

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.004

藏木水电站大坝混凝土施工期 温控防裂标准与措施动态优化分析

潘希强¹,刘有志²,胡平²,刘玉²

(1. 华能西藏发电有限公司,西藏 拉萨 850000; 2. 中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:为解决高海拔、大温差高原地区混凝土坝的温控防裂问题,对西藏地区建设的首座百米级混凝土重力坝大型水电工程施工期大坝混凝土防裂研究进行总结和梳理。基于藏木水电工程大坝施工阶段现场监测资料,采用全过程动态跟踪反馈仿真分析技术,全过程反映大坝施工期的真实工作性态。根据仿真分析结果,对后期可能出现的各种风险进行预测,并对相关的标准和措施进行了动态调整和优化。

关键词:混凝土坝;施工期;温控防裂;反馈仿真分析;高海拔大温差地区;藏木水电站

中图分类号:TV642;TV544

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2015)04-0300-07

Dynamic optimal analysis of concrete temperature control and crack prevention standards and measures during dam construction for Zangmu Hydropower Station

PAN Xiqiang¹, LIU Youzhi², HU Ping², LIU Yu²

(1. Huaneng Tibet Power Generation Co. Ltd., Lasa 850000, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In regard to temperature control and crack prevention for concrete dams in plateau areas with high elevation and large temperature differences, a summary was made of research on concrete crack prevention during the construction of the first large concrete gravity dam, with a height of more than 100 meters, in the Tibet Autonomous Region. Based on on-site monitoring data during the dam construction for the Zangmu Hydropower Station, dynamic feedback simulation analysis technology was used to demonstrate the real working condition throughout the construction period. Then, risks that may occur during the later construction period were predicted according to the simulation results, and the related standards and measures for temperature control and crack prevention were adjusted and optimized.

Key words: concrete dam; construction period; temperature control and crack prevention; feedback simulation analysis; area with high altitude and large temperature difference; Zangmu Hydropower Station

混凝土坝开裂是非常普遍的现象,有“无坝不裂”的说法。如何解决混凝土开裂问题一直是众多国内外学者长期关注的焦点,业内多位学者的研究已取得一系列成果^[1-6]。但是,针对高寒、高海拔大温差地区的研究较为分散,进行系统性研究的不多,也无相关规范与导则供借鉴。厉易生等^[1]最早提出严寒地区拱坝应通过加强表面保温力度来减小温度荷载,防止裂缝出现;朱伯芳等^[4]系统阐述了表面保温的具体方法,在保温部位、保温时长控制、保温效果的计算方法等方面都提出了系统的建议和实施方案,认为做好表面保温有望实现结束“无坝不裂”的历史;朱伯芳^[6]提出在适当提高安全系数、严格控制基础温差、做好早期表面保护的基础上,再做好长期表面保护,就有可能防止施工期出现裂缝;侍克斌等^[7]朱伯芳等^[8]提出了寒冷地

收稿日期:2014-11-12

作者简介:潘希强(1985—),男,山东青岛人,工程师,硕士,主要从事水利水电项目规划及建设管理工作。E-mail:panxq@hntibet.com

区长间歇越冬时的温控防裂措施与方法;胡平等^[9]结合拉西瓦拱坝在关键控制部位、关键控制时间段、分层厚度优化及加快施工进度等几个方面开展了温控防裂措施的系统研究,提出了大坝基础约束区与非约束区混凝土的系统温控措施;李昇等^[10]、牛万吉等^[11]和杨晨光等^[12]也曾就高寒地区的碾压混凝土坝防裂问题开展了针对性研究。

藏木水电站位于西藏加查县,大坝建基面高程为3 198 m,最大坝高 116 m,是我国在西藏地区建设的第一座百米级混凝土重力坝。工程所在地具有气候干燥、冬寒夏凉、年温差小而日温差大、年平均温度低、低温季节长且最低气温低、日照丰富而多大风的基本特征。藏木水电站大坝这种特殊的气候条件使得其在施工期需要采取的温控防裂措施也更为特殊,温控防裂工作需要更有针对性,如此才能保证大坝施工质量。

以藏木水电站施工期监测资料为基础,采用三维有限元仿真模拟分析与跟踪反馈分析相结合的手段,对大坝进行动态跟踪反馈分析。通过对在高寒、高海拔地区施工的藏木水电站大坝的几种典型开裂风险^[13-15]进行仿真模拟与预测分析,提出了施工期温控优化措施与建议。

1 基于实测资料的绝热温升参数反馈分析

大坝混凝土进行温控防裂设计时,传统的做法是依据室内试验所获取的热力学参数和多年统计气象资料,采用三维有限元仿真分析方法确定相关的温控标准与措施;而在实际工程中,由于现场混凝土养护条件与室内条件的差异,以及实际边界条件的不确定性,施工过程中往往还需要根据现场的施工情况和监测资料的反馈分析来对大坝的温控标准与措施进行优化调整。笔者拟在研究温度实测资料的基础上,对大坝混凝土绝热温升参数进行反演分析,获取与现场混凝土真实热学性能相吻合的参数,以提高三维跟踪仿真分析结果的可靠性。

1.1 现场温度监测结果分析

以左岸 8 号坝段和右岸 9 号坝段的监测资料为例进行分析。对照《藏木大坝混凝土温控技术要求(2012 年 3 月)》^[16],可以发现基础约束区最高温度出现了明显的超标现象,由表 1 可见,最多超标达 7.2℃(8 号坝段下游第 1 仓)。

表 1 8 号、9 号坝段各区域最高温度控制标准及监测结果

Table 1 Highest temperature control standards and monitoring results of different regions in No. 8 and No. 9 dam sections

坝段	温控分区	上游坝块		下游坝块			
		高程范围/m	最高温度/℃		高程范围/m	最高温度/℃	
			标准	实测(仓号)		标准	实测(仓号)
8 号	强约束区	(3 210,3 218]	≤26	30.0(1,5)	(3 204,3 212]	≤26	33.2(1)
	弱约束区	(3 218,3 226]	≤28	—	(3 212,3 220]	≤28	31.0(7,8)
	自由区	>3 226	≤30	—	>3 220	≤30	—
9 号	强约束区	(3 198,3 206]	≤26	32.8(1)	(3 204,3 212]	≤26	30.4(4)
	弱约束区	(3 206,3 214]	≤28	26.9(8)	(3 212,3 220]	≤28	—
	自由区	>3 214	≤30	—	>3 220	≤30	—

1.2 绝热温升参数反演分析

大坝混凝土基础约束区最高温度超标意味着基础温差增大,这种最高温度超标的原因并不清楚,混凝土本身水化热特性变化或者现场施工温控措施与设计要求偏差均可以导致此现象。基础约束区混凝土出现超标现象后,原有的温控措施能否还满足后期的防裂安全控制需要进一步分析。

选择 8 号典型溢流坝段(含底孔)为计算模型,以现场混凝土材料试验资料、实际的浇筑时间和浇筑层厚、间歇时间等施工资料和实测气象资料为计算参数,仿真计算坝体基础约束区及非约束区混凝土的温度变化,并以坝内埋设的温度计实测资料为依据,反演复核坝体混凝土的绝热温升参数。

针对藏木水电站大坝混凝土的绝热温升参数,利用遗传算法^[17]进行了动态反演分析,结果表明大坝混凝土的实际绝热温升值为 24.2℃,比室内试验值 21.5℃高出 2.7℃。仿真计算得出的 8 号坝段 4 个典型仓混凝土的温度过程线与实测温度过程线基本一致(图 1),说明反演所得的混凝土绝热温升参数可以较真实地反映大坝混凝土的真实放热特性。而温度出现超标的原因除了部分仓浇筑温度超标外,混凝土实际绝热温升特性与室内试验值出现较大偏差也是另一个重要因素。

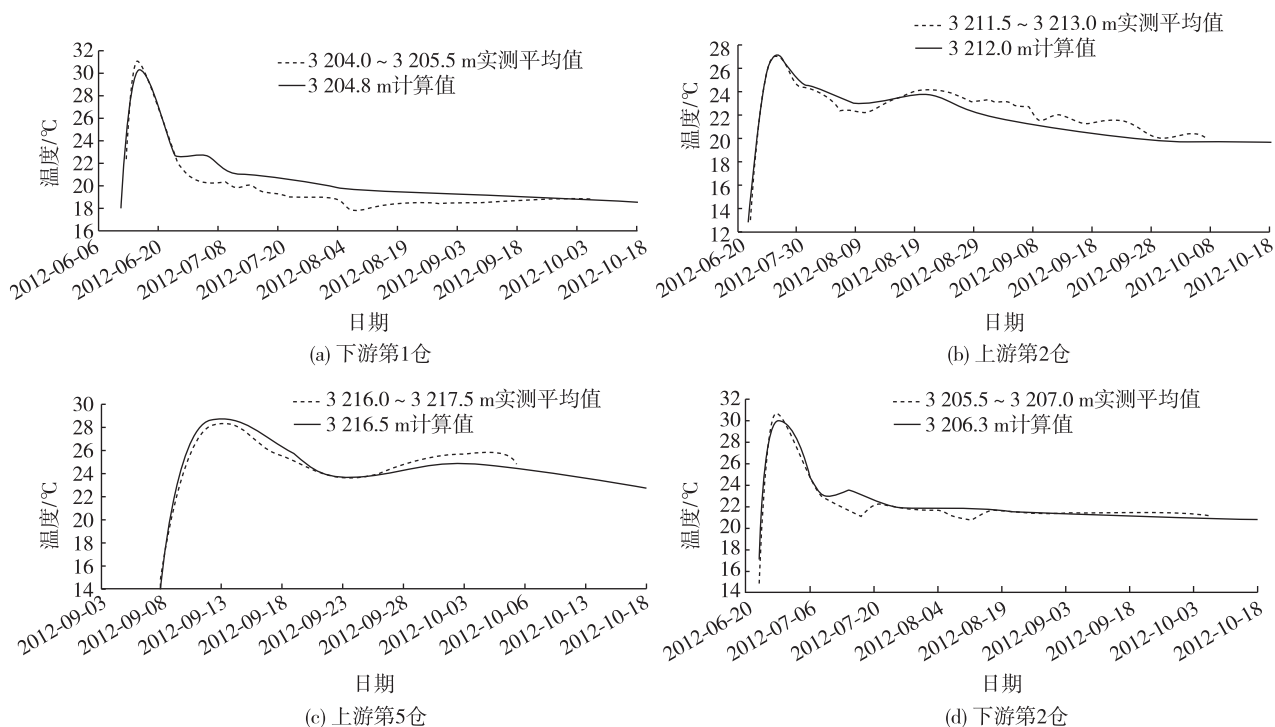


图 1 8 号坝段典型点 2012 年温度反演值与实测值对比

Fig. 1 Comparison of inversion results and measured temperature data at typical points in No. 8 dam section in 2012

2 基于现场资料的温度应力仿真与措施优化分析

按照实际浇筑进度和施工状况,基于现场实际监测资料和反演参数,对大坝多个典型坝段的温度场、应力场进行多次跟踪仿真反馈分析^[13-15],进而对施工期温控措施进行校核和优化,提出了相关的建议与措施,并为工程施工所采纳。为节省篇幅,这里仅选取几个具有代表意义的问题进行论述。

2.1 基础强约束区二期冷却同冷区高度优化分析

本工程基础约束区最高温度超出了设计温控标准,为保证二期冷却时的工程安全,需要对设计温控措施进行调整。经过方案比选,认为适当增加基础约束区同冷区高度是较为合适且方便实施的方案。反馈仿真计算结果表明,基础强约束区第一批冷却同冷区高度如果仍然按 12 m 控制,溢流坝段上游段二期冷却末期应力将达到 1.84 MPa(图 2(a)),安全系数仅为 1.4;而如果同冷区高度达到 24 m,最大应力可控制在 1.6 MPa 以下(图 2(b)),安全系数提高至 1.71,大幅度降低了二期冷却末期的开裂风险。

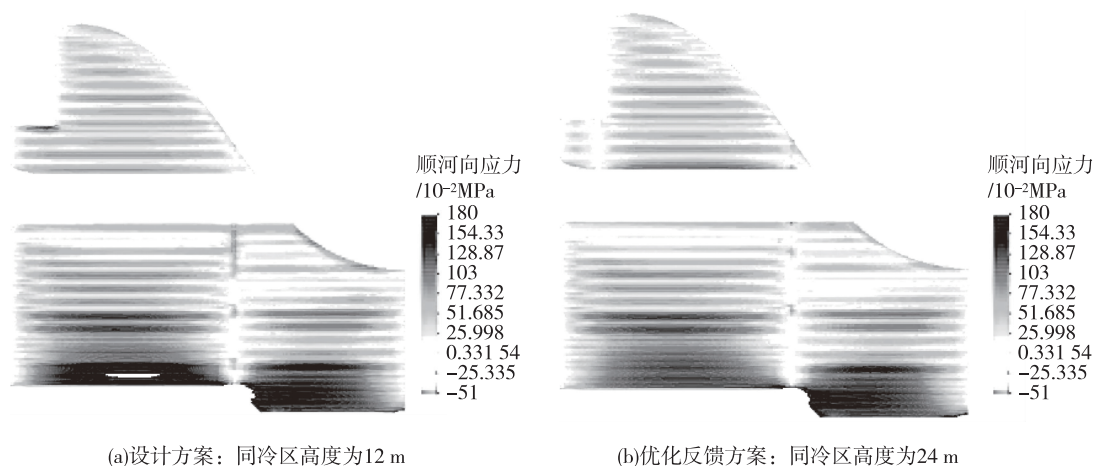


图 2 基础约束区不同同冷区高度应力包络图对比

Fig. 2 Stress envelopes for different cooling heights in dam foundation restraint zone

2.2 基础强约束区水管冷却方式优化分析

大坝施工过程中由于最高温度超标,基础约束区同冷区高度由 12 m 改为 24 m,这种冷却方案的改变将导致工期延迟接近 2 个月,接缝灌浆进度难以满足按期蓄水要求,为此研究了将设计要求的混凝土开始二期冷却最小龄期由 120 d 提前至 75 d 的可行性。

图 3 中 gk8-1 为设计冷却方案,同冷区高度为 12 m;gk8-7 同冷区高度为 24 m 的方案;gk8-8 在工况 gk8-7 的基础上总冷时间提前 45 d;gk8-9 则研究下部灌区二期冷却与上部相邻灌区中期冷却同步的可行性。

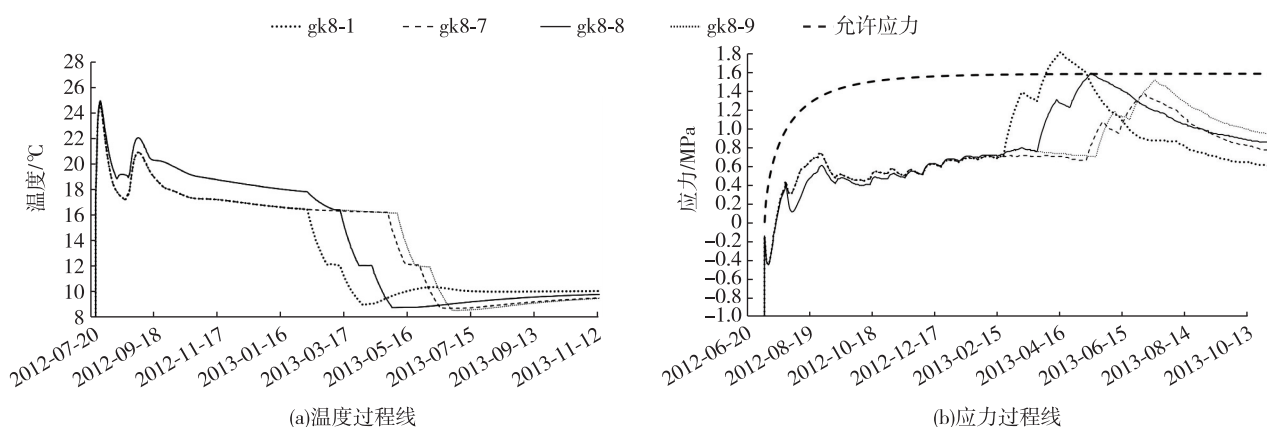


图3 基础强约束区不同冷却进度时混凝土内部温度及应力对比曲线

Fig. 3 Internal temperature and stress curves of concrete for different cooling schemes in dam foundation restraint zone

如图 3(a) 所示(特征点为上游段第 3 浇筑层距建基面 4.0 m 处的中心点),同冷区高度为 24 m 方案的应力远小于 12 m 方案的,但前者的不足之处是冷却时间延长;gk8-8 将中期冷却开始龄期提前至 45 d,二期冷却开始龄期提前至 75 d,整个冷却时间缩短 45 d。图 3(b) 表明虽然二期冷却末期最大应力稍有增大,但仍小于允许拉应力,可满足设计抗裂要求。gk8-9 的仿真结果表明,下部灌区二期冷却与上部相邻灌区中期冷却同步进行对大坝二期冷却末期应力和冷却工期控制均无明显益处。

由此可见,中期冷却和二期冷却开始时间分别可提前至龄期为 45 d 和 75 d,这一结论与朱伯芳院士提出的“小温差、慢冷却、早冷却”^[6]的冷却理念一致。采用这种冷却方式,在保障工程安全的同时,还可以达到加快接缝灌浆进度的目的,这一指导思想在藏木水电站工程中得到很好的应用。

2.3 局部区域的表面保温力度与措施优化分析

藏木水电工程地处高海拔、大温差地区,常年平均昼夜温差达 20 °C 以上,因此大坝混凝土表面防裂难度很大。如果不考虑短周期温度应力的影响,反馈仿真计算表面散热系数 β 按照设计要求不大于 $6.3 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 进行控制,强约束区大部分的表面轴向长周期应力可控制在 0.5 ~ 1.2 MPa 之间,局部可达到 1.5 MPa,基本可以满足设计抗裂要求。但是如果考虑短周期应力影响,表面应力增幅在 0.3 ~ 0.6 MPa,表面总应力水平达到 1.5 ~ 1.8 MPa,安全系数为 1.2 ~ 1.7,存在较大开裂风险。因此,从偏安全的角度出发,应该在入冬前对大坝坝踵、导流底孔、棱角、拐角以及高温季节浇筑的混凝土区域适当加大保温力度, β 最好按照不大于 $2.67 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 进行控制。如此,大坝施工期上游表面的防裂安全将得到有效保障,相关计算对比结果如图 4 所示,图中曲线反映的是大坝上游表面距离建基面约 1 m 处的变化规律。

2.4 底孔部位防裂风险及应对措施优化分析

仿真结果表明,左冲和临时导流底孔部位入冬或过水时,应力水平相对较高,如图 5 所示,已接近混凝土的允许拉应力(1.6 MPa),主要是因为入冬和过水时内外温差较大所致。反馈结果表明,适当加快导流底孔区域的二期冷却进度,或进行大面积中期冷却,可有效降低底孔入冬和过水时的内外温差,从而降低底孔内表孔的表面应力,降低开裂风险。图 5 是加快冷却进度后底孔区表面应力,可以看出与设计进度相比,底孔区的应力将减小 0.3 MPa,应力状态得到明显改善。

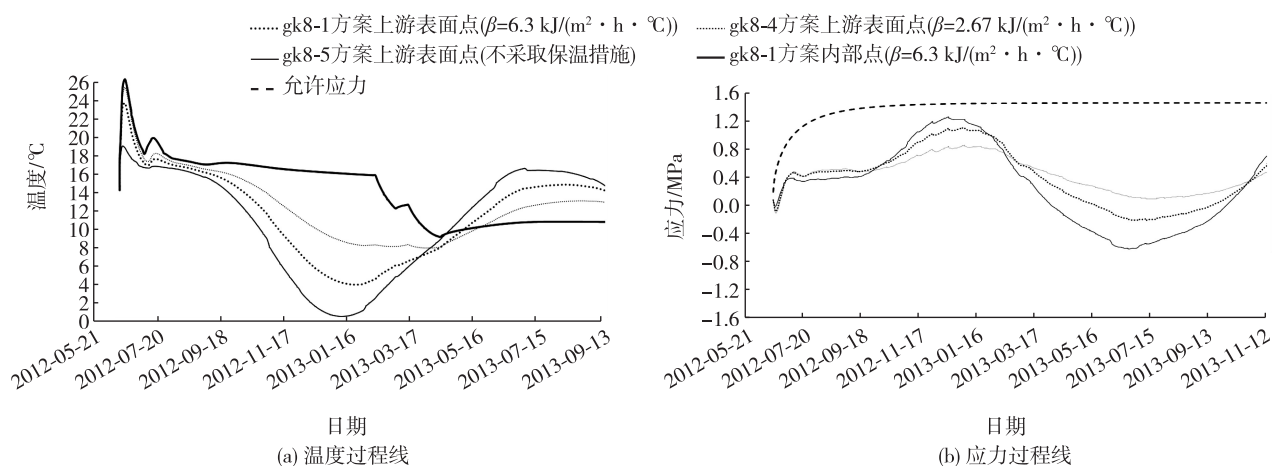


图4 混凝土上游表面不同保温措施时温度与应力对比

Fig. 4 Temperature and stress curves for upstream concrete surface using different insulation measures

2.5 纵缝开合规律及可灌性方案优化分析

施工期纵缝的可灌性和蓄水进度是工程技术人员最关心的问题。藏木水电站反馈仿真计算结果表明,按照设计方案进行冷却降温,如果不出现提前蓄水压缝现象,纵缝开度大部分可达1.5 mm以上,具有较好的可灌性。但是如果出现未完成二期冷却就蓄水的情况,缝面将呈压紧状态,部分甚至有可能小于0.5 mm,将影响其可灌性。因此,二期冷却结束前应尽量避免出现大坝挡水的情况。纵缝开度及缝面应力变化过程见图6。

2.6 初次蓄水及运行期大坝温度和应力变化规律及风险分析

跟踪反馈仿真计算表明,大坝2013年11月初次蓄水时,由于混凝土表面温度与水温较接近,温差较小,因此,初次蓄水冷击作用导致开裂风险相对较小。大坝上游表面基础约束区和非约束区温度和应力过程见图7,由图7可知大坝蓄水成库后,坝体上游表面应力状态随着水温的变化而逐渐变化,呈现逐渐减小的趋势,这就意味着如果大坝上游表面出现裂缝,那么开裂风险最大的时候不是蓄水后期,而是在未蓄水前或者蓄水之时,因此防裂的重点在于蓄水之前。

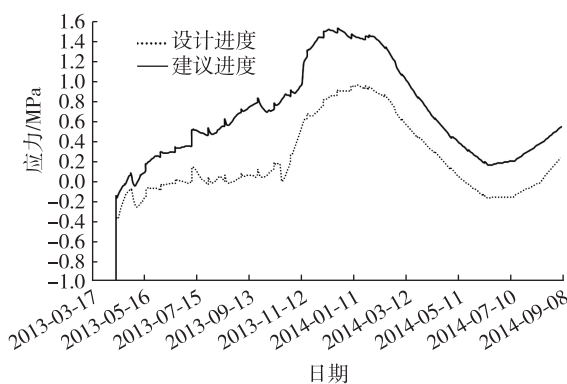


图5 不同冷却进度孔口区表面应力对比

Fig. 5 Comparison of orifice surface stress for different cooling schemes

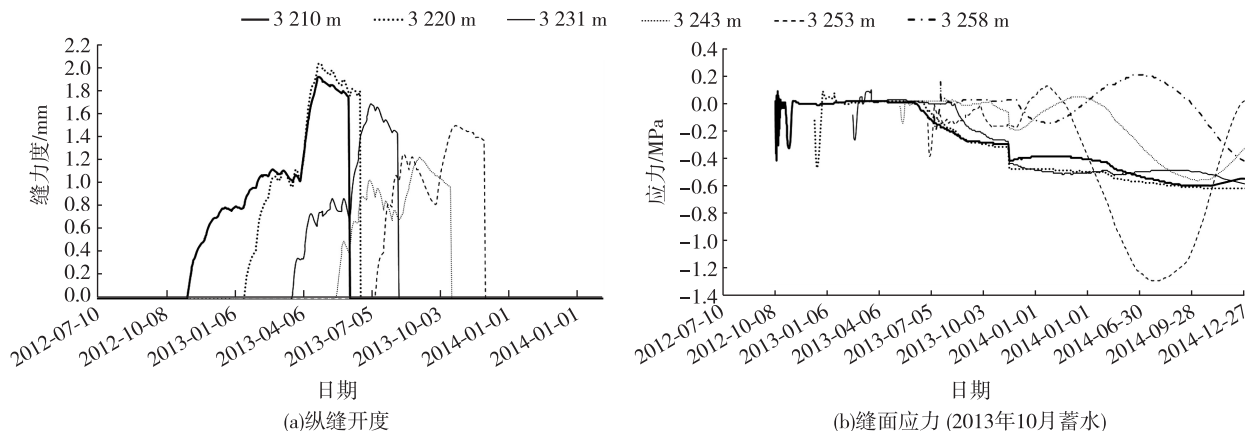


图6 9号坝段纵缝开度及缝面应力变化过程线

Fig. 6 Variations of longitudinal seam opening and joint surface stress in No. 9 dam section

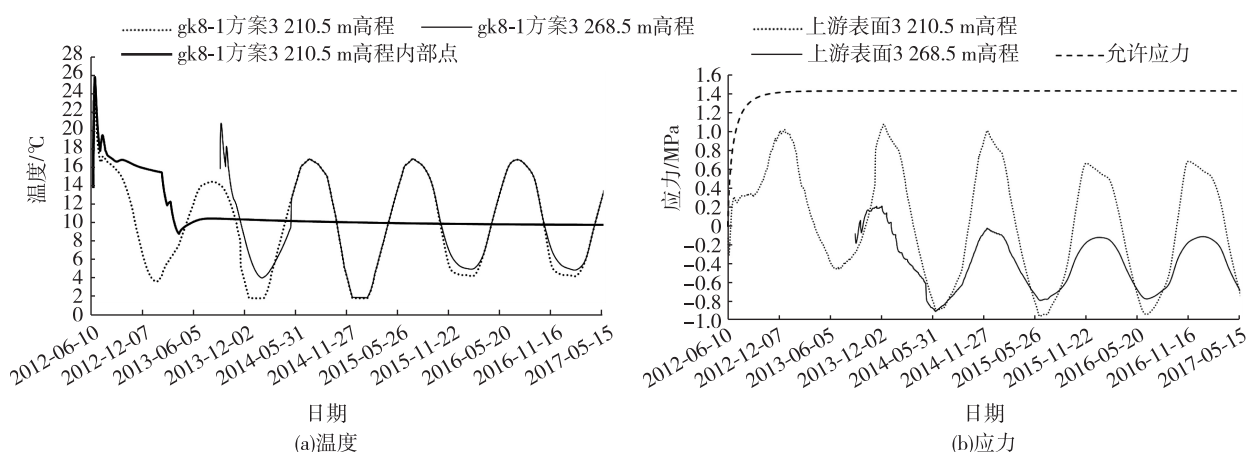


图7 大坝上游表面基础约束区和非约束区温度和应力过程线

Fig. 7 Temperature and stress curves for upstream dam foundation restraint and non-restraint zones

2.7 提高接缝灌浆温度可行性分析

大坝基础约束区施工时受各种外在客观因素综合影响,较多部位出现最高温度超出设计标准(不高于 27°C)的情况。反馈分析结果表明,由于基础温差增加,如果仍按照设计方案(方案1)进行冷却,二期冷却末有可能出现超标应力,存在较大开裂风险。为有效控制这种可能存在的后期风险,除了适当提前中期冷却、二期冷却开始时间外(方案2),还可考虑提高接缝灌浆温度方案(方案3)。该建议被设计采纳,事实证明,大坝完成二期冷却时基础约束区未发现裂缝,表明这些组合方案的有效性。典型方案温度和应力对比曲线如图8所示。

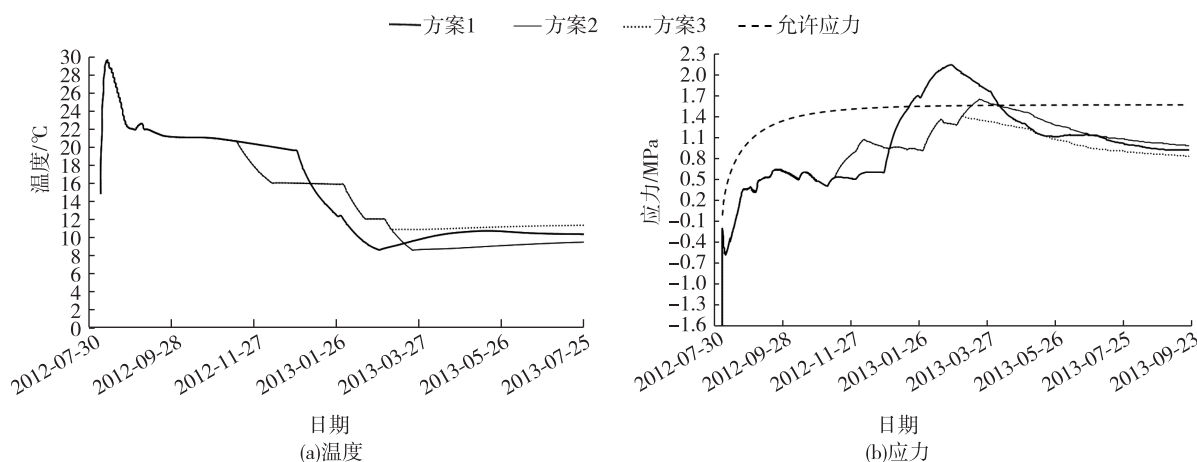


图8 8号坝段不同冷却方案时的温度和应力过程线对比(基础约束区上游块3213.5m高程)

Fig. 8 Temperature and stress curves for No. 8 dam section using different cooling schemes
(upstream dam foundation restraint zone with elevation of 3213.5m)

3 结 语

a. 施工期参数反演工作使得藏木水电站大坝仿真分析使用的参数能更真实地反映混凝土的材料特性,为真实把握大坝施工期工作性态提供了基础条件。

b. 实时反馈分析与风险预警为大坝提前采取补救温控措施提供了技术支持。

c. 目前大坝已实现了正常蓄水运行,施工期未出现危害性裂缝,为藏木水电站大坝在高海拔、大温差地区保证长期安全运行提供了重要保障。

d. 藏木水电工程大坝混凝土温控防裂的成功经验为国内类似地区后期修建混凝土大坝提供了重要的参考范例,具有较好的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 厉易生,朱伯芳,林乐佳. 寒冷地区拱坝苯板保温层的效果及计算方法[J].水利学报,1995,26(7):55-58. (LI Yisheng, ZHU Bofang, LIN Lejia. The effect of insulating layer on arch dams located in cold area[J].Journal of Hydraulic Engineering, 1995,26(7):55-58.(in Chinese))
- [2] 王福林,杜士斌. 严寒地区碾压混凝土重力坝的温度裂缝及其防治[J].水利水电技术,2001,32(1):60-62. (WANG Fulin, DU Shibin. The temperature crack of RCC dam in cold area and its prevention[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2001,32(1):60-62.(in Chinese))
- [3] 顾耀民. 黄河沙坡头水利枢纽工程混凝土温控与防裂措施[J].宁夏工程技术,2002,1(4):373-377. (GU Yaomin. The concrete's temperature control and crack control measures of Shapotou hydro-junction project on Yellow River [J].Ningxia Engineering Technology, 2002, 1(4):373-377.(in Chinese))
- [4] 朱伯芳,许平. 加强混凝土坝面保护尽快结束“无坝不裂”的历史[J].水力发电,2004,30(3):25-28. (ZHU Bofang, XU Ping. Strengthen superficial insulation of concrete dams to terminate the history of “on dam without cracks” [J].Water Power, 2004, 30(3):25-28.(in Chinese))
- [5] 毛远辉,侍克斌,牛景太. 寒冷干旱地区高碾压混凝土坝的温控研究初探[J].水利科技与经济,2006,12(4):255-256. (MAO Yuanhui, SHI Kebin, NIU Jingtai. The preliminary study on temperature control of high roller compacted concrete gravity dam in cold and drought area [J].Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(4):255-256. (in Chinese))
- [6] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J].水利学报,2006,37(12):1424-1432. (ZHU Bofang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam [J].Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(12):1424-1432.(in Chinese))
- [7] 侍克斌,毛远辉,牛景太. 高碾压混凝土坝在严寒干旱地区的温控探讨[J].水力发电,2007,33(1):29-31. (SHI Kebin, MAO Yuanhui, NIU Jingtai. The preliminary study on temperature control of roller compacted gravity dam in cold and dry area [J].Water Power,2007,33(1):29-31.(in Chinese))
- [8] 朱伯芳,吴龙坤,李玥,等. 混凝土坝施工期坝块越冬温度应力及表面保温计算方法[J].水利水电技术,2007,38(8):34-37. (ZHU Bofang, WU Longkun, LI Yue, et al.The thermal stress and superficial thermal insulation of concrete dam under construction in winter in cold region[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(8):34-37.(in Chinese))
- [9] 胡平,杨萍,张国新,等. 拉西瓦水电站混凝土双曲拱坝温控防裂研究[J].水力发电,2007,33(11):51-54. (HU Ping, YANG Ping, ZHANG Guoxin, et al. Study on the temperature control and crack prevention of double-curvature concrete arch dam for Laxiwa hydropower station[J].Water Power,2007,33(11):51-54.(in Chinese))
- [10] 李昇,侍克斌,冯晓辉. 高“冷热风干”地区 RCC 坝仿真计算及温控防裂措施[J].水利水电科技进展,2008,28(6):44-48. (LI Sheng, SHI Kebin, FENG Xiaohui. Simulation computation and temperature control measures for crack prevention studies on RCC gravity dam in cold hot windy and dry areas[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(6):44-48.(in Chinese))
- [11] 牛万吉,王建平,罗清萍,等. 严寒干旱地区 RCC 重力坝的保温防裂措施[J].水利水电科技进展,2009,29(1):44-46. (NIU Wanji, WANG Jianping, LUO Qingping, et al. Research on the heat preservation and crack prevention measures for RCC gravity dam in severely cold and dry area[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(1):44-46.(in Chinese))
- [12] 杨晨光,侯攀,黄玮. 高寒地区大坝混凝土施工期的温控设计与研究[J].水电站设计,2011,27(4):23-25. (YANG Chenguang, HOU Pan, HUANG Wei. Design and research of temperature control for concrete dam construction period in alpine region[J].Design of Hydroelectric Power Station,2011,27(4):23-25.(in Chinese))
- [13] 中国水利水电科学研究院. 藏木水电站混凝土重力坝施工阶段三维温度应力仿真分析与温控标准、温控措施复核及优化研究[R].拉萨:华能西藏发电有限公司,2012.
- [14] 中国水利水电科学研究院. 藏木水电站混凝土重力坝施工期三维温度应力跟踪仿真分析与风险预测(阶段报告二)[R].拉萨:华能西藏发电有限公司,2013.
- [15] 中国水利水电科学研究院. 藏木水电站混凝土重力坝施工期三维温度应力跟踪仿真分析与风险预测(阶段报告三,初次蓄水前)[R].拉萨:华能西藏发电有限公司,2013.
- [16] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 藏木大坝混凝土温控技术要求(2012年3月)[R].拉萨:华能西藏发电有限公司,2012.
- [17] 刘有志. 大体积混凝土温控与湿控防裂方法研究[D]. 南京:河海大学,2006.