

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.01.027

特高拱坝陡坡廊道混凝土施工期温控措施优化

汪娟,王振红

(中国水利水电科学研究院,北京100038)

摘要:特高拱坝混凝土温控防裂措施直接影响工程施工质量和结构安全,为防止特高拱坝施工期出现温度裂缝,以白鹤滩特高拱坝陡坡廊道坝段为例,采用三维有限元法,进行封拱温度、廊道遮闭等措施下混凝土温度场和温度应力分析,对比施工期温控措施优化效果。结果表明:特高拱坝陡坡非廊道约束区混凝土最高温度、最大拉应力和最小抗裂安全系数均满足温控防裂要求,主要开裂风险出现在廊道顶拱和底板局部区域;通过降低最高温度、提高封拱温度并提前做好廊道遮闭等措施,廊道混凝土最大拉应力降低为1.54 MPa~2.18 MPa,最大降低幅度达到57.4%,优化温控措施防裂效果明显。研究结果可为工程施工期温控方案提供参考。

关键词:拱坝;廊道混凝土;施工期;温度应力;温控措施

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)01-0200-07

Optimization of Temperature Control Measures During the Concrete Construction Period of the Steep Slope Gallery of the Ultra-high Arch Dam

WANG Juan, WANG Zhenhong

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

Abstract: The temperature control and crack prevention measures for concrete in ultra-high arch dams directly affect the construction quality and structural safety of the project. In order to prevent temperature cracks during the construction period of ultra-high arch dams, this work took the steep slope gallery section of the Baihetan Extra High Arch Dam as an example, and adopted the three-dimensional finite element method to analyze the concrete temperature field and temperature stress under measures such as arch sealing temperature and gallery closure. The optimization effect of temperature control measures during the construction period is compared. The results show that the maximum temperature, maximum tensile stress, and minimum crack resistance safety factor of the concrete in the non-corridor constrained zone of the steep slope of the ultra-high arch dam all meet the requirements of temperature control and crack prevention, and the main cracking risk occurs in the local areas of the top arch and bottom plate of the corridor; By reducing the maximum temperature, increasing the arch sealing temperature, and taking measures such as covering the gallery in advance, the maximum tensile stress of the gallery concrete was reduced to 1.54 MPa~2.18 MPa, with a maximum reduction of 57.4%. The optimized temperature control measures have a significant crack prevention effect. The research results can provide reference for temperature control scheme during the construction period of engineering projects.

Keywords: arch dam; corridor concrete; construction period; temperature stress; temperature control measures

由于特高拱坝规模大,对基础条件、结构安全等控制要求高,为保证大坝安全可靠、经济合理、正常

运行,需要对特高拱坝混凝土温控措施开展专门研究论证。

收稿日期:2024-09-27

修稿日期:2024-11-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3090102,2021YFC3090104);国家自然科学基金(52192672)

作者简介:汪娟(1991—),女,硕士,工程师,主要从事混凝土结构温控防裂数值分析等方面工作。E-mail: 1584354558@qq.com

特高拱坝的温控防裂,立足于温度应力的仿真分析以及控温指标的合理确定,通过通水降温的精准化以及保温控温的精细化,建立了一整套温控防裂技术体系。目前国内对混凝土拱坝温控防裂研究较多^[1-4],但对于特高拱坝陡坡复杂廊道混凝土的研究较少。樊启祥等^[5]探索研究了特高拱坝混凝土温控全过程、工作性态及智能建造管理平台研发等关键技术。刘毅等^[6]结合大体积混凝土温控防裂智能监控技术,研究大坝混凝土施工过程中温度指标的精准监控和动态预警。夏勇等^[7]结合叶巴滩工程,通过温控措施优化,有效提高坝体最不利情况下的安全系数。马睿等^[8]探索混凝土拱坝温度应力与横缝性态智能控制方法,构建了混凝土拱坝温度应力与横缝性态智能控制系统。李松辉等^[9]开发了混凝土坝温控全过程智能关联优化调控方法和系统,实现了全要素温控信息的全面感知互联互通。徐小蓉等^[10]结合风光拱坝工程,分析堆石与自密实混凝土的温度演化规律,进行了等效均质堆石混凝土温度仿真研究。李文伟等^[11]进行温控措施优化比选,形成适合高寒地区低热水泥混凝土拱坝的温控防裂方案。郑文勇等^[12]对比分析了高温间歇对该碾压混凝土坝施工期温度、应力的影响。李静等^[13]采用增设纵缝和同冷区同步冷却的温控技术,降低大坝高度方向的温度梯度。

为了满足检查、灌浆及排水等要求,白鹤滩大坝内设有 5 层检查廊道和 1 层底部基础廊道,包含着一个由多条检查廊道、基础灌浆廊道、基础排水廊道和坝址排水廊道等组成的纵横交错复杂的洞室群。由于大坝廊道结构和应力分布较为复杂,在大坝施工期常出现裂缝,本文以白鹤滩特高拱坝陡坡廊道坝段为例,采用三维有限元法^[14-15],进行封拱温度、廊道遮闭等措施下混凝土温度场和温度应力分析,对比施工期温控措施优化效果,以期为该工程施工期温控方案提供参考。

1 工程概况和计算理论

白鹤滩高拱坝位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内,大坝坝址具有大风、干热和强日照等复杂多变气象条件。拦河坝为混凝土双曲拱坝,坝顶高程 834 m,最大坝高 289 m,为典型的 300 m 级特高拱坝。工程地处亚热带季风区,坝址区多年平均气温 21.9℃,其中多年平均最高气温 27.5℃,发生在 7 月份,多年平均最低气温 13.3℃,发生在 1 月份。

1.1 温度场分析

在计算域 R 内任何一点处,均匀、各向同性固体温度场 $T(x, y, z, t)$ 满足热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: T 是温度,℃; a 是导热系数, m^2/h ; θ 是混凝土绝热温升,℃; t 是时间,d; τ 是龄期,d。

1.2 应力场分析

由物理方程、几何方程和平衡方程可得任一时段 Δt_i 在区域 R_i 上的有限元支配方程:

$$[K_i] \{ \Delta \delta_i \} = \{ \Delta P_i^G \} + \{ \Delta P_i^C \} + \{ \Delta P_i^T \} + \{ \Delta P_i^S \} + \{ \Delta P_i^0 \} \quad (2)$$

式中: $\{ \Delta \delta_i \}$ 为区域 R_i 内所有节点三个方向上的位移增量, $\{ \Delta P_i^G \}$ 、 $\{ \Delta P_i^C \}$ 、 $\{ \Delta P_i^T \}$ 、 $\{ \Delta P_i^S \}$ 和 $\{ \Delta P_i^0 \}$ 分别为 Δt_i 时段内由外荷载、徐变、变温、干缩和自生体积变形引起的等效结点力增量。

2 有限元计算模拟分析

2.1 建立有限元模型

选取典型陡坡带廊道坝段建立三维有限元模型见图 1。在网格剖分时,对于基岩与坝体采用六面体单元,局部采用五面体或四面体单元进行过渡,模型考虑坝体周围一定范围坝基,基岩底部和左右两侧取 2~3 倍最大坝高,计算网格总单元数 212 023,总结点数 227 590。大坝坐标设定 X 向为顺河向, Y 向为坝轴向, Z 向为竖向。

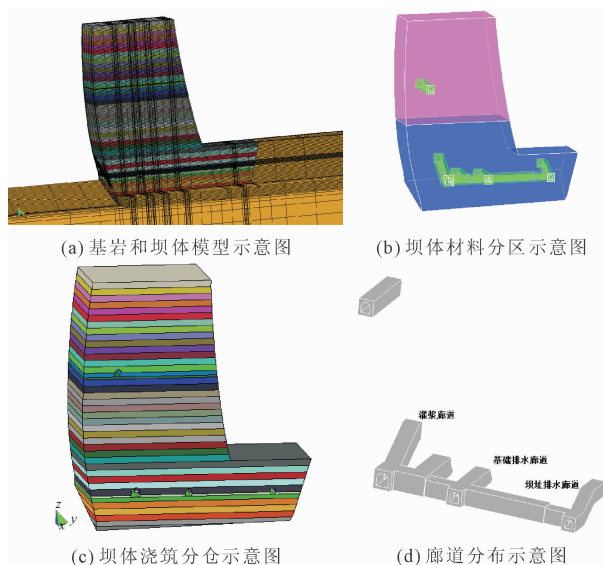


图 1 陡坡坝段(带廊道)有限元计算模型

陡坡坝段基础约束区为 638 m 高程以下,638 m 高程以上为自由区。陡坡坝段基础灌浆廊道、基础

排水廊道和坝址排水廊道底高程 600 m,断面尺寸分别为 4.0 m × 4.5 m(宽 × 高)、3.0 m × 3.5 m 和 2.0 m × 3.0 m。温度场计算时,基岩的四周和底面为绝热边界,其它面为热量交换边界,坝体上游面蓄水位以上的面采用环境气温,并考虑 2℃ 辐射热的影响,水位以下为水温边界。应力场计算时,基岩底部全约束,基岩侧面法向约束。

2.2 混凝土材料参数

大坝主体混凝土为 C₁₈₀40 四级配混凝土(图 1(b)中所示蓝色区域)、C₁₈₀35 四级配混凝土(图 1(b)中所示粉色区域)和 C₁₈₀40 廊道周边二级配混凝土(图 1(b)中所示绿色区域),混凝土材料参数见表 1 和表 2。

表 1 混凝土热力学参数

强度等级	导热系数 /(kJ · m ⁻¹ · h ⁻¹ · °C ⁻¹)	比热 /(kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	线膨胀系数 /(×10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	绝热温升/°C	弹性模量/GPa			
					7 d	28 d	90 d	180 d
C ₁₈₀ 40(大坝)	6.53	0.85	6.5	$T = 23.0t/(t + 3.6)$	26.9	36.6	42.0	43.6
C ₁₈₀ 35(大坝)	6.78	0.87	6.5	$T = 21.4t/(t + 4.35)$	26.7	37.2	41.6	43.9
C ₁₈₀ 40(廊道)	7.20	1.00	6.5	$T = 28.0t/(t + 3.6)$	31.0	38.9	41.1	44.0

表 2 混凝土材料参数

强度等级	极限拉伸值/MPa				干缩/(×10 ⁻⁶)				自生体积变形/(×10 ⁻⁶)			
	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
C ₁₈₀ 40(大坝)	80	97	112	121	108	247	312	326	5.7	-1.2	2.5	8.4
C ₁₈₀ 35(大坝)	68	94	108	115	99	227	295	316	5.7	-1.2	2.5	8.4
C ₁₈₀ 40(廊道)	80	97	112	121	108	247	312	326	5.7	-1.2	2.5	8.4

混凝土徐变度表达式为:

$$C(t, \tau) = C_1 \times (1 + 9.2\tau^{-0.45}) \times (1 - e^{-0.3(t-\tau)}) + C_2 \times (1 + 1.7\tau^{-0.45}) \times (1 - e^{-0.005(t-\tau)}) \quad (3)$$

式中: $C_1 = 0.23/E_0$, $C_2 = 0.52/E_0$, E_0 为混凝土 90 d 龄期弹性模量。

2.3 拱坝温控技术要求

混凝土全过程温度控制过程见图 2。温控技术要求如下:混凝土浇筑温度不超过 12℃。浇筑层厚按 3 m 考虑。正常浇筑间歇时间 5 d~7 d,最大不超过 20 d。考虑 2℃ 太阳辐射热。基础约束区水管间距 1.5 m × 1.0 m(竖直 × 水平),非约束区 1.5 m × 1.0 m(竖直 × 水平)。混凝土通水冷却要求如下:①一冷水温 8℃~10℃,冷却时间不少于 21 d,一冷降温速率 ≤ 0.5℃/d,通水流量 1.2 m³/h~2.0 m³/h,目标温度 20℃~21℃;②中冷水温 15℃左右,冷却降温时间 28 d,中冷降温速率 ≤ 0.3℃/d,通水流量 0.3 m³/h~1.2 m³/h,目标温度 16℃~17℃,除降温外,中冷需进行降温前的一期控温和降温后的二期控温,两次控温时间均不小于 20 d;③二冷水温 10℃,冷却时间不少于 30 d,二冷降温速率 ≤ 0.3℃/d,通水流量 0.2 m³/h~1.5 m³/h,目标温度为封拱温度 13℃~14℃。上游和下游坝面分别粘贴 5 cm、3 cm 厚挤塑聚苯乙烯保温板。

2.4 温控措施优化方案

由于陡坡坡面较陡,基础约束区面长,对坝体的约束作用也强,从温度应力控制来看,开裂风险也相对较大,尤其是陡坡坝段部位有较多的廊道结构,更进一步增加开裂风险和温控防裂的难度。以典型陡坡廊道坝段为例,研究分析陡坡坝段廊道混凝土的温度应力状况及可能的开裂风险,并提出相应的温控措施优化方案(表 3)。

表 3 陡坡廊道混凝土温控措施优化方案

方案	温控措施	备注
方案 1	设计温控措施方案(见 2.3 节),廊道表面散热系数 20.83 kJ/(m ² · h · °C)(500 kJ/(m ² · d · °C)),考虑自重荷载	设计方案
方案 2	在方案 1 基础上,不考虑自重荷载,纯温度荷载	不考虑自重
方案 3	在方案 1 基础上,最高温度降低 2℃ 且封拱温度提高 1℃	封拱温度的影响
方案 4	在方案 3 基础上,10 月份之后遮闭廊道(仿真计算时考虑为廊道洞室内热量交换边界为遮闭时的气温且廊道遮蔽后洞内保持此温度稳定)	廊道遮闭的影响
方案 5	在方案 3 基础上,当廊道内边界气温达到 21℃ 时,即 5 月之后采取措施控制廊道内边界气温恒定在 21℃。	提前控制廊道边界气温

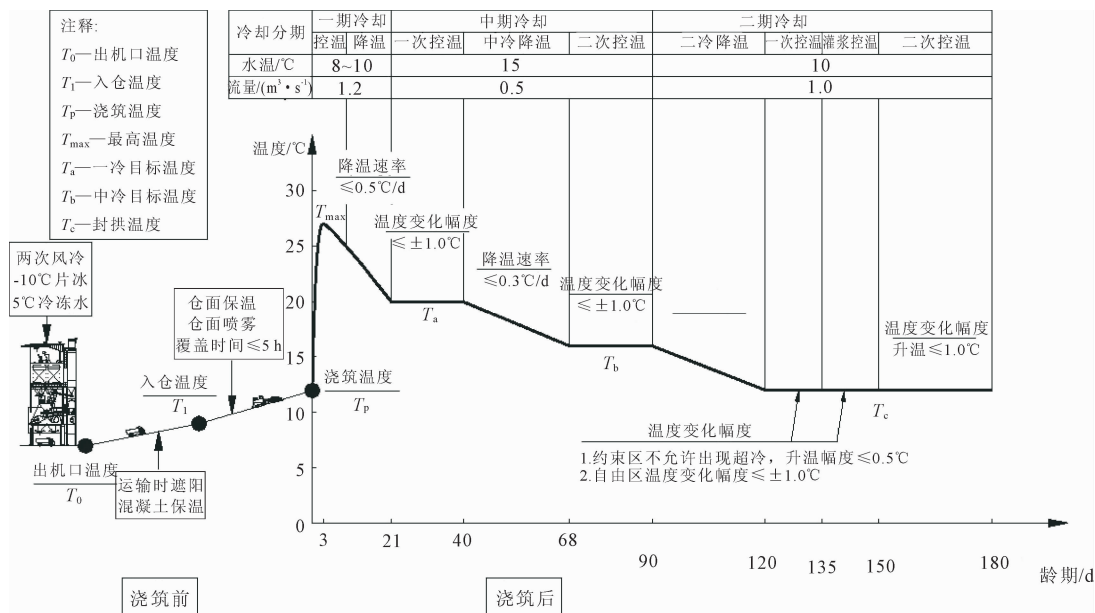


图 2 混凝土全程温度控制过程示意图

3 温控措施优化方案影响分析

3.1 自重荷载影响分析

通过方案 1 (温度荷载 + 自重荷载) 和方案 2 (仅温度荷载) 对比分析有无自重荷载对陡坡廊道混凝土的影响 (见表 4)。结果表明:①非廊道约束区混凝土最高温度不超过 25°C, 在温度荷载和自重荷载共同作用下, 最大拉应力为 1.76 MPa, 出现在 587.5 m 高程二冷末, 抗裂安全系数超过 2.00, 满足温控防裂要求。而仅温度荷载作用下最大拉应力为

2.01 MPa, 表明混凝土自重荷载有利于减小陡坡坝段约束区内部拉应力 (如图 3 和图 4 所示)。②如不考虑入冬前遮闭廊道, 廊道部位混凝土最高温度不超过 28°C, 受环境气温影响, 最大拉应力基本发生在冬季。在温度荷载和自重荷载共同作用下, 二冷末廊道区混凝土均有 2.50 MPa 以上的超标应力出现。自重荷载会增加廊道顶拱的应力水平, 拉应力最大增加约 0.94 MPa, 廊道混凝土最小抗裂安全系数远低于 1.80, 开裂风险明显增大 (如图 5 和图 6 所示)。

表 4 自重荷载对陡坡廊道混凝土应力影响

方案	最高温度/°C				最大拉应力/MPa					
	约束区内部	灌浆廊道顶拱	基础排水廊道顶拱	坝址排水廊道顶拱	强约束区		灌浆廊道顶拱	基础排水廊道顶拱	坝址排水廊道顶拱	
					σ_x	高程	抗裂安全系数 k	σ_x	σ_x	σ_x
方案 1	25.0	27.1	27.5	27.3	1.76	587.5	2.13	3.83	5.08	3.88
方案 2	25.0	27.1	27.5	27.3	2.01	587.5	1.87	2.79	4.70	3.75

3.2 封拱温度影响分析

通过方案 1 和方案 3 分析降低最高温度和提高封拱温度对廊道混凝土的影响。表 5 和图 7 结果表明:最高温度对廊道顶拱处的应力影响根据廊道所在的位置不同而略有差异, 排水廊道位于坝段中间, 相对而言影响较大; 而灌浆廊道靠近上游侧, 影响相对较小。封拱温度提高对降低灌浆和排水廊道顶拱二冷末的应力水平有利。最高温度降低 2°C 且封拱温度提高 1°C, 廊道顶拱二冷末应力降低 0.2 MPa ~

0.5 MPa 左右, 应力改善效果有限, 廊道混凝土最小抗裂安全系数仍低于 1.80, 仍不满足温控防裂要求。

3.3 廊道遮闭影响分析

通过方案 3、方案 4 和方案 5 分析廊道遮闭措施 (如在洞口处采用挂门帘方式, 避免或减少冷风倒灌入洞内) 对廊道混凝土的影响 (见表 6)。结果显示:①当廊道入冬前 (10 月份) 开始遮闭廊道口, 对改善廊道周边尤其是廊道顶拱混凝土的温度应力非常有利, 从廊道顶拱应力过程 (图 8) 可以看出, 廊

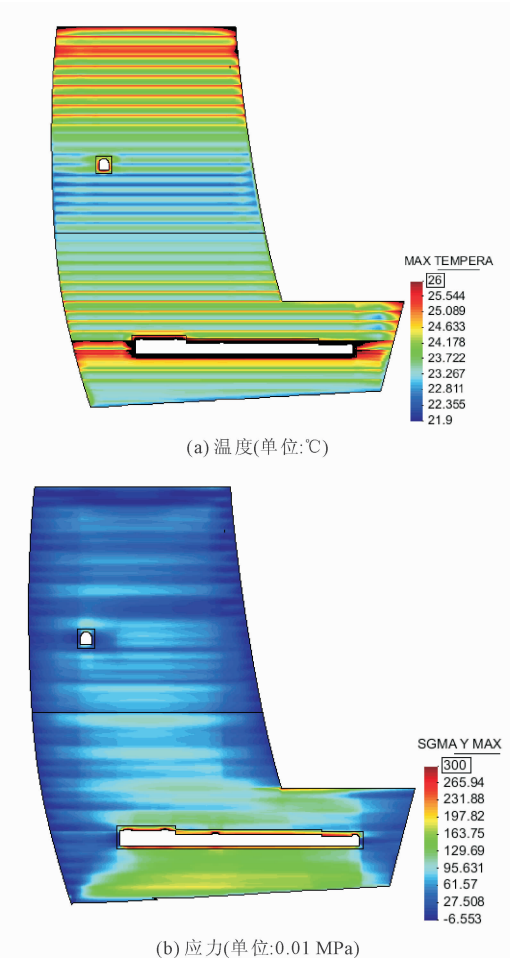


图 3 方案 1 陡坡坝段中间剖面最高温度和最大拉应力云图

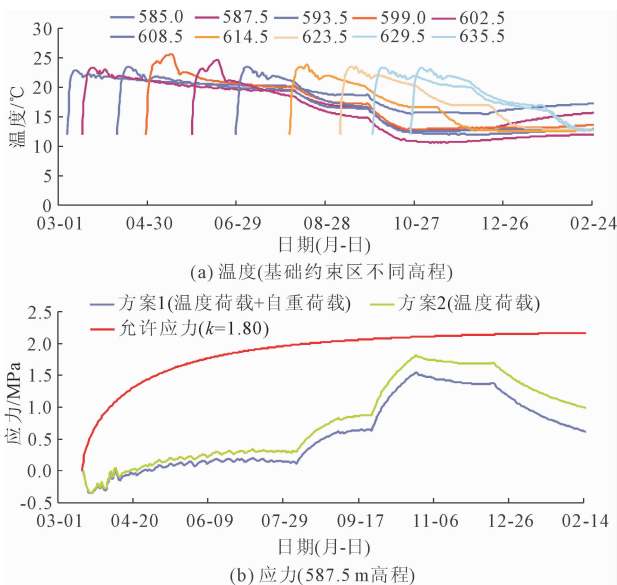


图 4 陡坡坝段有无自重荷载下基础约束区温度和应力过程线

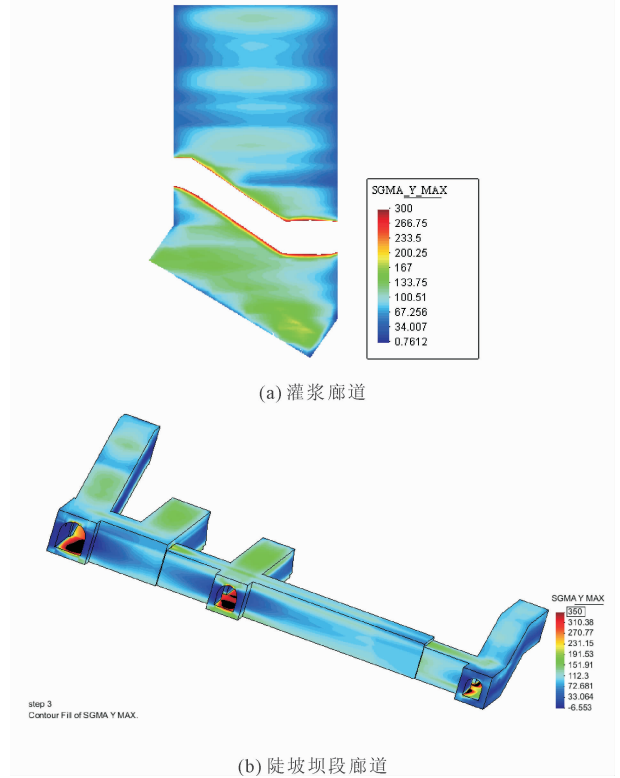


图 5 方案 1 陡坡廊道混凝土最大拉应力云图 (单位:0.01 MPa)

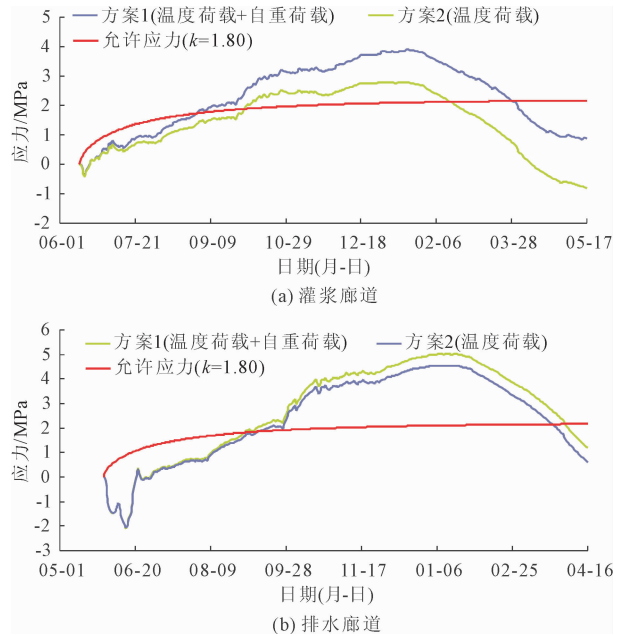


图 6 有无自重荷载不同廊道顶拱应力过程线比较

道浇筑后的当年冬季到来前将廊道口遮闭对改善冬季低温季节廊道的应力水平效果明显,廊道顶拱最大应力为 2.57 MPa ~ 3.31 MPa,仍存在开裂风险,可考虑提前遮闭廊道。②当廊道混凝土在升温阶段边界气温达到多年平均气温(21℃)之后,及时采取

遮闭措施使廊道内边界气温维持在 21℃ 左右,遮闭后廊道内的应力值逐渐减小至较低的应力水平,这主要是由于遮闭廊道后廊道内混凝土表层温度不再受环境气温影响所致,此时廊道顶拱最大拉应力为 1.54 MPa~2.18 MPa(如图 9 所示)。优化温控措施(方案 5)较设计方案(方案 1)最大降低幅度达到 57.4%,廊道混凝土最小抗裂安全系数超过 1.80,优化温控措施满足温控防裂要求,可作为陡坡廊道混凝土施工期推荐温控方案。

表 5 最高温度和封拱温度对陡坡廊道混凝土应力影响

方案	最高温度/℃	封拱温度/℃	廊道最大顺河向应力 σ_x /MPa		
			灌浆廊道顶拱	基础排水廊道顶拱	坝址排水廊道顶拱
方案 1	28.0	13	3.83	5.08	3.88
方案 3	26.0	14	3.61	4.57	3.67

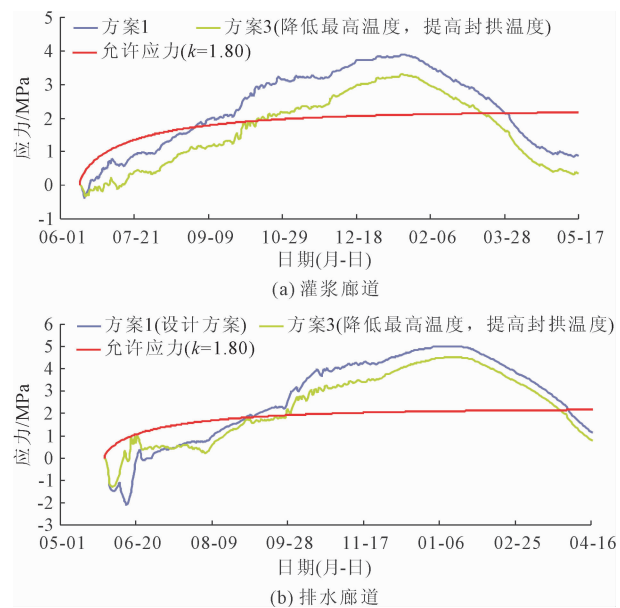


图 7 控制最高温度和调整封拱温度下不同廊道顶拱顺河向应力过程线比较

表 6 廊道遮闭对陡坡廊道混凝土应力影响

工况编号	廊道遮闭措施	最大顺河向应力 σ_x /MPa		
		灌浆廊道顶拱	基础排水廊道顶拱	坝址排水廊道顶拱
方案 3	无	3.61	4.57	3.67
方案 4	10 月份之后遮闭廊道	2.73	3.31	2.57
方案 5	5 月之后廊道内控制边界气温恒定在 21℃	1.54	2.18	1.63

4 结 论

(1) 设计方案下特高拱坝非廊道约束区混凝土最高温度、最大拉应力和最小抗裂安全系数均能满足

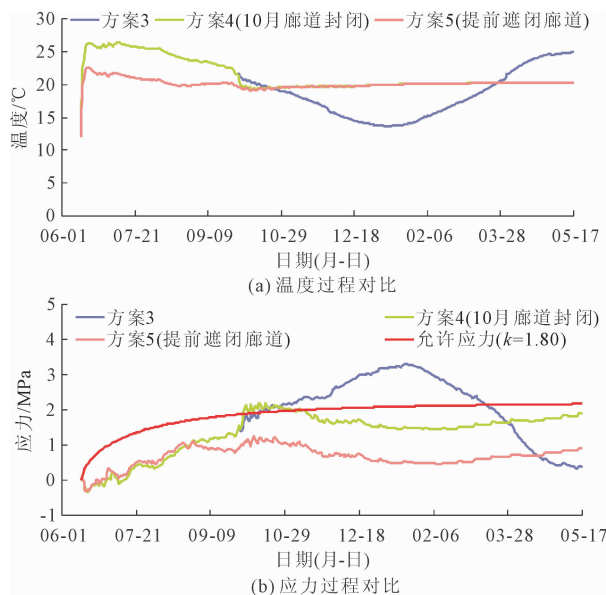


图 8 不同方案灌浆廊道顶拱温度和应力过程线对比

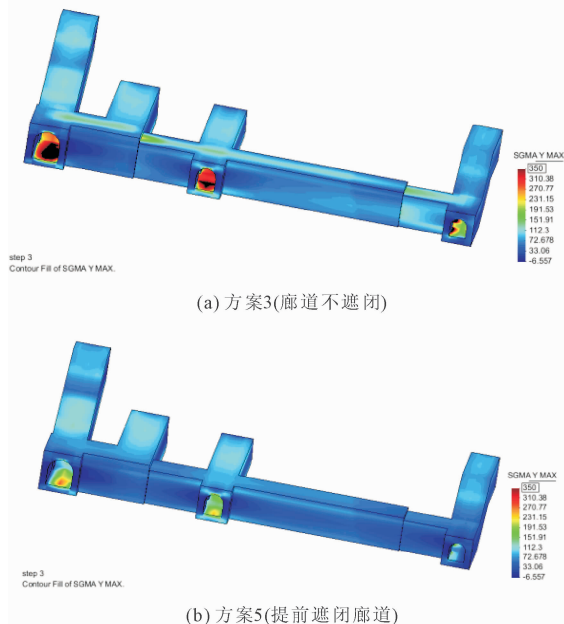


图 9 不同廊道遮闭措施下廊道部位应力云图比较 (单位:0.01 MPa)

足温控防裂要求,主要开裂风险出现在廊道区顶拱和底板局部区域。廊道混凝土应力明显与气温下降相关,二冷末廊道顶拱和底板均有 2.5 MPa 以上的超标应力出现。

(2) 通过降低最高温度、提高封拱温度并提前做好廊道遮闭等措施,陡坡廊道混凝土最大拉应力降低为 1.54 MPa~2.18 MPa,最大降低幅度达到 57.4%。高温季节遮闭廊道保障廊道洞内温度不高于年平均气温并保持稳定,提前遮闭廊道优化温控措施对改善冬季低温季节廊道的应力水平效果明

显,廊道混凝土最小抗裂安全系数超过 1.80,满足温控防裂要求,可作为陡坡廊道混凝土施工期推荐温控方案。

(3) 由于结构及边界条件的改变对坝体内部温度及应力状况的影响较大,施工过程中需要根据实际情况对廊道混凝土温控措施进行动态优化调整。

参考文献:

- [1] 商波,郭涛,朱靖林,等. 混凝土拱坝施工期温度应力仿真分析[J]. 人民黄河,2020,42(S1):227-228,231.
- [2] 杨琼,王振红,汪娟,等. 碾压混凝土拱坝横缝开度与横缝灌浆影响研究[J]. 水力发电,2021,47(1):73-76,116.
- [3] 张晓飞,王晓平,黄宇,等. 寒潮条件下碾压混凝土拱坝温度应力仿真研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):192-197.
- [4] 刘毅,杨波,程恒,等. 高寒大温差对高拱坝工作性态影响及应对措施[J]. 水力发电,2021,47(10):37-44.
- [5] 樊启祥,张超然,陈文斌,等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报,2019,38(2):22-35.
- [6] 刘毅,辛建达,张国新,等. 大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J]. 硅酸盐学报,2023,51(5):1228-1233.
- [7] 夏勇,刘毅,齐问坛,等. 高海拔地区高拱坝首仓混凝土温度反演分析与温控措施优化[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(4):71-80.
- [8] 马睿,张庆龙,胡昱,等. 混凝土拱坝温度应力与横缝性态智能控制方法[J]. 水力发电学报,2021,40(8):100-111.
- [9] 李松辉,张国新,刘毅. 混凝土坝温控全过程智能关联优化调控方法及工程应用[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(S2):193-198.
- [10] 徐小蓉,余舜尧,金峰,等. 整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度监测与等效均质仿真研究[J]. 水力学学报,2023,54(12):1404-1414.
- [11] 李文伟,江敏敏,向欣,等. 高寒地区低热水泥混凝土拱坝温控防裂方案[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(5):967-977.
- [12] 郑文勇,颀志强. 高温间歇对碾压混凝土坝施工期温控防裂影响研究[J]. 人民长江,2024,55(10):190-196.
- [13] 李静,王振红,吴启凡. 同冷区和纵缝对高海拔区西藏某重力坝混凝土温度应力的影响[J]. 水电能源科学,2022,40(4):91-94,49.
- [14] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012:387-420.
- [15] 张国新. SAPTIS:结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]. 水利水电技术,2013,44(1):31-35,44.
- [12] Zhao Zhixin, Li Xin, Wang Wenhua, et al. Analysis of dynamic characteristics of an ultra-large semi-submersible floating wind turbine[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019,7(6):169.
- [13] Martin O L H. 风力机空气动力学[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [14] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2013.
- [15] 邱大洪. 波浪理论及其在工程上的应用[M]. 北京:高等教育出版社,1985.
- [16] 张礼贤. 风浪联合作用下新型半潜浮式风机全耦合数值分析[D]. 大连:大连理工大学,2019.
- [17] 宋兆波,施伟,张礼贤,等. 典型潮差条件下半潜浮式风机系泊系统设计及动力学特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(8):3191-3201.

(上接第 177 页)