图5(a)为只考虑1月份温度作用时,闸墩混凝土典型位置节点第一主应力随高程的变化,闸墩内外侧混凝土拉应力变化规律基本一致,节点应力从闸墩顶部到闸墩底部逐渐增大,相同高程位置,外侧混凝土受温度变化影响较大,拉应力比内侧拉应力大,闸墩顶部到高程189.0m范围内,闸墩内外侧节点拉应力均较小,还远小于混凝土抗拉标准值,闸墩内侧拉应力从高程189.0m到高程180.0m范围内

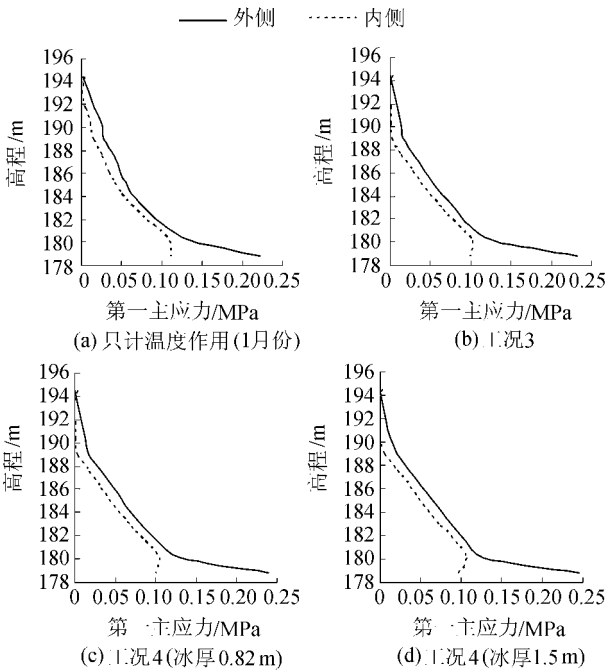


图5 闸墩混凝土内外侧节点第一主应力随高程的变化

逐渐增大,在高程 180.0 m 处达到 1.11 MPa,而后直至闸墩底部应力保持不变,没有达到抗拉标准值 1.57 MPa。而在高程 180.0 m 至闸墩底部,闸墩外侧拉应力继续增大,闸墩底部主拉应力值达到 2.23 MPa,此时混凝土已超过抗拉标准值,混凝土被拉裂。图 5(b)为工况 3 时闸墩混凝土典型位置第一主应力随高程的变化,形状变化规律与图 5(a)基本相同,只是最大值变为 2.33 MPa。在工况 3 的基础上分别增加冰厚为 0.82 m 和 1.5 m 的静冰压力,应力分布见图 5(c)(d)。工况 4 拉应力变化规律与工况 3 相同,从闸墩顶部至底部呈递增趋势,闸墩底部最大拉应力发生在冰厚为 1.5 m 时,为 2.46 MPa。

由以上分析可以推出,闸墩外侧底部受温度作用影响大,使该部位先于内侧开裂,而后,裂缝张开处混凝土暴露在空气中使裂缝进一步向闸墩内侧和上部扩展,最终有可能导致闸墩混凝土产生贯穿性裂缝,从而得出冬季温度作用是导致闸墩开裂的主要原因。

在 2007 年太平哨水电站大坝第 3 次定检时,又发现 17 号、20 号、21 号坝段闸墩有不同程度的细微垂直裂缝。其中 17 号闸墩垂直裂缝左侧长 7 m,右侧长 4 m,20 号闸墩垂直裂缝长度 3 m 左右,靠近溢流面,21 号闸墩垂直裂缝从溢流面开始向上发展到 192 m 高程处,差 2 m 就开裂到墩顶。从这几个坝段闸墩新产生的几条垂直裂缝可以看出,这些裂缝均起裂于闸墩下端与溢流面连接部位,然后由下向上发展。新发现裂缝的扩展过程与冬季温度荷载作用下闸墩的开裂过程一致,进一步说明冬季温度荷载是导致闸墩开裂的主要原因。

4 结 语

本研究应用三维有限元方法考察了温度作用、静水压力、自重及冰压力对太平哨闸墩应力的影响,基于以上分析结果,得到以下结论:

a. 计算中分析了冰压力对闸墩实际裂缝处拉应力的影响,结果表明,在冰压力、静水压力和坝体自重作用下,闸墩混凝土拉应力值很小。最大拉应力值为 0.28 MPa,发生在冰厚为 1.5 m 情况下闸墩底部,远小于混凝土的抗拉强度标准值,不足以使闸墩开裂。

b. 在冬季温度荷载单独作用下,裂缝实际发生位置混凝土主拉应力从闸墩顶部到闸墩底部逐渐增大,外侧拉应力值高于内侧。闸墩底部外侧主拉应力达到 2.23 MPa,足以使混凝土开裂。而在冬季温度荷载、静水压力、冰压力和闸墩自重联合作用下,裂缝位置处混凝土的应力分布与冬季温度荷载单独

作用下基本相同,仅拉应力值略有提高,从而说明冬季温度荷载是造成闸墩开裂的主要原因。

c. 由 2007 年新发现的裂缝及起裂位置验证了太平哨闸墩裂缝主要是由于温度作用引起,是从闸墩底部开裂的。

以上分析结果表明,太平哨水电站溢流坝闸墩裂缝应该是在自重、静水压力、温度作用和冰压力等组合荷载作用下造成的,其中冬季温度降低是造成闸墩开裂的主要因素。太平哨 13 号、15 号、17 号、18 号、20 号、21 号、22 号溢流坝闸墩已先后产生竖直裂缝,而随着运行时间的增长,其他溢流坝段的闸墩也有可能产生类似的裂缝。

参考文献:

- [1] 邢林生,聂广明. 闸墩大型裂缝成因分析及其治理[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 81-84.
- [2] 沈明波,郭令娟. 太平哨水电站大坝安全第三次定检材料之一 大坝现场检查报告[R]. 宽甸:太平哨发电厂, 2008.
- [3] 宋恩来. 冰压力对太平哨大坝闸门和闸墩的影响与破坏[J]. 大坝与安全, 2003(3): 31-33.
- [4] 宋恩来. 浑江流域水电站大坝安全第二次定期检查发现的问题[J]. 东北电力技术, 2002(6): 14-17.
- [5] 孙志恒,李守辉,刘致彬,等. 太平哨水电站闸墩裂缝成因及加固处理[J]. 大坝与安全, 2002(6): 48-50.
- [6] 王刚,马震岳,陈昌林. 老混凝土坝防渗加固施工中温度应力仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 63-66.
- [7] 朱炜,金春山. 坝基岩石物理力学实验报告:太平哨大坝第一次定期检查资料[R]. 大连:大连理工大学, 1990.
- [8] DL 5077—1999 水工建筑物荷载设计规范[S].
- [9] SL/T 191—96 水工混凝土结构设计规范[S].
- [10] 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.

(收稿日期 2009-01-06 编辑 高建群)

