

水力发电学报

JOURNAL OF HYDROELECTRIC ENGINEERING

第 32 卷

Vol.32

第 3 期 (总第 140 期)

No.3 (Total No. 140)

3
2013

ISSN 1003-1243



9 771003 124048

主办 中国水力发电工程学会

目次

中国电力未来的发展	汪恕诚(1)
分布式水文模型与气象遥相关分析相结合的丹江口水库月入库径流预测	何小刚 赵钢铁 杨大文(4)
基于多变量联合分布推求设计洪水过程线的新方法	李天元 郭生练 闫宝伟等(10)
一种用于缺资料地区山洪预警方法研究与应用	叶金印 李致家 吴勇拓(15)
三峡梯级与清江梯级水库群中小洪水实时动态调度	周研来 郭生练 刘德地等(20)
变化环境下基于希尔伯特-黄变换的水资源评价方法	谢平 许斌 陈广才等(27)
基于AWTP指数的辽宁省干旱规律时空分析	曹永强 杨春祥 张丹等(34)
基于Landsat TM5遥感影像的北京市平原区不透水面积变化分析	侯爱中 倪广恒 雷志栋等(39)
混沌蚁群优化算法在梯级水库发电优化调度中的应用研究	原文林 曲晓宁(47)
混联水库群的双量调度函数研究	周研来 郭生练 刘德地(55)
解空间遗传算法在水电站厂内经济运行中的研究	郑媛 杨侃 蒋咏等(62)
考虑不同生态流量约束的梯级水库生态调度初步研究	尹正杰 杨春花 许继军(66)
气候变化及宝鸡峡引水对渭河径流量的影响分析	林启才 李怀恩(71)
渭河干流生态环境需水量的动态计算	汪妮 李京文 解建仓等(76)
基于AUSM+UP格式的有限体积模型及其在钱塘江河口的应用	程文龙 史英标 吴修广(82)
钱塘江河口区水生生态监测研究	董志勇 王硕 幸勇(87)
基于平封冰盖生消模拟的长距离渠系冰期自动化控制模型	刘孟凯 冯晓波 王长德等(93)
公伯峡水平旋流泄洪洞水力特性研究	南军虎 牛争鸣 洪钢等(101)
高拱坝深孔斜穿缝挑坎水力特性的数值模拟研究	李乃稳 刘超 李龙国等(108)
小波分析在高坝泄流水垫塘信号分析中的应用	徐国宾 谷宇杰 刘昉(114)
白鹤滩水电站反拱型水垫塘水动力特性及底板稳定性分析	杨敏 李琳 董天松等(120)
基于阶段特性的岷江镇江关以上流域水沙趋势多尺度分析	张会兰 李丹勋 姜晓明等(127)
分层计算冰盖弹模对冰盖破裂的影响分析	陈胖胖 常瑞 王军(134)
黄河下游洪水历时变化对河道输沙的影响	中冠卿 刘晚燕 张原锋等(139)
闸室突跌后截断曲线底板的水舌研究	白瑞迪 杨朝晖 邓军等(143)
松滋河疏浚引水对洞庭湖区水资源开发利用的影响	徐卫红 张双虎 蒋云钟等(150)
三峡水库调度对于重庆主城区河段水位的快速响应公式探索	黑鹏飞 刘洪春 方红卫等(156)
高心墙堆石坝防冲墙应力变形特性有限元分析	丁艳辉 张其光 张丙印(162)
混凝土重力坝极限抗滑能力评价方法	张社荣 王高辉 王超(168)
大体积混凝土结合层面初始温度赋值研究	杨剑 胡昱 金峰等(176)
高混凝土重力坝关键部位温控防裂研究	李松辉 张湘涛 张国新等(181)
混凝土试件温度裂缝的颗粒流数值模拟	周伟 李永荣 刘杏红等(187)
心墙沥青混凝土动力特性影响因素的试验研究	余梁蜀 晋晓海 丁治平(194)
水库大坝抗震性能的模糊综合评价	叶亚三 陈国兴(198)
基于微裂纹定量分析的混凝土冻融损伤评价方法	李曙光 陈改新 鲁一晖(207)
大型梁式渡槽采用摩擦摆支座的减隔震研究	李日臣 唐艳 夏修身等(213)
大型渡槽槽身的地震扭转效应研究	高平 魏德敏 徐梦华(218)
空腔危害水力机械稳定性理论 II-空腔对卡门涡共振的影响及作用	徐洪泉 陆力 李铁友等(223)
混流泵叶轮设计关键参数分析	邵浩 曹树良 陆力(229)
大型低扬程立式蜗壳混流泵装置模型试验研究及分析	杨帆 汤方平 刘超(234)
考虑顶盖系统的水轮机竖向振动传递路径分析	职保平 马震岳 吴敬敬(241)
基于仿真模型的水电机组振动特性分析	徐永 李朝晖(247)
转子支架径向安放角对通风冷却系统影响的数值分析	宋厚彬 李伟力 杨逢瑜(252)
电力市场环境下游级水库发电优化调度预警系统构建	原文林 曲晓宁 张金萍等(258)
北方低山丘陵地区水能资源开发的低碳效益评价——以山东省临沂市为例	王淑军 许士欣 傅蕾等(265)

水力发电学报

(双月刊 1982年创刊)

2013年 第32卷 第3期(总第140期)

JOURNAL OF HYDROELECTRIC ENGINEERING

(Bimonthly, Started in 1982)

Vol. 32 No. 3 2013 (Total No. 140)

主管:中国科学技术协会

主办:中国水力发电工程学会

编辑出版:水力发电学报编辑部

总编辑:王光纶

编辑部地址:

中国北京清华大学水电工程系

邮政编码:100084

网址:

印刷:北京昌平百善印刷厂

发行:公开发行

Competent Authority: China Association for Science and Technology

Sponsor: China Society for Hydropower Engineering (CSHE)

Edited and Published by: Journal of Hydroelectric Engineering Editorial Committee

Chief Editor: WANG Guanglun

Address of Editorial Office: Hydraulic Engineering Department,
Tsinghua University, Beijing, China

Post Code: 100084

http://www.slfdxb.com/

Printed by: Baishan Printing House, Changping, Beijing

Open Issue

刊号: ISSN1003-1243
CN 11-2241/TV

版权所有

2013年6月25日出版 定价:12.00元

期刊基本参数: CN 11-2241/TV * 1982 * b * A4 * 268 * zh * p * ¥12.00 * 750 * 2013-06

高混凝土重力坝关键部位温控防裂研究

李松辉¹, 张湘涛², 张国新¹, 徐华祥²

(1. 中国水利水电科学研究院 结构材料所, 北京 100038;

2. 云南华电鲁地拉水电有限公司, 昆明 650228)

摘要: 混凝土重力坝是当今水利工程中常用的一种坝型,但在已建的混凝土重力坝中,许多都存在不同程度的裂缝,裂缝的存在将大大降低大坝的完整性、抗渗性及耐久性。本文在总结国内数十座混凝土重力坝的基础上,就混凝土重力坝较易开裂的重点部位及防裂措施进行了探讨,主要包括基础约束区、永久暴露面、过流缺口、孔洞周边及初次蓄水上游面等部位。研究表明:这些裂缝的存在均由于施工期及蓄水期温控防裂措施不当造成的,若在施工中采用有效的温控防裂措施,可在一定程度上杜绝裂缝的产生,为今后混凝土重力坝的建设提供一定的参考。

关键词: 水工结构; 温控防裂; 有限元分析; 重力坝关键部位

中图分类号: TV315

文献标识码: A

Study on temperature control for key components of high concrete dam

LI Songhui¹, ZHANG Xiangtao², ZHANG Guoxin¹, XU Huaxiang²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038;

2. Yunnan Huadian Ludila Hydropower CO, LTD, Kunming 650228)

Abstract: Concrete dam is a dam type commonly used in hydraulic projects, but many of the constructed concrete dams suffer from cracks of various degrees that greatly reduce the integrity, anti-permeability and durability of these dams. Based on a survey of several dozens of concrete dams built in China, this paper discusses the key dam components that are prone to cracks, including foundation restraint zone, permanent exposure surface, overflow gap and hole, and upstream face. And crack control measures are also discussed. Results show that all these cracks were caused by improper temperature control in the construction and water storage phases, and that effective temperature control can prevent the cracks. This work lends a useful support to construction and temperature control of concrete dams.

Key words: hydraulic structure; temperature control and crack prevention; finite element analysis; key components of concrete dam

0 引言

混凝土重力坝是一种主要依靠自身重量产生的抗滑力来维持其稳定性的坝型。主要优点有^[1-3]:1)地形地质条件适应性强;2)枢纽泄洪问题容易解决,布置紧凑;3)结构作用明确,安全可靠耐久,维修量小;4)便于施工导流;5)维修方便等。然而通过研究发现,许多已建混凝土重力坝工程中不同程度存在裂缝,裂缝的存在大大降低了混凝土坝的完整性、抗渗性和耐久性,降低了大坝的安全度。这些裂缝大部分是由于温度应力超过了混凝土的抗拉强度引起的,可见,混凝土重力坝的温度应力问题不可忽视,混凝土重力坝的建设仍存在温度控制方面的问题,尤其是高混凝土重力坝,其施工期一般跨越多个夏季,受外界干扰因素多,温度应力的产生及分布更为复杂,需要更为详尽的研究^[4-8]。本文在总结国内数十座混凝土重力坝的基础之上,就混凝土重力坝易于出现的裂缝部位及裂缝成因与防裂措施进行总结与探讨,为提高混凝土重力坝的筑坝技术提供一定的参考。

收稿日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51109035);中国水科院科研专项基金(材集1118)

作者简介: 李松辉(1979-),男,高级工程师,博士. E-mail: lish@iwhr.com。

1 基础约束区防裂

混凝土大坝基础约束区一般分为基础强约束区和基础弱约束区,以距离浇筑坝段地基面的平均高度计算。基础强约束区是指距基础面 $0 \sim 0.2L$ 高度范围内的混凝土(L 为浇筑块长边的最大长度),基础弱约束区是指距基础面 $0.2 \sim 0.4L$ 高度范围内的混凝土。由于约束区混凝土与地基相连,约束较强;此外若有垫层混凝土存在,冬季长间歇无任何温控措施的情况下,薄层混凝土温度降低很快,基础温差较快实现,叠加较大的内外温差,开裂风险较大^[1]。

对于基础约束区尤其是基础强约束区,应注意做到以下几点:1)加强基础约束区的一期水管冷却;2)当混凝土尤其是垫层混凝土遭遇强间歇期时,应注意加强混凝土的保温工作。下面通过两个实例进行比较分析。图 1 和图 2 为某混凝土坝有水管与无水管条件下的温度过程线和应力过程线^[9,10]。

通过图 1、图 2 可知,坝体若无任何温控措施,强约束区最高温度为 27.91°C ,基础强约束区最大顺河向应力为 2.17MPa ,安全系数 1.61 ,横河向应力为 2.06MPa ,安全系数 1.69 ,存在开裂风险。经水管冷却后($1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的水管 25d 的冷却),最高温度降为 22.50°C ,最大顺河向应力减小为 1.59MPa ,安全系数 2.20 ,横河向应力减小为 1.45MPa ,安全系数 2.41 ,可大大降低开裂风险。

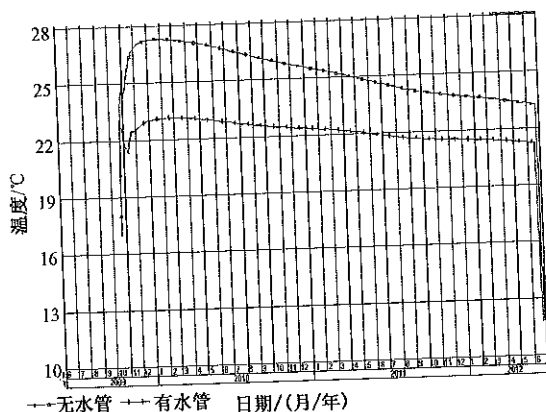


图 1 强约束区有水管冷却温度过程线

Fig. 1 Temperature processes of strong constraint area under pipe and no pipe cooling

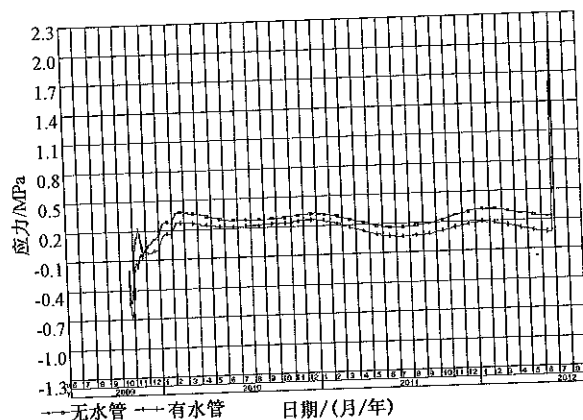


图 2 强约束区有水管与无水管应力过程线

Fig. 2 Stress processes of strong constraint area under pipe and no pipe cooling

图 3 为某混凝土重力坝垫层混凝土无保温条件下叠加短周期应力过程线^[11],由图可知:1)混凝土仓面冬季长间歇,温度下降快、内外温差大,长周期最大温度应力 1.00MPa ;2)混凝土在长间歇期间遭遇寒潮频繁且无保温,50d 龄期长周期应力 0.51MPa ,短周期温度应力 1.31MPa ,总应力 1.81MPa ,按照该部位混凝土抗拉强度控制,安全系数 0.99 ,开裂风险大,故应注意垫层混凝土长间歇期内的保温。

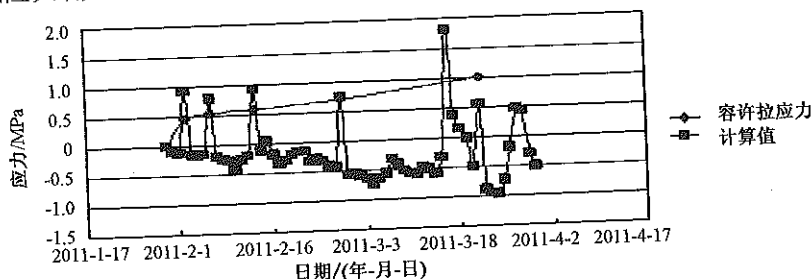


图 3 垫层混凝土无保温条件下叠加短周期应力过程线

Fig. 3 Stress processes of cushion concrete without insulation adding short cycle stress

2 大坝表面裂缝防裂

混凝土常见的裂缝,大多数是一些不同深度的表面裂缝,混凝土表面部位主要指:1)刚浇筑尚在凝固硬化工程中的新浇筑块表层;2)相邻坝块高差悬殊长期暴露的侧表面;3)大坝的上下游坝面。

早期由于水泥水化热混凝土内升温很高,拆模后表面温度较低,尤其在低温季节,易在表面部分形成很陡的温度梯度,发生很大的拉应力;而早期混凝土强度低,极限拉伸小,再加上养护不善,就易于形成裂缝。因此,表面裂缝常常发生于早期。在冬季负温季节或在早春晚秋气温骤降寒潮频繁季节,由于混凝土表面处于负温或表面温度骤降,也容易形成裂缝。因此,表面裂缝也会出现于晚期。这种现象在寒冷地区或低温季节更为明显。低温季节的表面防裂措施主要包括:1)对表面进行保温;2)在过冬前通水冷却^[12-17]。

图4及图5为某混凝土重力坝上游坝面采用保温与不保温的温度过程线与应力过程线的比较,通过比较可知,经保温后应力大幅减小,能够满足抗拉强度。

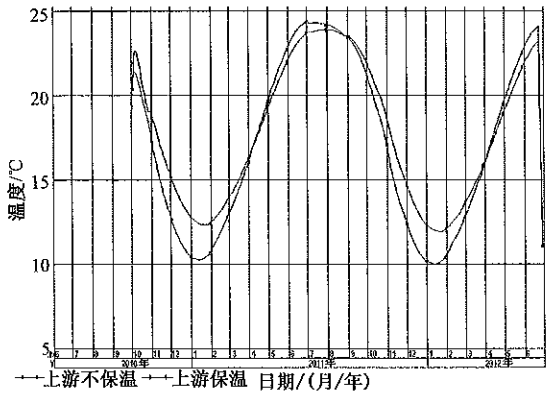


图4 上游面保温与不保温温度过程线
Fig. 4 Processes of upper surface temperature with insulation and without insulation

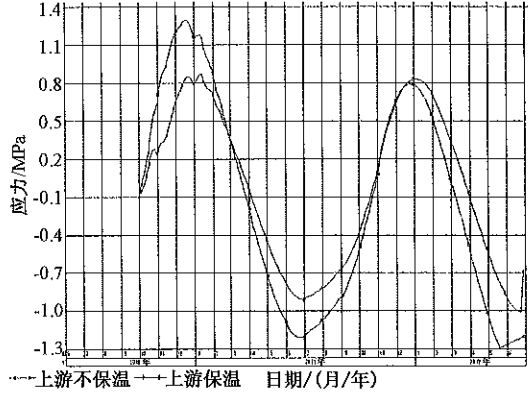


图5 上游面保温与不保温横向应力过程线
Fig. 5 Processes of upper surface stresses with insulation and without insulation

3 过流缺口防裂

在混凝土坝的施工过程中,往往要留一些缺口,供汛期过水用。早龄期混凝土,抗裂能力较低,内部温度较高,如表面接触过低温水,很容易出现裂缝。即使没有过水,由于停歇时间长,难免遇到寒潮,也容易出现裂缝。因此,对预留的过流缺口,应进行表面温度应力计算,并根据计算结果,采取适当的裂缝防止措施。过水缺口的表面防裂措施有如下几种:

- 1)对缺口附近的混凝土,适当降低入仓温度,减小冷却水管间距,并适当延长一期水管冷却时间,以降低内部温度,减小内外温差。
- 2)必要时可在表层铺防裂钢筋。
- 3)采用表面薄层流水的方法,减小后期过洪温差,以防后期过洪温度骤降。
- 4)过水前进行混凝土一、二期通水冷却,从而减小温差。
- 5)过洪前在过水缺口的水平面上铺保温被,上面用砂袋压紧。
- 6)加强洪水预报,使混凝土龄期达到10d以上后再过水,以便混凝土过水时已有一定抗裂能力。
- 7)上、下游表面用内贴法粘聚苯乙烯泡沫塑料板保温。
- 8)侧面过水的混凝土,在龄期14d前不拆模板,用模板防止冲刷,模板内侧粘贴聚苯乙烯泡沫塑料板保温。

过水以后,老混凝土内部温度比较低,继续浇筑上层混凝土时,为了控制上下层温差,应严格控制新混凝土的最高温度。例如,降低入仓温度,在一定高度内减小浇筑层厚度、减小冷却水管间距等^[12-17]。

图6,图7及表1为某混凝土重力坝缺口在过洪前无流水养护和有流水养护最大应力及安全系数,通过图表可知,流水养护后可有效地降低混凝土的应力,提高安全系数。

表1 过流面最大应力值
Table 1 Peak stresses of flow surface

计算工况	顺河向应力/MPa	顺河向安全系数	横河向应力/MPa	横河向安全系数	竖向应力/MPa	竖向安全系数
无表面薄层流水	1.95	0.91	1.87	0.95	1.06	1.67
表面薄层流水	0.94	1.89	0.93	1.83	0.28	6.35

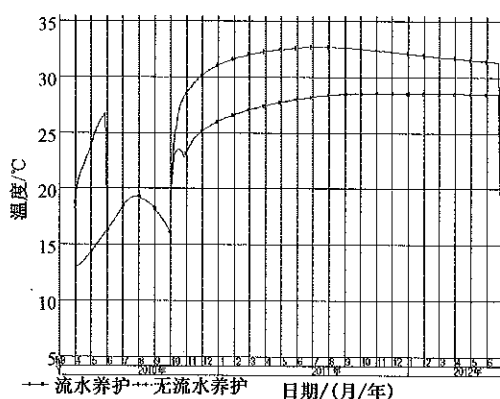


图6 缺口过流面温度过程线

Fig. 6 Temperature processes at gap flow surface

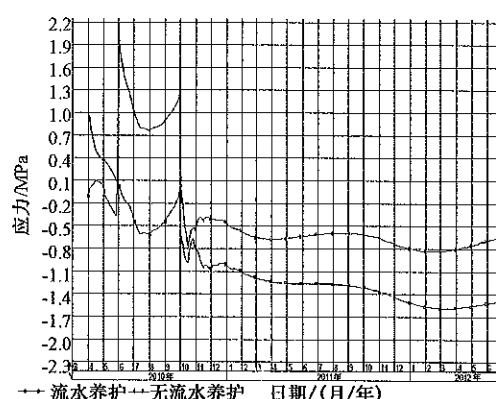


图7 缺口过流面顺河向应力过程线

Fig. 7 Processes of streamwise stress at gap flow surface

4 孔口及孔洞防裂

导流底孔的底板比较薄,受到的基础约束区作用大于一般浇筑块所受到的约束作用。因此,导流底孔是容易产生裂缝的部位。另外,导流底孔高程较低,一般处在基础约束范围内,当坝体冷却至灌浆温度后,通常是受拉的,所以导流底孔一旦出现表面裂缝,后期往往容易发展成为贯穿性大裂缝。

导流底孔冬季过水时,由于冬季水温一般低于坝体稳定温度,因而产生“超冷”。不过水时或部分过水时,孔壁与冬季冷空气接触,温度可能更低。

在基础约束区外的永久性过水孔口,如无钢板衬砌,施工期产生的表面裂缝,到了运行期,在压力水的劈裂作用下,也往往容易发展成为大裂缝,基于上述原因,对过水孔口,应采取特别严格的防裂措施^[12~17]。

1) 考虑到超冷现象和基础约束作用较大,导流底孔附近的混凝土最高温度应低于一般的基础约束块,相应地,应采取更加严格的温度控制措施,最好在气温最低的季节浇筑这一部分混凝土;若在非低温季节浇筑,应采用更低的混凝土入仓温度、更薄的浇筑块、较长的间歇时间、更密的冷却水管、较低的冷却水温等。

2) 力争在过水之前,通过二期水管冷却,将导流底孔周围的混凝土温度降低到规定的温度,减少过水时的内外温差。二期冷却时,混凝土应有足够的龄期和足够的抗裂能力,以承受基础约束作用所引起的温度应力。

3) 加强孔口内的表面保温。由于孔内过水时一般的表面保温材料将被水冲走,比较好的办法可能是采用钢筋混凝土模板。同时在模板内侧粘贴聚乙烯泡沫保温,并在混凝土内预埋钢筋以固定模板,防止被水冲走。寒潮的降温历时是比较短暂的,而过水时间是比较长的,因此对表面保温能力的要求比较高。

4) 在上、下游坝面,在孔口附近一定范围内,也应用内贴法粘贴聚苯乙烯泡沫塑料板保温,在靠近孔口的部位,应保留模板,以保护泡沫塑料板,防止被冲走。

5) 埋设足够的钢筋,除环向钢筋外,特别要有足够的纵向钢筋,以便万一出现裂缝时可限制裂缝的发展。

6) 度汛前在孔口附近进行表面流水养护。

下面以某工程的仿真结果为例,就底孔和侧面过流点的应力进行分析,表2、表3为最大应力和安全系数的计算结果,通过计算可知^[9,10]:

表2 过流侧面及底孔最大应力值

Table 2 Peak stresses of flow sidewall and

	bottom hole			MPa
	无温控措施	流水养护	水管间距 1.5m × 1.5m	
侧面过流	0.99	0.27	0.96	
底孔过流	1.47	0.59	1.29	

表3 过流侧面及底孔最小安全系数计算结果

Table 3 Minimum safe factors of flow

	sidewall and bottom hole			
	无温控措施	流水养护	水管间距 1.5m × 1.5m	
侧面过流	1.53	5.62	1.58	
底孔过流	1.03	2.57	1.18	

底孔最大应力分析:底孔过流时无温控措施、通 1.5m × 1.5m 的水管时分别为 1.47MPa、1.29MPa,安全系数为 1.03、1.18,流水养护后减小为 0.59MPa 安全系数为 2.57;可见,过流前对混凝土进行流水养护对于控制应力具有明显的效果,施工中应切实做好流水养护工作。

侧面过流点最大应力分析:第一次度汛前,混凝土龄期 35d 左右时,最大应力:无温控措施、通 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的水管进行 25d 一期冷却时分别为 0.99MPa, 0.96MPa, 安全系数为 1.53, 1.58, 流水养护后应力减小为 0.27MPa, 安全系数 0.27。

5 初次蓄水上游面劈头缝防裂

劈头裂缝与上下游坝面水平裂缝是重力坝的一个重要问题,例如三峡大坝虽然采取了严格的温控措施,仍然出现了劈头裂缝和水平裂缝。如何防止上游面的劈头缝和水平裂缝,将是工程成败的关键问题之一,对于劈头裂缝的防止,主要有以下措施^[12-17]:1)在上游面粘贴永久保温板;2)坝前回填土石(即堆渣);3)上下游面水管预冷;4)表面流水。

图 8 为考虑某重力坝上游面最大拉应力包络图^[17],由图可知,考虑上游坝面保温后,表面最大拉应力从无保温时的 2.2~3.0MPa 下降到 1.2~1.6MPa,能满足混凝土的抗裂标准,可有效地避免劈头裂缝的产生。

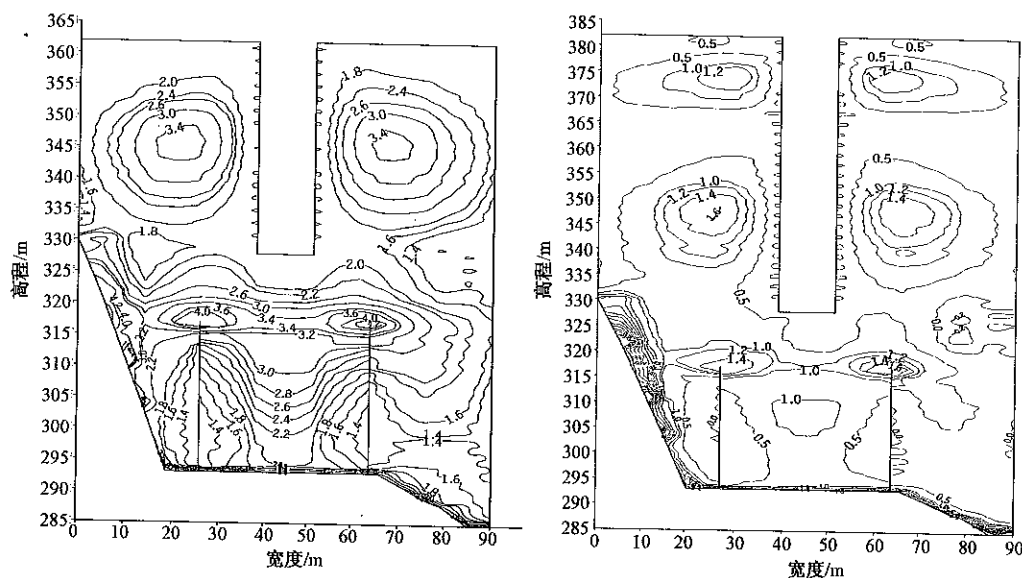


图 8 考虑蓄水冷冲击后的表面最大拉应力包络图(应力单位:MPa)

Fig. 8 Maximum stress envelope caused by cold shocking of water storage (unit: MPa)

6 结语

在很多已建的混凝土重力坝工程中不同程度地存在裂缝。裂缝的存在降低了混凝土坝的完整性、抗渗性和耐久性,降低了大坝的安全度。本文就混凝土重力坝重点部位的温控防裂问题进行了探讨,为研究混凝土坝裂缝防治的措施,提供了一定的参考意义。结果表明:1)基础约束区由于约束较强,是应力较大的关键部位之一,此部位应通过通水冷却的方式降低温差,减小温度应力,同时应加强垫层混凝土长间歇期的保温工作;2)低温季节的表面裂缝,多发生在坝体的上下游面等永久暴露部位,此部位应加强保温;3)过流缺口由于受过流冷击极易产生裂缝,此部分应通过表面流水或提前将过流面以下一定高程混凝土通水冷却至某一温度值,以减小由于冷击造成的温差过大现象;4)孔口及孔洞过流部位,同过流缺口相似,应通过表面流水、通水冷却等措施来减小温差,降低温度应力;5)初次蓄水劈头裂缝的防止,主要通过在上游坝面粘贴永久保温板、坝前回填土石(即堆渣)、上下游面水管预冷、表面流水等措施。

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.
ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 龚召熊,水工混凝土的温控与防裂[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
GONG Zhaoxiong. Temperature and crack control of hydraulic concrete[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower

- Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 郭之章,傅华. 水工建筑物的温度控制[M]. 北京:水力电力出版社,1990.
GUO Zhizhang, FU Hua. Temperature control of hydraulic structures [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990. (in Chinese)
- [4] 郭柳丰,高伟. 碾压混凝土重力坝的温度应力与温度控制[J], 建筑与工程, 2010, 19: 336-337.
Guo Liufeng, Gao Wei. Thermal stresses and temperature control of RCC dam[J]. Science & Technology Information, 2010, 19: 336-337. (in Chinese)
- [5] 罗凤立,马学严,王涛. 浅谈百色水利枢纽碾压混凝土主坝施工温度控制[J]. 广西水利水电, 2004 年增刊: 94-100.
Luo Fengli, Ma Xueyan, Wang Tao. Elementary analysis of construction temperature control of baise RCC main dam, GX Water Resources & Hydropower Engineering, 2004 Supplement: 94-100. (in Chinese)
- [6] 赵富刚,牛文阁,李超毅. 景洪水电站碾压混凝土温控防裂措施及组织管理[J]. 水利水电科技进展, 2007, (3): 46-48
Zhao Fugang, Niu Wenge, Li Chaoyi. Temperature control and anti-cracking measures for RCC construction and management at Jinghong Hydropower [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, (3): 46-48. (in Chinese)
- [7] 舒光胜,周厚贵. 景洪电站碾压混凝土工程温控措施效果分析[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 55-57.
Shu Guangsheng, Zhou Hougui. RCC temperature control measures for Jinghong Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(2): 55-57. (in Chinese)
- [8] 周科志,张朝康. 浅谈我国碾压混凝土筑坝技术特点[J]. 四川水力发电, 2010, 29(3): 93-95.
Zhou Kezhi, Zhang Chaokang. Elementary RCC dam technology characteristics of China [J]. Sichuan Water Power, 2010, 29(3): 93-95. (in Chinese)
- [9] 张国新. 大体积混凝土结构施工期温度场、温度应力分析程序包 SAPTIS 用户手册[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 1994-2005.
Zhang Guoxin. Users' manuals of SAPTIS[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1994-2005. (in Chinese)
- [10] 张国新,李松辉,等. 澜沧江大华桥水电站可行性研究阶段大坝混凝土温控计算[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2010.
Zhang Guoxin, Li Songhui, et al. Dam concrete control calculation of Dahuajiao Hydropower Station in study stage [R], Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010. (in Chinese)
- [11] 李松辉,刘毅,等. 金沙江鲁地拉大坝第一次度汛温控防裂专题问题研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2011.
Li Songhui, Liu Yi, et al. Temperature control and crack prevention research of Lu Dila dam in the first flood [R], Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011. (in Chinese)
- [12] 胡平,张国新,等. 黄登水电站大坝温控仿真计算分析及温控防裂措施研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2011, 12.
Hu Ping, Zhang Guoxin, et al. Temperature control simulation analysis and crack prevention measures research of Huangdeng Hydropower Station [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research [R]. 2011. (in Chinese)
- [13] 张国新,刘有志,等. 澜沧江功果桥水电站技施阶段大坝混凝土温控计算[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2009, 4.
Zhang Guoxin, Liu Youzhi, et al. Temperature control calculation of Gongguoqiao Hydropower Station in construction stages [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009. (in Chinese)
- [14] 刘有志,张国新,等. 武都水库工程碾压混凝土重力坝施工期温控防裂仿真计算分析[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2008, 2.
Liu Youzhi, Zhang Guoxin, et al. Temperature control and crack prevention simulation calculation of Wudu RCC dam [R]. Beijing, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008. (in Chinese)
- [15] 刘毅,张国新,等. 亚碧罗水电站可研阶段碾压混凝土重力坝温度应力及温控[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2008.
Liu Yi, Zhang Guoxin, et al. The RCC dam temperature stress and control of Yabiluo Hydropower Station in study stage [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008. (in Chinese)
- [16] 刘毅,张国新,等. 金沙江龙开口水电站可行性研究坝体混凝土温控研究专题报告[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2008.
Liu Yi, Zhang Guoxin, et al. Concrete temperature control research of Longkaikou Hydropower Station in study stage [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008. (in Chinese)
- [17] 胡平,杨萍,等. 龙滩水电站大坝混凝土温控防裂研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2007.
Hu Ping, Yang Ping, et al. Study on concrete temperature control and crack prevention of Longtan dam [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007. (in Chinese)