

# 叶巴滩堆石混凝土二道坝温度应力仿真 分析及温控措施研究

赵厚然<sup>1</sup>, 徐艳杰<sup>1</sup>, 赵恒<sup>2</sup>, 梁婷<sup>3</sup>, 金峰<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2. 华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司,  
四川 成都 610041; 3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

**摘要:** 对位于高海拔地区的叶巴滩堆石混凝土二道坝工程开展全坝段温度应力仿真分析, 重点研究大坝横缝分缝措施和混凝土表面保温措施对坝体温度应力的影响。结果表明: 结构分缝措施可以降低坝体内部拉应力, 设置1条横缝即可有效控制坝体内部高拉应力区范围, 并使应力极值降低约0.8 MPa; 混凝土表面保温措施可在秋冬季节显著降低大坝表层混凝土降温幅度, 减小表层温度应力水平, 使应力极值降低约0.6 MPa; 叶巴滩二道坝设置1条横缝并采取表面保温可满足施工期温控要求。

**关键词:** 堆石混凝土坝; 温度应力; 横缝; 表面保温; 高寒高海拔地区

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0167-07

## Thermal stress simulation and temperature control measures for RFC end dam of Yebatan Hydropower Project

ZHAO Houran<sup>1</sup>, XU Yanjie<sup>1</sup>, ZHAO Heng<sup>2</sup>, LIANG Ting<sup>3</sup>, JIN Feng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Yabatan Branch of Huadian  
Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd, Chengdu 610041, China; 3. Yalong River  
Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

**Abstract:** This paper carries out a simulation analysis of the thermal stress in the whole dam section of the rock-filled concrete end dam of Yebatan Hydropower Project in the high-altitude cold region, focusing on the effects of transverse joint setting and surface thermal insulation. The results demonstrate that setting a transverse joint can effectively control the scope of high tensile stress area, and reduce the maximum principal stress by about 0.8 MPa. Surface insulation measures can effectively reduce the temperature fluctuation of the surface concrete and reduce the maximum principal stress by about 0.6 MPa. As a result, Yebatan end dam can satisfy the temperature control requirements by setting a transverse joint and adopting surface thermal insulation measures.

**Key words:** rock-filled concrete (RFC) dam; thermal stress; transverse joint; surface thermal insulation; high-altitude cold region

## 1 研究背景

堆石混凝土技术是21世纪中国原创的新型大体积混凝土技术<sup>[1-2]</sup>。该技术利用高自密实性能混凝土流动填充超大粒径堆石(300~1000 mm)空隙, 形成坚固密实的混凝土。与常态混凝土相比, 该技术具备水泥用量少、水化热温升低、无需振捣碾压等

优势, 已运用于上百座大坝工程<sup>[3-6]</sup>。由于堆石混凝土具有良好的热学性质, 堆石混凝土坝施工中通常只采取简易温控措施甚至不采取温控措施<sup>[7-9]</sup>, 节省了大量人力、物力和财力。如今堆石混凝土坝建设正朝着高坝、不分缝的方向发展<sup>[10]</sup>, 坝体内部温度、应力分布规律方面的研究尚不完善。

高寒高海拔地区气温低且温差幅度大, 相较气

收稿日期: 2023-10-01; 修回日期: 2023-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52192672、52192675、52039005、52339007); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2021-KY-04、2022-KY-01)

作者简介: 赵厚然(1999—), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 研究方向为堆石混凝土材料与结构。

通讯作者: 金峰(1966—), 男, 贵州遵义人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水工结构。

候温和地区,大坝温度应力问题更为严峻。在无温控措施情况下,坝体内部混凝土高温持续时间长,如遇冬季寒潮来临,由于混凝土坝内、外温度梯度较大,坝体容易出现裂缝,影响大坝运行安全<sup>[11-12]</sup>。目前,高寒高海拔地区修建的堆石混凝土重力坝仅有满坪、晓龙沟、曲卜藏、金桥等4座,工程经验不足,需深入开展温度应力分析以阐明大坝受力机理。Zhang等<sup>[13]</sup>编制了混凝土坝温度应力场计算程序,并针对金桥水库典型剖面探究了保温层的温控效果程度。张媛媛<sup>[14]</sup>对满坪水库泄流底孔坝段温度应力及不同温控措施的温度应力情况开展研究,提出了简单易行的温控措施。刘强等<sup>[15]</sup>针对叶巴滩二道坝典型坝段探究了不同坝宽、不同表面保温措施对坝体温度应力的影响。

由于现有的研究大多是从施工期的温控角度出发开展的,而对如何从结构设计角度控制坝体温度应力的研究相对较少;此外,考虑全坝段的温度仿真模拟研究也鲜见报道,目前的研究方法难以全方位评价高寒高海拔地区堆石混凝土坝的温度应力真实情况。

本文依托叶巴滩堆石混凝土二道坝工程,以堆石混凝土重力坝三维整体为分析对象,考虑坝体实际浇筑方案和混凝土分区特性,从设计和施工两个角度,综合研究结构分缝措施和表面保温措施对大坝温度应力的影响规律,以期二道坝工程建设提供技术支持。

## 2 工程概况

叶巴滩水电站位于四川省与西藏自治区交界的金沙江上,平均海拔约3 000 m。主坝为常态混凝土双曲拱坝,泄洪消能采用全坝身泄洪、坝后水垫塘及二道坝集中消能的方案<sup>[16]</sup>。二道坝为堆石混凝土

重力坝,结构布置如图1,坝顶高程为2 730 m,最大坝高45 m,坝顶总长109 m。

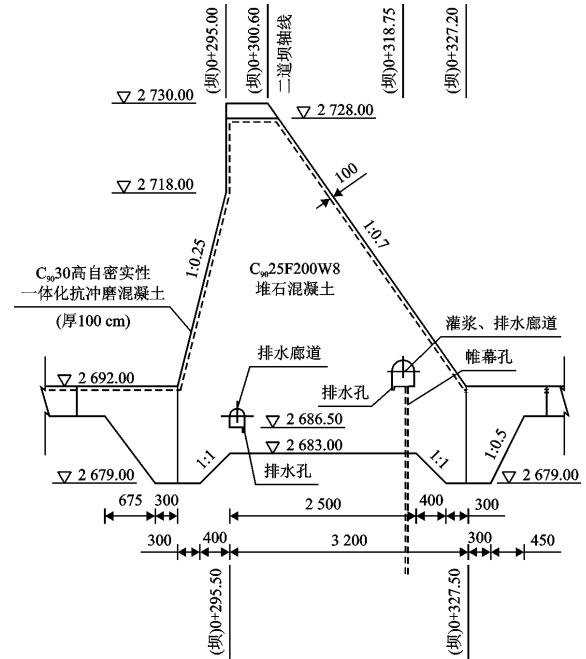


图1 叶巴滩堆石混凝土二道坝结构布置图(单位:cm)

二道坝主体采用90 d强度等级为C25(记为C<sub>90</sub>25)的堆石混凝土,上、下游表面设置1 m厚C<sub>90</sub>30W8F200高自密性一体化抗冲磨混凝土作为防渗层,兼做抗冲耐磨混凝土,河床和岸坡基础采用C<sub>90</sub>25自密实混凝土一体化浇筑。

坝址区各月月均气温如表1所示。根据实测资料,按照朱伯芳<sup>[17]</sup>的研究成果,拟定坝址区水温变化规律见公式(1)。

$$T(y, m) = 9e^{-0.01y} + 7.15e^{-0.025y} \cos \frac{\pi}{6}(m - 9.15 + 1.3e^{-0.085y}) \quad (1)$$

式中:  $y$  为水深,  $m$ ;  $m$  为月份;  $T(y, m)$  为水温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

表1 叶巴滩堆石混凝土二道坝坝址区月均气温

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温/ $^{\circ}\text{C}$	0.4	4.2	6.5	9.2	13.7	16.6	17.0	16.1	13.6	8.9	4.0	0.1

## 3 仿真分析模型

### 3.1 有限元模型与仿真分析方法

研究选取叶巴滩二道坝全坝开展模拟,以坝轴线为基准,按1.5倍坝高向上下游、左右岸及坝基以下延伸至截断面作为地基模拟范围。建模坐标系为右手系, $Z$ 轴向上为正, $X$ 轴向左岸为正, $Y$ 轴向上游为正。

模型共有单元116 302个,节点124 831个。其中,坝体单元为70 624个,地基单元为45 678个,均为六面体单元。坝体-地基系统有限元模型如图2所示。

考虑到堆石粒径相对坝体尺度较小,可忽略温度应力的非均匀性<sup>[18]</sup>,将堆石混凝土视为均质化材料,采用ABAQUS有限元仿真软件开展温度应力耦合仿真。本次仿真不考虑热辐射对坝体温度应力造

成的影响,仅考虑大气、水等流体与坝体表面的热对流作用以及坝体与地基材料之间的热传导效应,热力学边界条件如图 3 所示。

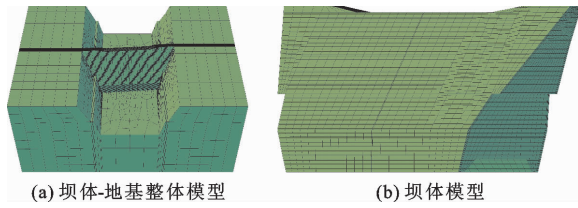
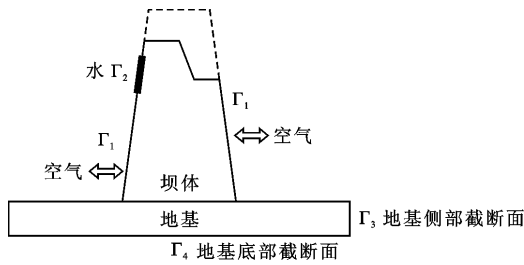


图 2 叶巴滩二道坝有限元模型



Γ<sub>1</sub>:与空气接触的坝体表面,第三类边界条件  
 Γ<sub>2</sub>:与水接触的坝体表面,第三类边界条件  
 Γ<sub>3</sub>:地基侧部截面,第二类边界条件,法向位移约束  
 Γ<sub>4</sub>:地基地部截面,第一类边界条件,三向位移约束

图 3 温度应力仿真边界条件示意图

### 3.2 材料参数

工程方对 C<sub>90</sub>25 高自密实性能混凝土及 C<sub>90</sub>30 抗冲耐磨混凝土开展热力学试验,得到容重、弹模、最终绝热温升等基本材料性能<sup>[15]</sup>,试验未测参数参照其它堆石混凝土工程与相关规范取得<sup>[7,19-22]</sup>,基本材料参数详见表 2。

表 2 坝体与地基材料参数表

材料性能参数	抗冲耐磨高自密实性能混凝土	堆石混凝土	基岩
最终弹性模量 $E_0$ /GPa	35	38.52	11
泊松比 $\mu$	0.167	0.167	0.220
容重 $\gamma$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 400	2 450	2 740
线膨胀系数 $\alpha$ / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$0.7 \times 10^{-5}$	$0.77 \times 10^{-5}$
比热 $c$ /( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	0.96	0.87	0.76
导热系数 $\lambda$ /( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	254.4	302.4	360.0
最终绝热温升 $\theta_0$ / $^{\circ}\text{C}$	39.8	15.7	

研究采用指数型绝热温升模型模拟坝体混凝土发热过程,如公式(2)。

$$\theta(\tau) = \theta_0(1 - e^{-0.27\tau}) \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为混凝土龄期,d; $\theta_0$ 为混凝土最终绝热温升, $^{\circ}\text{C}$ ; $\theta(\tau)$ 为混凝土在某一龄期下的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$ 。

采用指数型弹性模量模型模拟坝体混凝土硬化过程,如公式(3)。

$$E(\tau) = E_0(1 - e^{-0.225\tau}) \quad (3)$$

式中: $\tau$ 为混凝土龄期,d; $E_0$ 为混凝土最终弹性模量,GPa。 $E(\tau)$ 为混凝土在某一龄期下的弹性模量,GPa。

采用复合指数型徐变度模型模拟坝体混凝土徐变过程,如公式(4)。

$$C(t, \tau) = C_0 [ (0.1 + 3\tau^{-0.5})(1 - e^{-0.3(t-\tau)}) + (0.15 + 0.15\tau^{-0.4})(1 - e^{-0.002(t-\tau)}) ] \quad (4)$$

式中: $\tau$ 为混凝土龄期,d; $t - \tau$ 为持荷时间,d; $C_0$ 为混凝土弹性模量倒数,GPa<sup>-1</sup>; $C(t, \tau)$ 为混凝土在龄期  $\tau$  时刻加载至龄期  $t$  时刻的徐变度,GPa<sup>-1</sup>。

根据《混凝土重力坝设计规范》SL 319—2018<sup>[22]</sup>规定,坝体混凝土允许应力控制按照公式(5)进行计算。

$$\sigma \leq \frac{\varepsilon_p E_c}{K_f} \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 为混凝土最大主应力值,MPa; $\varepsilon_p$ 为混凝土极限拉伸值; $E_c$ 为混凝土弹性模量值,MPa; $K_f$ 为安全系数,取为 1.5。

参照类似工程<sup>[19-20]</sup>,确定堆石混凝土与抗冲耐磨高自密实性能混凝土分别在 3、7、28、90、360 d 特征龄期下的允许拉伸值,并利用公式(3)与公式(5)计算得到各龄期下材料徐变度以及允许拉应力值。在此基础上,采用指数型函数进行拟合,最终得到符合本工程设计的堆石混凝土、抗冲耐磨混凝土允许应力发展曲线,如公式(6)~(7)所示。

$$\sigma_{\text{RFC}} = -2.77e^{-0.048\tau} + 2.77 \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{SCC}} = -3.36e^{-0.048\tau} + 3.36 \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\text{RFC}}$ 为堆石混凝土允许应力值,MPa; $\sigma_{\text{SCC}}$ 为自密实混凝土允许应力值,MPa; $\tau$ 为混凝土加载时的龄期,d。

### 3.3 计算工况与施工计划

本文从结构设计、施工措施两方面着手,研究不同温控手段对坝体温度应力的影响,分 3 种工况进行计算。

(1)全坝段不分缝,在秋冬季节对坝体进行表面保温,记为工况 1。

(2)全坝段分 1 条缝,在秋冬季节对坝体进行表面保温,记为工况 2。

(3)全坝段分 1 条缝,不采取任何保温措施,记为工况 3。

其中,未采取表面保温措施时(工况 3),坝体表面散热系数参考刘强等<sup>[15]</sup>的研究设置为 1 165.2 kJ/(m<sup>2</sup>·d· $^{\circ}\text{C}$ );采取表面保温措施时(工况 1 和 2),依据设计方要求,将坝体表面散热系数控制为

129.6 kJ/(m<sup>2</sup>·d·℃)。

根据工程施工计划,拟定坝体施工、运行期进度如下:2023年12月至2024年12月进行坝体主体混凝土浇筑;之后计算库水影响,设定水库从2026年2月初开始蓄水,在2026年3月中旬达到上游高水位、下游无水的情况,该状态持续1年至2027年3月中旬。此后水库开始泄水,在2027年6月中旬达到下游高水位、上游无水的情况,持续1年至2028年6月中旬。根据工程经验,混凝土入仓温度取为当日大气温度加2~6℃<sup>[7]</sup>,在计算中,3种工况的计算工期和混凝土浇筑温度保持一致。

## 4 结果与分析

### 4.1 温度场仿真结果

根据仿真模拟结果,计算得到坝体在施工期、运

行期过程中各节点温度变化情况。分别绘制大坝表面区域(下游面)、内部区域(图4)全时段温度最大值等值线图(图5)。

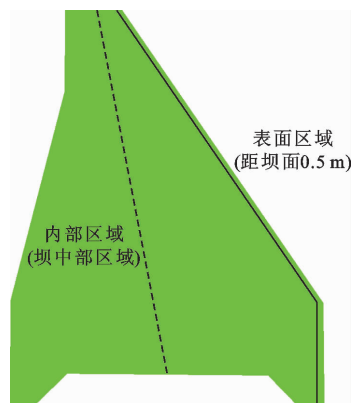


图4 大坝表面区域、内部区域具体位置

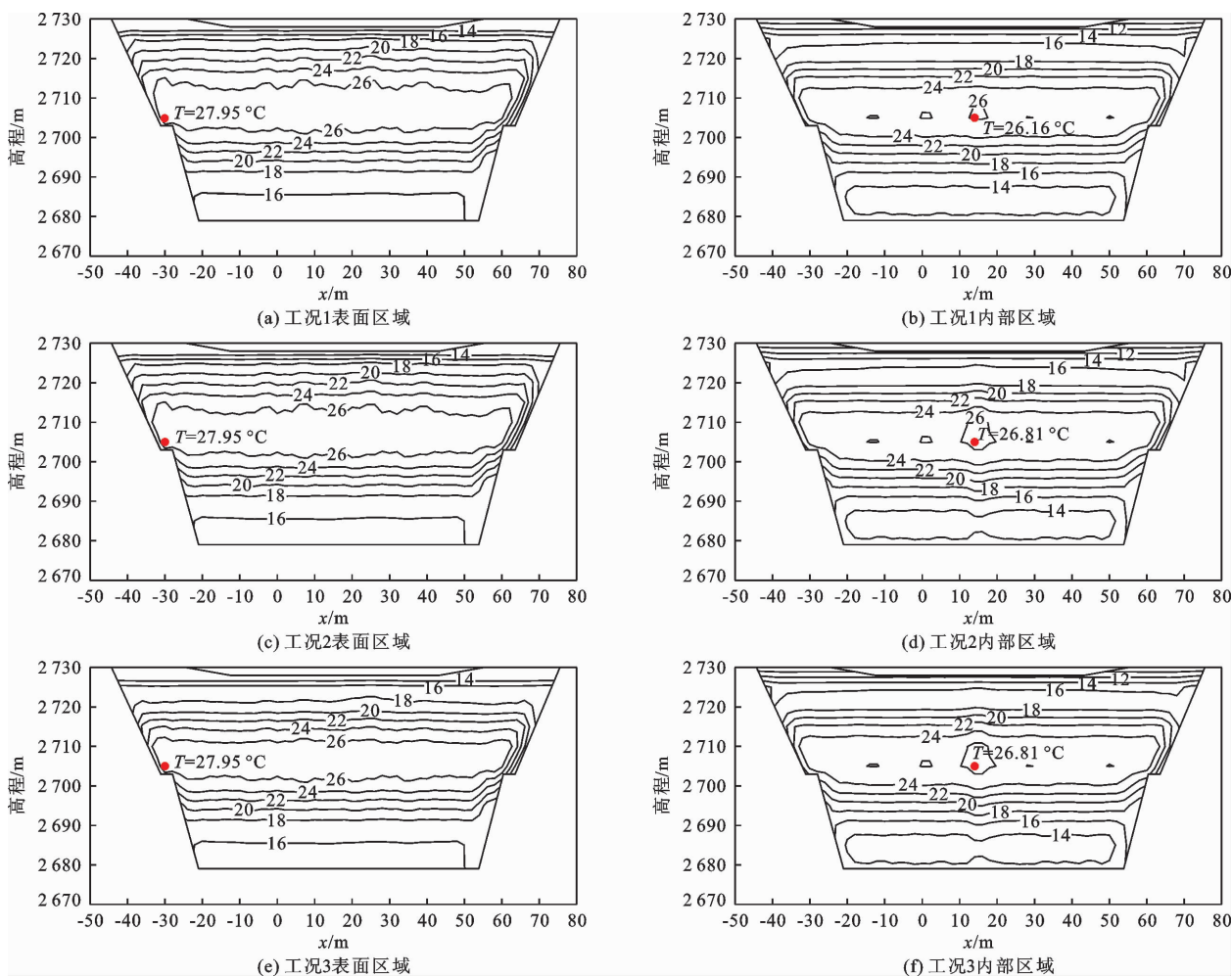


图5 不同工况条件下坝体最高温度等值线图(单位:℃)

对图4、5作以下几点分析。

(1) 设置横缝并不会改变各材料的热力学性质与温度边界条件,因此,对坝体混凝土的温度分布规

律影响很小;保温材料保护坝体使其在低温季节时避免出现显著的温降,而大坝的最高温度主要发生在浇筑期,由混凝土水化热温升引起。因此,3种工



况温度最大值等值线图基本保持一致。

(2)坝体最高温度与混凝土的浇筑季节和入仓温度联系紧密。各计算工况,最高温度均出现在高程2 705~2 710 m区域,该区域混凝土浇筑时间为2024年6—7月,是气温最高的季节,相应的混凝土入仓温度在整个浇筑计划中处于最高值(18~19℃)。沿坝厚方向,坝体表面区域采用自密实混凝土材料,水化热温升较高,温度极值达到28℃;坝体内部采用堆石混凝土材料,水化热温升较低,温度极值为26℃。

分别在坝体表面和内部选取温度极值特征点A点和B点(均位于2 705 m高程坝肩区域)。观察特征点所处位置(图6)的坝体温度发展过程,绘制不同工况的对比曲线(图7)。

(1)设置保温措施后,坝体表面温度波动变小。观察表层特征点在无库水运行期的温度变化情况,工况3比工况2最低温度约高5℃,而最高温度约低1℃。表面保温措施对坝体内部温度变化的影响较小,因此各工况内部特征点的温度发展过程曲线

相差很小。

(2)表层混凝土在入仓之后温度很快变得与气温相同,且这一趋势一直持续至蓄水之前。蓄水或泄洪后,在水位之下的混凝土温度变化与水温一致,滞后于当地气温且变化幅度相对气温而言更小;而内部混凝土受散热条件限制,温度下降比较缓慢,要经过2~3 a后温度场才逐步趋于稳定。

(3)堆石混凝土区域的水化热温升最高约为9℃,抗冲耐磨混凝土区域水化热温升最高约为15℃,均低于绝热温升值。该结果与2022年11—12月叶巴滩工地现场浇筑试验仓的温度监测数据变化规律基本一致,表明本文模拟结果具有可靠性<sup>[15]</sup>。

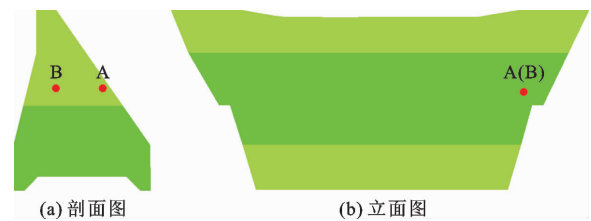


图6 温度特征点位置分布

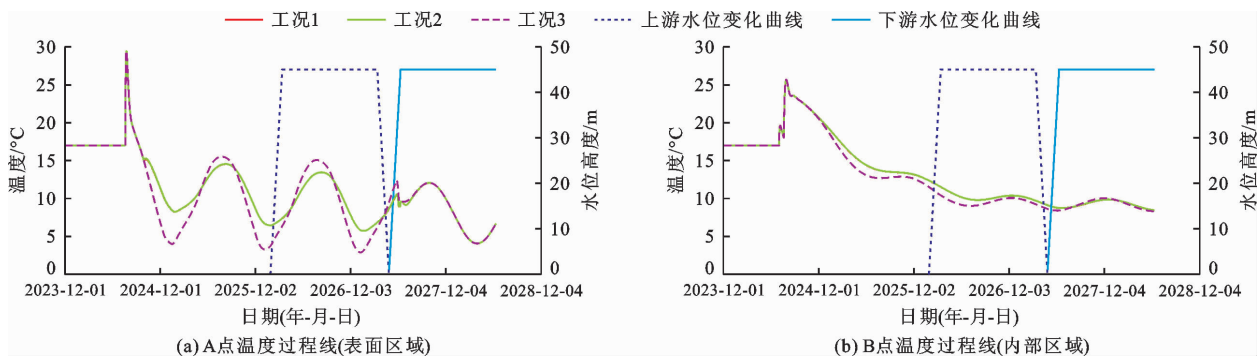


图7 不同工况条件下坝体温度特征点过程曲线

#### 4.2 应力场仿真结果

对整体大坝进行施工期和运行期的应力仿真分析,计算整个施工浇筑期、竣工后、蓄水期间以及运行期水位变化等荷载条件下坝体的大主应力变化情况。图8为不同工况条件下坝体的全过程大主应力极值等值线图,在所有结果中,拉应力为正,压应力为负。由图8结果对比可知,各工况坝体应力分布规律类似,但应力极值存在差异。

(1)整体而言,工况2的大坝总体应力水平比工况1显著降低,说明通过设置横缝,显著释放了坝体拉应力,从而改善了结构受力状态。具体来看,工况2的表层防冲耐磨混凝土和内部堆石混凝土的大主应力极值分别为3.25和1.65 MPa,均低于工况1的4.04和2.20 MPa,表面区域拉应力改善约0.8

MPa,坝体内部区域拉应力改善约0.6 MPa。

(2)大坝内部采用堆石混凝土材料,水化热温升低,施工运行期的全过程大主应力极值水平相对较低;而表层混凝土材料采用的是自密实混凝土材料,水化热温升高,且受环境温度和表面散热条件影响大,其拉应力水平也相对更高。具体来看,工况1和工况2的内部堆石混凝土极值拉应力分别为2.20和1.65 MPa,表层混凝土极值拉应力则分别为4.04和3.25 MPa,后者拉应力水平高出约1.6 MPa。

(3)设置横缝并采取保温措施(工况2)后,坝体表面温度变化梯度显著降低,表层混凝土拉应力状况从而得到了改善。具体来看,工况3的表层混凝土极值拉应力由3.87 MPa降至工况2的3.25 MPa,下降约0.6 MPa。但内部混凝土极值应力变化

幅度很小,由工况3的1.79 MPa降至工况2的1.65 MPa,下降约0.1 MPa,这说明表面保温措施对内部混凝土应力改善不明显。

(4)综合3种工况的坝体应力状况可知,无论表面区域还是内部区域,各工况极值拉应力均出现

在2710 m高程的坝肩部位。此区域的混凝土浇筑时间为5—7月,环境气温较高,施工期混凝土温升幅度较大,而随着气温下降,混凝土在发生温降的同时受到坝基的强烈约束,从而极易产生高拉应力,值得关注。

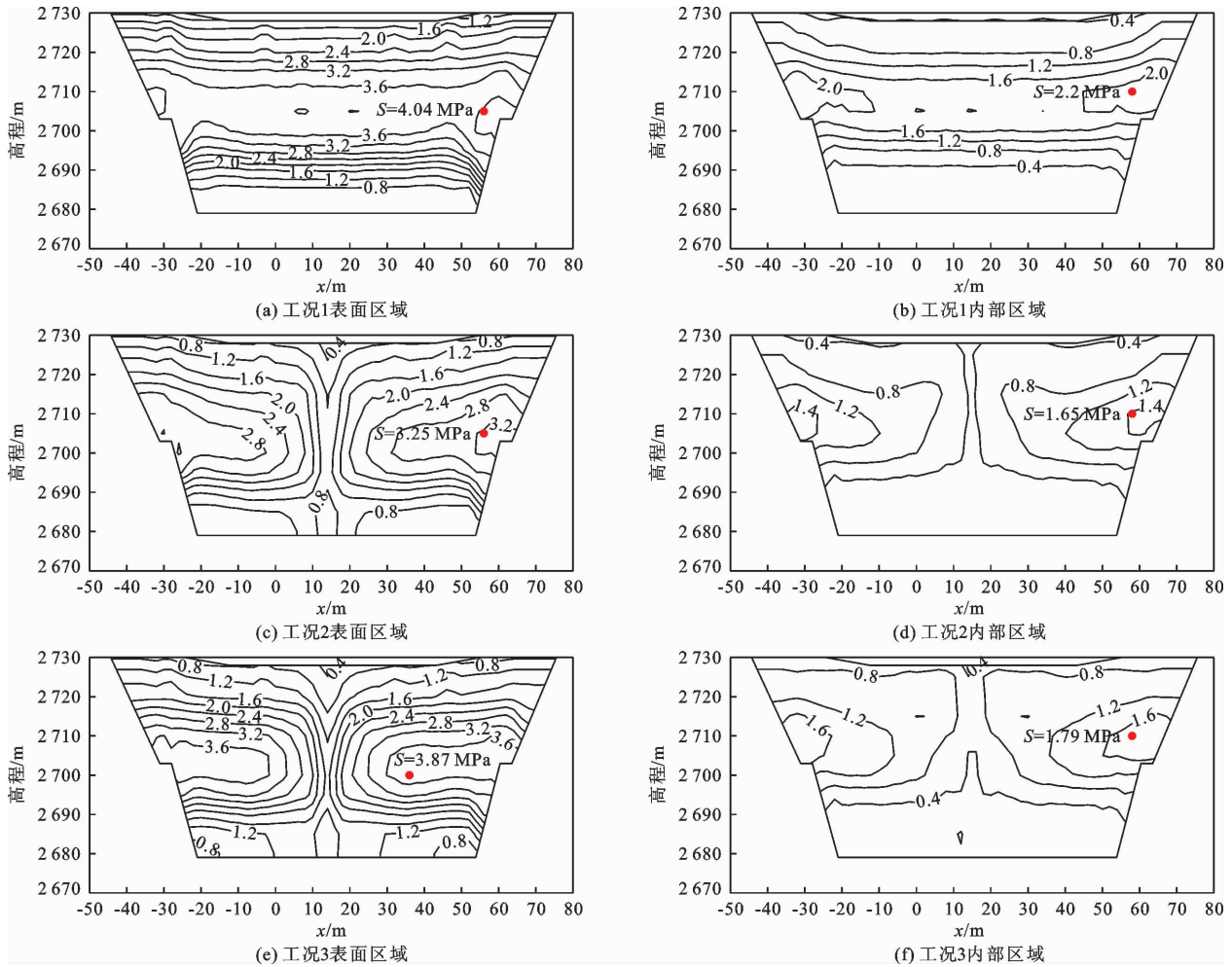


图8 不同工况条件下坝体的全过程大主应力极值等值线图

在各工况表面区域、内部区域分别选取大主应力水平较高的特征点A与B点(图9)(位于2705 m高程的坝肩区域)进行分析,并给出各特征点位置分布及随时间变化曲线如图10所示。由图10可得出以下结论。

(1)根据坝体拉应力发展过程曲线及其与不同龄期允许应力对比可知,对于坝体内部堆石混凝土,三种工况在施工和运行期全过程均处于设计标准范围内;但在施工和运行期的某些时段,工况1与工况3的表层混凝土拉应力水平超过设计标准,而工况2的应力水平始终处于标准值内。这说明,大坝设置横缝与采取表面保温措施均能对坝体拉应力改善起到关键性作用。

(2)加入水荷载后,大坝拉应力水平出现一定程度的上升。坝体开裂最危险的情况发生在上游高水位、下游无水工况下的温降期和上游无水、下游高水位工况下的温降期。两者均会使坝体表面应力略有提高,大约提升0.2 MPa,对坝体内部混凝土应力则影响不大。

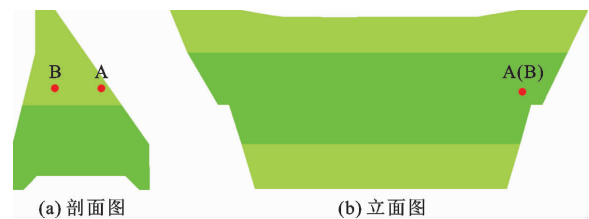


图9 大主应力特征点位置分布

### 4.3 讨论

本文针对高寒高海拔地区堆石混凝土坝开展温度应力仿真分析,计算对比坝体各温控措施、各时段下的温度场和应力场变化情况,为堆石混凝土坝建设提供技术支撑。研究表明采取表面保温措施能显著降低表面温度变化梯度,从而有效降低表面混凝土拉应力值,但对内部堆石混凝土的拉应力值影响不大。这一结论与 Zhang 等<sup>[13]</sup>的数值模拟结果一致。

采取结构分缝措施可有效降低坝体拉应力水平,改善结构受力状态。何涛洪等<sup>[23]</sup>针对气候温和地区的堆石混凝土拱坝整体浇筑方案开展研究,研究结果说明横缝可有效释放坝体拱向应力分布情况,对防渗层区域应力改善较为明显,这与本文结论相互印证。

本模拟并未考虑日温差、寒潮等极端条件对坝体温度应力变化的影响,可待进一步开展深入研究。

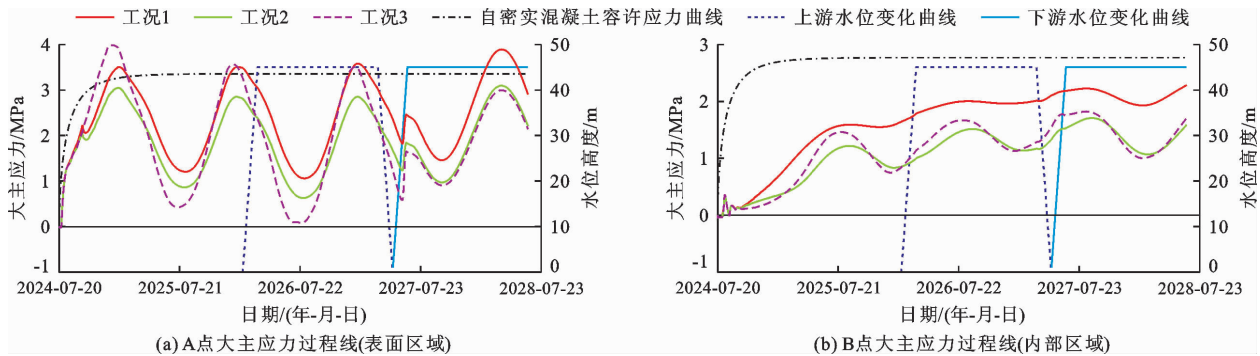


图10 不同工况条件下坝体大主应力特征点过程曲线

## 5 结论

本文依托叶巴滩堆石混凝土二道坝工程开展仿真分析,研究了高寒高海拔地区堆石混凝土重力坝全坝段温度应力分布规律。从结构分缝、表面保温两种不同温控思路出发,对坝体温度场、应力场进行对比分析。

(1) 结构分缝对坝体温度场影响很小,但能够有效释放坝体整体拉应力,可使坝体表面区域应力水平下降约0.8 MPa,坝体内部区域应力水平下降约0.6 MPa,效果显著。

(2) 表面保温措施不会影响施工期坝体的最高温度,但可显著控制低温季节时大坝表层的温降幅度,从而有效改善表层防冲耐磨混凝土的拉应力状况,可使拉应力水平下降约0.6 MPa;表面保温措施对坝体内部混凝土拉应力水平影响较小。

(3) 综合本文研究成果可知,叶巴滩堆石混凝土二道坝采取设置1条横缝并采取表面保温措施的设计方案,可使施工与运行期大坝应力极值满足设计要求。

(4) 按照拟定的施工方案,整个大坝的温度最高值和拉应力极值均出现在高程2 705~2 710 m的大坝坝肩区域,此区域需重点关注。

### 参考文献:

[1] 金峰,安雪晖,石建军,等. 堆石混凝土及堆石混凝土大

坝[J]. 水利学报,2005,36(11):1347-1352.

- [2] JIN Feng, HUANG Duruo. Rock-filled concrete dam[M]. Springer, 2022.
- [3] JIN Feng, ZHOU Hu, AN Xuehui. Research on rock-filled concrete dam[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 17: 495-500.
- [4] ZHANG Xiaofei, LIU Qian, ZHANG Xin, et al. A study on adiabatic temperature rise test and temperature stress simulation of rock-fill concrete[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 10: 1-12. DOI: 10.1155/2018/3964926.
- [5] WANG Bohao, JIN Feng, ZHOU Hu, et al. Pilot study on vibrated rock-filled concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2019, 17(10): 559-570.
- [6] 金峰,周虎,李玲玉,等. 堆石混凝土系列技术在西部水电工程中的应用[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(1):16-22.
- [7] 金峰,张国新,张全意. 绿塘堆石混凝土拱坝施工期温度分析[J]. 水利学报,2020,51(6):749-756.
- [8] 程恒,周秋景,娄诗建,等. 石坝水库堆石混凝土重力坝施工期工作性态仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(9):1408-1416.
- [9] 曾旭,姚国专,余舜尧,等. 堆石混凝土拱坝施工期温度监测与分析[J]. 水力发电,2022,48(2):73-80.
- [10] 徐小蓉,金峰,周虎,等. 堆石混凝土筑坝技术发展与创新综述[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):1-11.

(下转第182页)

- 究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [15] 郭涛, 桂博, 徐李辉, 等. 基于 P-D- $\epsilon$  特性的重力坝主余震损伤累积分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2022, 42(4): 710-717 + 825-826.
- [16] 翟亚飞, 毕仲辉, 唐彧杰, 等. 基于 NGA 模型的主余震序列作用下重力坝损伤破坏研究[J]. 水利学报, 2020, 51(2): 152-157 + 168.
- [17] XU Qiang, ZHANG Tianran, CHEN Jianyun, et al. A new endurance time analysis method for damage evaluation of high arch dams under the oblique incidence of mainshock - aftershock seismic sequences by wavelet decomposition[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 161: 107406.
- [18] PANG Rui, XU Bin, ZHOU Yang, et al. Fragility analysis of high CFRDs subjected to mainshock - aftershock sequences based on plastic failure[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110152.
- [19] XU Shutong, XU Qiang, CHEN Jianyun, et al. Seismic performance analysis of gravity dam system under arbitrary oblique incidence of near-fault SV ground motions[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(12): 04022240.
- [20] CHEN Denghong, PAN Ziyue, ZHAO Yiyuan. Seismic damage characteristics of high arch dams under oblique incidence of SV waves[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 152: 107445.
- [21] 庞鑫宇. 主余震序列斜输入作用下水电站厂房非线性地震响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [22] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [23] 章小龙, 李小军, 陈国兴, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126-1135.
- [24] 张梁, 朱海涛, 梁建文, 等. 基于黏弹性边界的 P 波斜入射波场分解方法精度比较[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 177-186.
- [25] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457.
- [26] 宋志强, 刘琳, 王飞, 等. 近断层 P 波斜入射下沥青混凝土心墙坝响应分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 245-253.
- [27] WANG Gaohui, WANG Yongxiang, LU Wenbo, et al. Damage demand assessment of mainshock-damaged concrete gravity dams subjected to aftershocks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 98: 141-154.
- [28] 马智勇. 基于损伤和位移的重力坝地震易损性分析研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [29] 苑举卫, 杜成斌, 刘志明. 地震波斜入射条件下重力坝动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 120-126.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

(上接第 173 页)

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Yuxiang, PAN Jianwen, SUN Xinjian, et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions[J]. Engineering Structures, 2021, 230: 111721.
- [14] 张媛媛. 堆石混凝土重力坝温度应力仿真分析及温控措施研究[J]. 陕西水利, 2022(4): 32-35.
- [15] 刘强, 赵厚然, 姬广祥, 等. 高海拔高寒地区堆石混凝土坝温度应力仿真分析与温度监测[J]. 混凝土, 2023(6): 26-32 + 39.
- [16] 尤林, 张冲, 庞明亮. 叶巴滩拱坝建基面选择及体形设计[J]. 水电站设计, 2019, 35(2): 7-12.
- [17] 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.
- [18] 徐小蓉, 肖安瑞, 梁婷, 等. 考虑分层填充的非均质堆石混凝土温度研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(3): 141-152.
- [19] 赵运天. 堆石混凝土拱坝施工期温度应力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [20] 程恒, 周秋景, 姜诗建, 等. 石坝河水库堆石混凝土重力坝施工期工作性态仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(9): 1408-1416.
- [21] 国家能源局. 堆石混凝土筑坝技术导则: NB/T 10077—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [22] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范: SL 319—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [23] 何涛洪, 徐小蓉, 雷峥琦, 等. 绿塘整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度仿真研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/10.1746.TV.20230721.1211.006.html>