

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.01.026

寒潮条件对三河口碾压混凝土拱坝 温度应力的影响研究

程汉鼎, 赵玮, 白雪

(陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710001)

摘要: 为研究寒潮条件对三河口碾压混凝土拱坝温度应力的影响, 基于实测数据反演分析所得热力学参数, 采用有限单元法进行坝体在寒潮条件下的应力仿真计算。结果表明: 当遭遇1 d降温5°C寒潮时, 坝体最大拉应力由2.56 MPa大幅增加到3.74 MPa, 拉应力值远超混凝土允许抗拉强度; 典型坝段压应力无明显变化, 拉应力最大值由1.64 MPa增加到3.41 MPa。通过分析5种不同寒潮历时和降幅对于拱坝应力分布的影响, 降温幅度越高、寒潮历时越长, 温度应力的最大值越大。

关键词: 寒潮; 碾压混凝土拱坝; 三河口; 温度应力; 影响研究

中图分类号: TV642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)01-0192-08

Impacts of Cold Wave on Temperature Stress of Sanhekou RCC Arch Dam

CHENG Handing, ZHAO Wei, BAI Xue

(Shaanxi Province Institute of Water Resource and Electric Power Investigation and
Design(Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: To study the influence of cold wave conditions on the temperature stress of the Sanhekou roller-compacted concrete arch dam, based on the thermodynamic parameters obtained from the back analysis of measured data, the finite element method was used to analyze the stress effects on the dam under cold wave weather. The results show that when experiencing a cold wave (temperature decreasing rate of 5°C per day), the maximum tensile stress of the dam increased from 2.56 MPa to 3.74 MPa. The value of the tensile stress far exceeded the allowable tensile strength of the concrete. There was no significant change in the compressive stress of a typical dam section, and the maximum value of the tensile stress increased from 1.64 MPa to 3.41 MPa. By analyzing the effects of five different cold wave durations and cooling amplitudes on the distribution of stresses in the arch dam, it can be concluded that the maximum value of temperature stress increases with both higher cooling amplitude and longer the cold wave duration.

Keywords: cold wave; roller compacted concrete arch dam; Sanhekou; temperature stress; influence research

混凝土坝温度控制的关键是控制坝体混凝土内部的温度梯度, 即坝块内部温度与表面温度之差^[1-2]。碾压混凝土坝在施工期, 由于水化反应释放的热量使坝体内部温度远高于外界气温, 混凝土强度尚未充分发挥, 寒潮引起的温降会使坝体表面拉应力迅速增大, 增加了坝体产生裂缝的可能性, 国内众多学者对寒潮条件下碾压混凝土坝温度应力计

算和影响进行了研究。雷丽萍等^[3]分析了高寒地区高拱坝混凝土施工期温度应力的实际变化规律和裂缝成因; 周人飞等^[4]、朱岳明等^[5]研究了浇筑长间歇、寒潮冷击等因素对混凝土温度应力特性及开裂的影响; Li等^[6]、何劲等^[7]开展了寒潮条件下碾压混凝土坝温度应力的分布规律和影响分析研究; 张晓飞等^[8]研究了寒潮和表面保温措施对坝体温

收稿日期: 2024-10-13

修稿日期: 2024-11-19

基金项目: 陕西省水利科技计划项目“碾压混凝土大坝温控防裂与施工质量控制研究”(2012-30)

作者简介: 程汉鼎(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事水利水电工程设计与研究工作。E-mail: 15465586@qq.com

度场和应力场的影响;马刚等^[9]采用自适应遗传算法反演的绝热温升参数,进行了碾压混凝土拱坝施工期温度场仿真分析;黄爱国^[10]论证了寒潮影响下混凝土热传导解算方法及表面温度计算公式的普遍性。大量研究成果和工程经验表明,温度骤降在坝体内部引起的温差会对大坝产生不利影响,昼夜温差和寒潮等短周期温度荷载产生的冷击应力,使混凝土的拉应力超限而形成表面裂缝,影响坝体混凝土质量、耐久性和结构安全。

本文考虑了混凝土水化热、弹性模量、自生体积变化及徐变等主要参数,根据施工进度、坝体混凝土分层浇筑方式、入仓温度、浇筑厚度及施工间歇等,基于反演分析确定的绝热温升和系数等热力学参数,采用有限单元法进行寒潮冷击时坝体混凝土应力场的仿真计算。并分析寒潮降幅和历时对坝体应力的影响,分析结果可为碾压混凝土大坝施工期温度控制提供参考。

1 基本方程

1.1 温度应力计算

坝体混凝土从最高温度到建成后稳定温度的温度变化过程和温差,可以用有限单元方法来计算温度应力。根据热量平衡原理,考虑温差、徐变和自生体积变形等影响,故任一时段应力计算平衡方程为^[11]:

$$[K][\Delta\delta_n] = \{\Delta P_n\} + \{\Delta P_n\}^C + \{\Delta P_n\}^T \quad (1)$$

式中:[K]为刚度矩阵; [$\Delta\delta_n$]为节点位移增量; $\{\Delta P_n\}$ 、 $\{\Delta P_n\}^C$ 、 $\{\Delta P_n\}^T$ 为自身体积变形、徐变和温差引起的荷载增量。

由式(1)求得位移增量 [$\Delta\delta_n$] 后,代入应力-应变增量关系公式得到各节点应力增量 [$\Delta\sigma_i$],再将

其各时段累加,即为节点应力。

1.2 寒潮降温过程计算

寒潮历时虽短,对拱坝坝体温度场影响显著。混凝土表面的热流密度与混凝土表面温度和外界气温之差成正比例关系,在仿真计算中寒潮温降与温度场关系为^[11-12]:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \quad (2)$$

式中: q 为热流密度, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; λ 为导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; n 为表面外法线方向; h 为表面传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; T 、 T_a 分别为混凝土表面温度和气温, $^\circ\text{C}$ 。

2 工程概况

2.1 拱坝体型结构

三河口碾压混凝土拱坝为抛物线型双曲拱坝,最大坝高 141.5 m,坝顶宽 9 m,拱冠坝底厚 36.6 m;坝顶上游弧长 472.15 m,大坝厚高比 0.26,下游面最大倒悬度 0.19,为国内第二高的碾压混凝土拱坝。坝体材料主要采用 $C_{90}25$ 三级配和 $C_{90}25$ 二级配碾压混凝土,坝体表面采用 $C_{90}25$ 变态混凝土,泄洪表底孔采用 $C_{28}25$ 及 $C_{28}30$ 常态混凝土,共设置 4 条诱导缝和 5 条横缝,坝体分缝详见图 1。碾压混凝土施工以 5#横缝为界分左右岸两个施工区,施工分层主要以 3 m 升层为主,间歇 7 d~10 d,左右岸跳仓浇筑。

2.2 碾压混凝土施工进度

2016 年 11 月 2 日开始浇筑基础垫层常态混凝土,2019 年 9 月 23 日大坝碾压混凝土浇筑至 636 m,2020 年 8 月 20 日浇筑至坝顶高程 646 m。

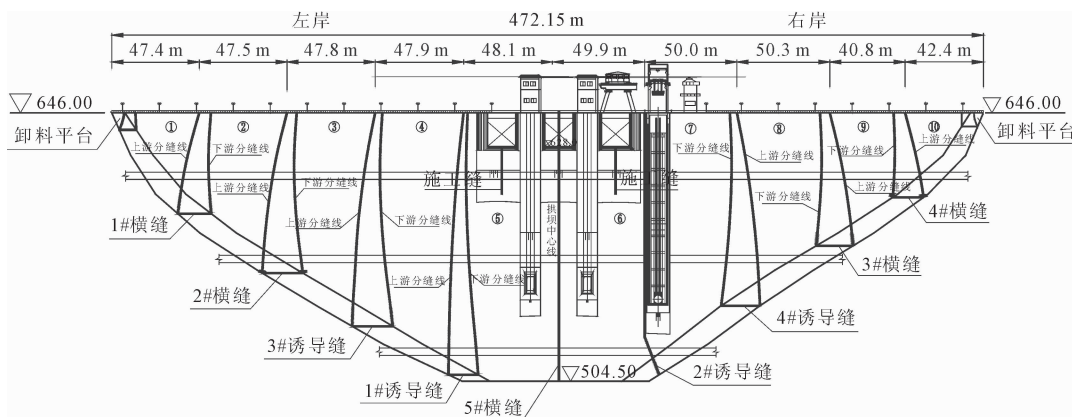


图 1 坝体结构分缝图

2.3 主要温度控制措施

三河口碾压混凝土拱坝采取的温控措施主要为控制浇筑温度和通水冷却,施工期混凝土浇筑温度见表 1,施工期通水冷却分初期、二期和三期进行,通水冷却通水天数、流量、水温等参数见表 2—表 4。

表 1 施工期混凝土浇筑温度表 单位:℃

| 浇筑时间 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 | 2019 年 | 2020 年 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 起始浇筑层 | 1.0 | 7.0 | 36.0 | 59.0 | 97.0 |
| 终止浇筑层 | 6.0 | 35.0 | 58.0 | 96.0 | 111.0 |
| 1 月 | 10.0 | 16.0 | 8.0 | 8.4 | 10.0 |
| 2 月 | 10.0 | 16.0 | 9.2 | 9.8 | 9.0 |
| 3 月 | 10.0 | 16.0 | 10.3 | 11.1 | 8.0 |
| 4 月 | 10.0 | 16.0 | 17.5 | 14.7 | 8.0 |
| 5 月 | 10.0 | 16.0 | 19.0 | 18.5 | 9.5 |
| 6 月 | 10.0 | 16.0 | 19.3 | 19.0 | 16.0 |
| 7 月 | 10.0 | 16.0 | 18.8 | 19.1 | 17.5 |
| 8 月 | 10.0 | 16.0 | 18.1 | 18.5 | 18.0 |
| 9 月 | 10.0 | 16.0 | 18.1 | 17.4 | 18.0 |
| 10 月 | 10.0 | 15.4 | 15.2 | 15.3 | 18.0 |
| 11 月 | 10.0 | 10.0 | 12.3 | 13.6 | 18.0 |
| 12 月 | 8.0 | 8.0 | 9.8 | 12.7 | 18.0 |

表 2 初期通水冷却参数表

| 浇筑层 | 通水天数 | 通水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 通水水温/℃ |
|-------|------|---|--------|
| 1~111 | 20 | 1.5 | 11 |

3 计算模型和材料参数

3.1 计算模型

三河口拱坝温度应力仿真分析采用三维有限元模型,建基面 504.5 m 高程以下基岩厚度约 1.0 倍坝高,坝轴线上、下游侧顺河向范围约 1.5 倍坝高,左、右坝肩横河向范围约 0.5 倍坝高。计算坐标系:顺水流方向为 Y 方向,由上游水平指向下游为正;坝高方向为 Z 方向,铅直向上为正;横河向为 X 方向,沿坝轴线由右岸水平指向左岸。坝体及坝肩(基)岩体均划分为 8 节点等参实体单元,整个计算域共离散为 276 797 节点和 241 437 单元,其中坝体 220 849 个节点、193 329 个单元。计算模型见图 2,坝体材料分区见图 3。

基于大坝浇筑施工过程建立有限元模型,即沿着水平方向将坝体分成若干个浇筑分区和碾压层。计算时将坝体单元按照浇筑顺序,分成若干荷载步依次激活,直至坝顶层浇筑完毕。在计算过程中,随着坝体单元的逐渐激活,相应的自重荷载、由温度场

表 3 二期通水冷却参数表

| 浇筑层 | 开始时间 | 通水流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 通水水温 /℃ | 通水天数 /d |
|--------|------------|---|------------|------------|
| 1~6 | — | — | — | — |
| 7~9 | 2017-10-22 | 1.5 | 14 | 20 |
| 10 | 2017-10-02 | 1.5 | 14 | 40 |
| 11 | 2017-10-22 | 1.5 | 14 | 20 |
| 12~13 | 2017-10-02 | 1.5 | 14 | 40 |
| 14 | 2017-10-22 | 1.5 | 14 | 20 |
| 15 | 2017-10-02 | 1.5 | 14 | 40 |
| 16 | 2017-10-22 | 1.5 | 14 | 20 |
| 17 | 2017-10-02 | 1.5 | 14 | 40 |
| 18 | 2017-10-22 | 1.5 | 14 | 20 |
| 19~22 | 2017-10-02 | 1.5 | 14 | 40 |
| 23~26 | 2017-10-22 | 1.5 | 14 | 20 |
| 27~29 | 2018-09-24 | 1.5 | 14 | 40 |
| 30~39 | — | — | — | — |
| 40~52 | 2018-09-24 | 1.5 | 18 | 70 |
| 53 | 2019-10-06 | 1.5 | 14 | 33 |
| 54~67 | — | — | — | — |
| 68 | 2019-10-06 | 1.5 | 14 | 33 |
| 69 | — | — | — | — |
| 70 | 2019-10-06 | 1.5 | 14 | 33 |
| 71 | — | — | — | — |
| 72~87 | 2019-10-06 | 1.5 | 14 | 33 |
| 88~111 | — | — | — | — |

表 4 三期通水冷却参数表

| 浇筑层 | 开始时间 | 通水流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 通水水温 /℃ | 通水天数 /d |
|--------|------------|---|------------|------------|
| 1~6 | — | — | — | — |
| 7~21 | 2017-11-25 | 1.5 | 8 | 35 |
| 22 | 2018-12-10 | 1.5 | 8 | 30 |
| 23 | 2017-11-25 | 1.5 | 8 | 35 |
| 24~47 | 2018-12-10 | 1.5 | 8 | 30 |
| 48 | 2019-11-20 | 1.5 | 8 | 33 |
| 49 | 2018-12-10 | 1.5 | 8 | 30 |
| 50 | 2019-11-20 | 1.5 | 8 | 33 |
| 51~52 | 2019-11-25 | 1.5 | 8 | 28 |
| 53~71 | 2019-11-20 | 1.5 | 8 | 33 |
| 72 | 2019-11-25 | 1.5 | 8 | 28 |
| 73~74 | 2019-11-20 | 1.5 | 8 | 33 |
| 75 | 2019-11-25 | 1.5 | 8 | 28 |
| 76 | — | — | — | — |
| 77 | 2019-11-25 | 1.5 | 8 | 28 |
| 78 | — | — | — | — |
| 79 | 2019-11-25 | 1.5 | 8 | 28 |
| 80~111 | — | — | — | — |

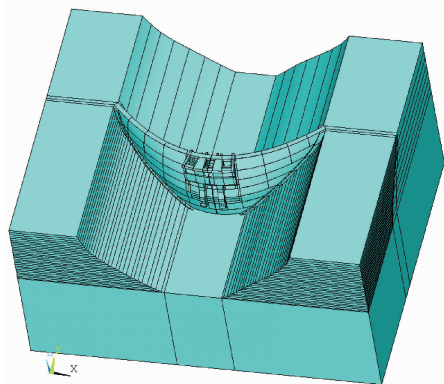


图 2 温控仿真有限元三维计算模型

计算得到的相邻时间步的温度荷载以及大坝上下游的水压力荷载也同时施加,就可以进行大坝从施工工况到运行期全过程的温度场和应力场仿真计算。

3.2 应力控制标准

混凝土浇筑块水平向徐变温度应力采用有限元法,按照施工期混凝土材料热力学参数,计算坝体碾

压混凝土不同龄期允许拉应力值作为应力控制标准:28 d 龄期的允许拉应力值为 1.08 MPa;90 d 龄期的允许拉应力值为 1.41 MPa;180 d 龄期的允许拉应力值为 90 d 强度的 1.1~1.2 倍,约为 1.69 MPa。坝体混凝土热力学参数见表 5。

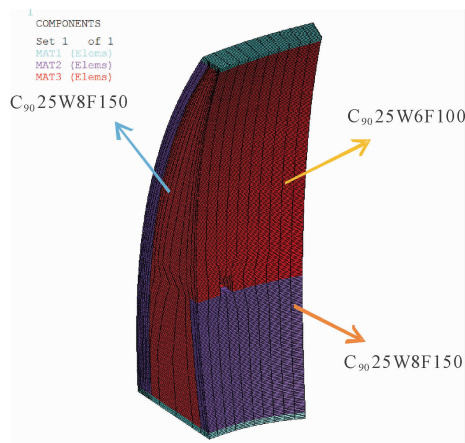


图 3 坝体材料分区示意图

表 5 混凝土热力学参数表

| 混凝土标号 | 比热 /(kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹) | 导温系数 /(m ² · h ⁻¹) | 导热系数 /(kJ · m ⁻¹ · h ⁻¹ · °C ⁻¹) | 表面放热系数 /(kJ · m ⁻² · h ⁻¹ · °C ⁻¹) | 线胀系数 /(10 ⁻⁶ · °C ⁻¹) | 泊松比 |
|--|--|--|---|---|---|-------|
| 三级配碾压混凝土 (C ₉₀ 25W6F100) | 0.977 | 0.002669 | 6.51 | 42 | 9.4 | 0.167 |
| 二级配碾压混凝土 (C ₉₀ 25W8F150) | 0.963 | 0.002758 | 6.39 | 42 | 9.1 | 0.167 |
| 二级配常态混凝土 (C ₂₈ 25W6F150) | 0.971 | 0.002850 | 6.71 | 42 | 9.5 | 0.167 |

3.3 参数反演分析

混凝土热力学参数是温度应力计算的关键,通过试验或经验公式得到的绝热温升与工程实际存在差别。混凝土弹性模量和徐变度等在施工期、蓄水期和运行期随时间变化较大,借助实测温度资料和数值模拟计算对参数进行反演,结合改进的遗传算法快速获得最优混凝土力学参数。基于改进的遗传算法,对三级配(C₉₀25W6F100)及二级配(C₉₀25W8F150)碾压混凝土材料的绝热温升及系数 a 进行反演分析,其目标函数为^[9]:

$$f = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{T_i(T_0, a) - T'_i}{T'_i} \right]^2} \quad (3)$$

式中: T_0 、 a 为待反演的绝热温升参数; $T_i(T_0, a)$ 为第 i 个测点的最高温度计算值; T'_i 为第 i 个测点的最高温度实测值。

混凝土绝热温升参数试验值与反演值见表 6。根据参数反演分析结果,相较于根据试验资料计算得到的绝热温升参数,参数反演结果更加逼近真实情况,参数反演对比见图 4 和图 5。

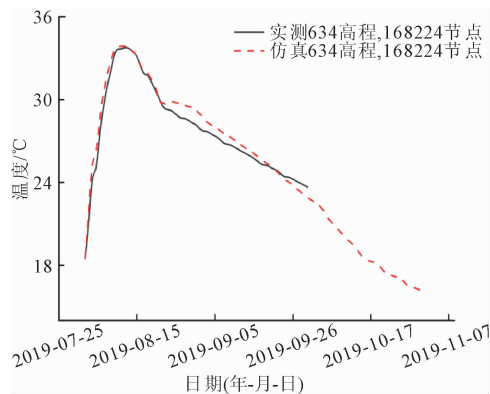


图 4 二级配混凝土参数反演曲线对比结果图

表 6 混凝土绝热温升参数试验值与反演值

| 混凝土种类 | 试验参数 | | 反演参数 | |
|--|--------|-------------|--------|-------------|
| | 绝热温升/℃ | 系数 α | 绝热温升/℃ | 系数 α |
| 三级配碾压混凝土 (C ₉₀ 25W6F100) | 25.45 | 6.52 | 30.58 | 7.94 |
| 二级配碾压混凝土 (C ₉₀ 25W8F150) | 33.01 | 6.57 | 39.49 | 8.32 |

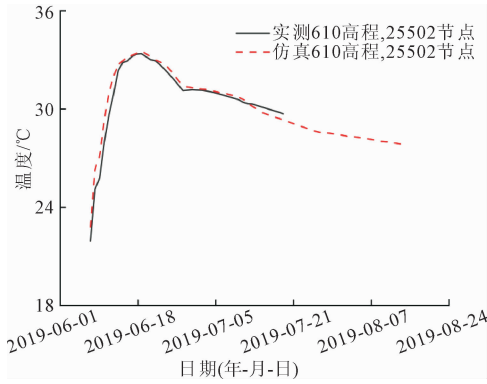


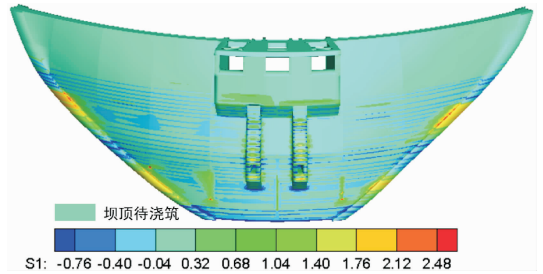
图 5 三级配混凝土参数反演曲线对比结果图

4 寒潮对温度应力影响分析

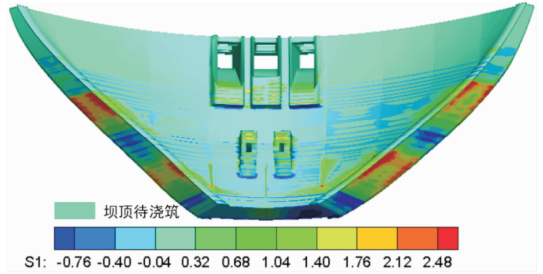
4.1 寒潮前后坝体应力计算分析

根据气象监测数据,三河口碾压混凝土拱坝在 2019 年 6 月与 2019 年 9 月经历了两次强度较大寒潮,分别为 1 d 降温 4℃ 和 1 d 降温 5℃。为了分析寒潮对坝体温度应力的影响,选取施工期 + 寒潮降温工况 1 d 降温 4℃ (第一次寒潮) 和 1 d 降温 5℃ (第二次寒潮) 时,进行寒潮不同历时和不同降幅时拱坝温度应力对比分析。

两次寒潮前后坝体上下游面第一主应力如图 6—图 9 所示。从有限元计算结果来看,大坝经历寒潮后,坝体拉应力上升,压应力无明显变化,坝体拉应力主要出现在建基面。图 6、图 8 分别为第一次和第二次未经历寒潮时坝体主应力,拉应力主要出现在建基面局部范围,近似对称分布在坝体左右两岸,最大拉应力为 2.56 MPa,出现在坝体底部。由图 7 可知,第一次寒潮(1 d 降 4℃)时,坝体最大拉应力由 2.48 MPa 增加到 2.83 MPa,最大值主要分布在建基面,坝甚至 540.00 m 高程坝段相接处也出现小范围集中拉应力区,大坝存在开裂风险;由图 9 可知,历经第二次寒潮(1 d 降 5℃)时,坝体最大拉应力由 2.56 MPa 大幅增加到 3.74 MPa,最大值主要分布在建基面和 602.00 m ~ 645.00 m 高程之间坝体,此时大坝拉应力值远超混凝土允许抗拉强度。不同计算工况时坝体应力最大值及分布情况见表 7。

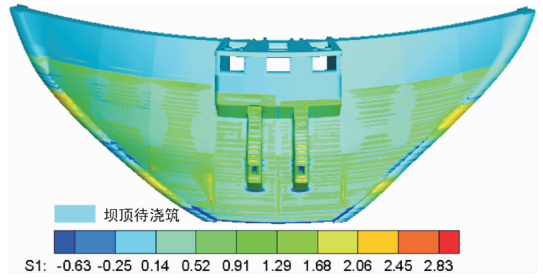


(a) 上游面

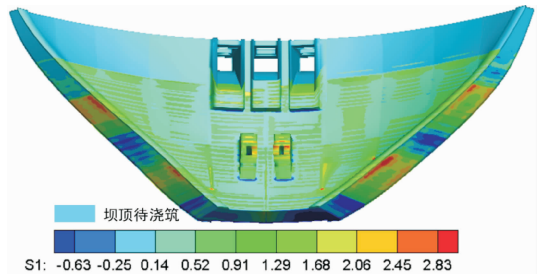


(b) 下游面

图 6 第一次寒潮前坝体上、下游面第一主应力(单位:MPa)



(a) 上游面



(b) 下游面

图 7 第一次寒潮后坝体上、下游面第一主应力(单位:MPa)

表 7 寒潮条件下各工况坝体应力最大值统计表 单位:MPa

| 计算工况 | 第一主应力 | | 第三主应力 | |
|------------------|-------|-----------|-------|------|
| | 最大值 | 发生位置 | 最大值 | 发生位置 |
| 第一次寒潮前~未经历寒潮时 | 2.48 | 坝体左右拱端 | -7.32 | 坝底 |
| 第一次寒潮后~1 d 降温 4℃ | 2.83 | 坝体左右拱端及横缝 | -7.28 | 坝底 |
| 第二次寒潮前~未经历寒潮时 | 2.56 | 坝体左右拱端 | -7.25 | 坝底 |
| 第二次寒潮后~1 d 降温 5℃ | 3.74 | 各坝段中部坝体表面 | -7.32 | 坝底 |

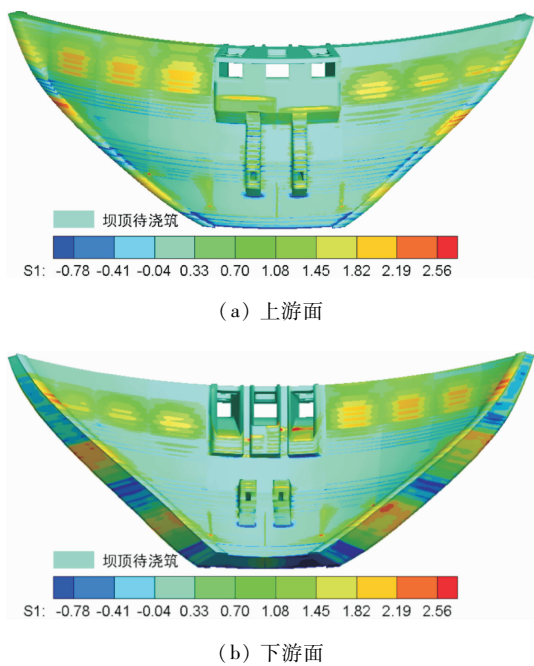


图 8 第二次寒潮前坝体上、下游面第一主应力(单位:MPa)

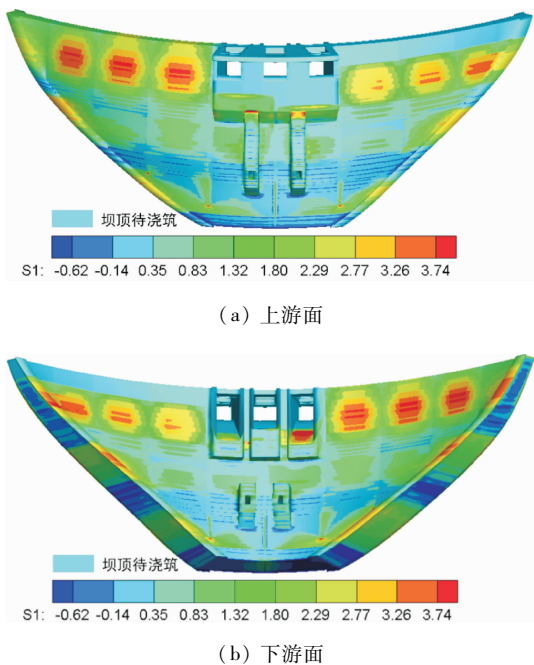


图 9 第二次寒潮后坝体上、下游面第一主应力(单位:MPa)

4.2 典型断面寒潮前后应力计算分析

大坝在经历第二次寒潮后,坝体表面拉应力急剧增加,超出混凝土允许抗拉强度,故选取典型坝段计算未经历寒潮和 1 d 降温 5℃ 时坝体的应力分布。图 10 和图 11 分别给出了经历第二次寒潮前和第二次寒潮后大坝上、下游面第一主应力云图。

由图 10 和图 11 分析可知,气温骤降时(1 d 降温 5℃),典型坝段拉应力显著上升,最大值由 1.64 MPa 增加到 3.41 MPa,上游表面出现大面积高拉应

力区域,远远超出坝体混凝土抗拉强度标准 1.83 MPa。寒潮作用初期,典型坝段外表面拉应力区域扩大,原峰值区域出现裂缝,局部应力释放,拉应力显著减少;随着寒潮继续加剧,内外表面拉应力区域也继续扩大;寒潮末期,裂缝继续扩展,拉应力集中在外表面中部。在整个寒潮过程中,拉应力主要集

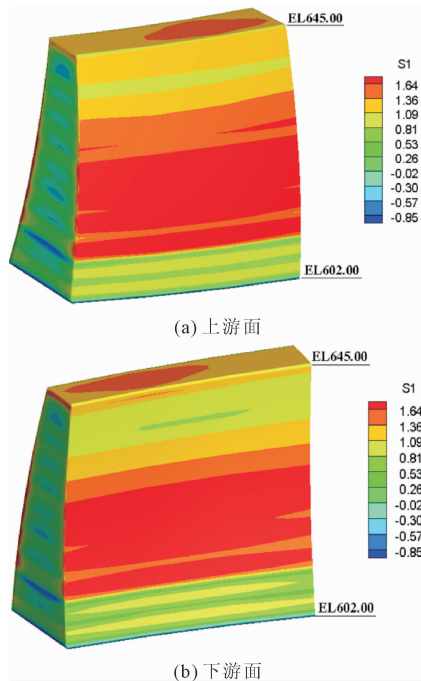


图 10 第二次寒潮前大坝上、下游面第一主应力云图(单位:MPa)

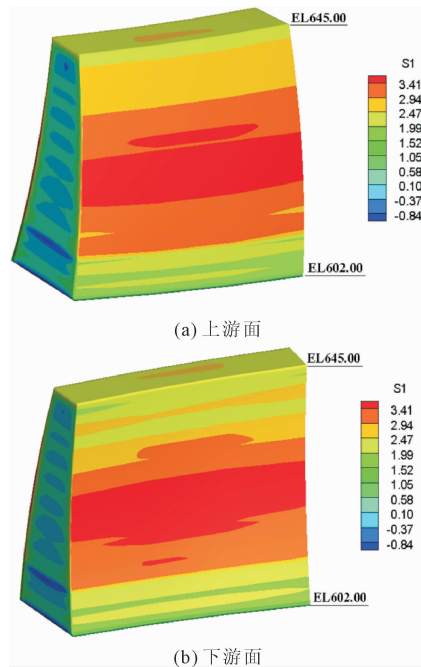


图 11 第二次寒潮后期大坝上、下游面第一主应力云图(单位:MPa)

中在坝体表面,内部拉应力偏低,符合坝体裂缝产生与发展过程。

4.3 寒潮降幅和历时对坝体应力的影响分析

为了研究寒潮冷击对混凝土应力的影响,按照寒潮 3 d 降温 15℃,计算降温幅度浮动 ±20%,降温历时浮动 1 d 的原则,采用 3 d 降温 12℃、3 d 降温 15℃、3 d 降温 18℃、2 d 降温 15℃和 4 d 降温 15℃五种工况分别进行计算分析。工况 1—工况 3 为寒潮降幅对混凝土应力的影响,工况 2、工况 4 和工况 5 为寒潮历时对混凝土应力的影响,不同研究工况及荷载组合见表 8。为研究寒潮对混凝土坝体内外温度应力的影响,选取 610 m 高程混凝土浇筑层距坝体混凝土表面 1 m 和坝体中部特征点进行温度应力分析,计算结果如图 12 和图 13。

表 8 不同工况及荷载组合方式

| 研究工况 | 寒潮降幅 /℃ | 寒潮历时 /d | 寒潮降幅、历时浮动百分比/% | 荷载组合 |
|------|---------|---------|----------------|-------------------------|
| 1 | 12 | 3 | -20.0 | 自重+水压力 +扬压力+ 温度荷载 |
| 2 | 15 | 3 | 0.0 | |
| 3 | 18 | 3 | +20.0 | |
| 4 | 15 | 2 | 0、-33 | |
| 5 | 15 | 4 | 0、+33 | |

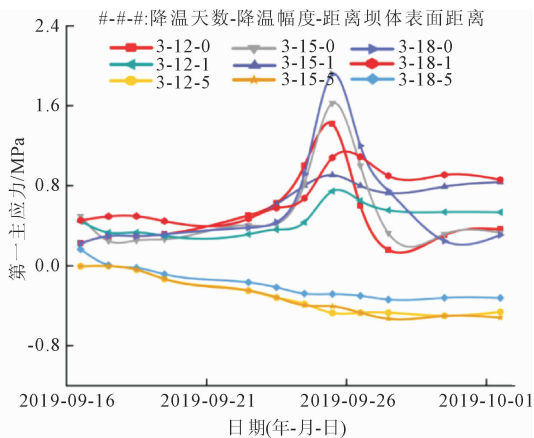


图 12 温度降幅对坝体第一主拉应力值影响

由计算分析可知,工况 1—工况 3 坝体表面混凝土第一主拉应力有明显的升高,且随降温幅度的增大混凝土表面第一主拉应力也随之增大,3 d 降温 18℃时拉应力最大值为 1.90 MPa。工况 2、工况 4 和工况 5 在降温幅度相同时,降温历时越长,坝体表面混凝土第一主拉应力值越高,4 d 降温 15℃拉应力最大值为 1.74 MPa。

5 结论

(1) 通过对三河口拱坝进行经历寒潮时的温

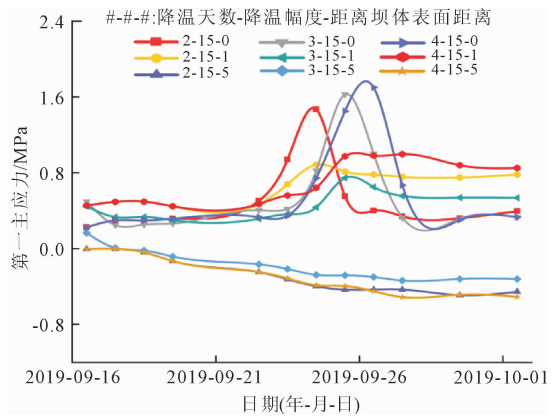


图 13 寒潮历时对坝体第一主拉应力值影响

度应力仿真计算,得到寒潮条件下拱坝坝体和典型坝段的应力分布特点,拉应力主要集中在坝体表面。受寒潮作用影响,坝体表面拉应力值迅速增大,其最大值分布区域与坝体裂缝产生位置基本一致。

(2) 通过五种工况仿真计算分析,认为寒潮对坝体表面温度应力的影响最大,随着深度增加影响越来越小,至坝体中间基本无影响。当寒潮历时相同时,降温幅度越大温度应力最大值越大,3 d 降温 18℃时坝体表面应力最大值为 1.90 MPa。在降温幅度相同的情况下,寒潮历时越长温度应力最大值越大,4 d 降温 15℃时坝体表面应力最大值为 1.74 MPa。

(3) 根据三维有限元仿真计算成果,寒潮冷击作用下碾压混凝土表面拉应力超过其抗拉强度,是形成混凝土表面裂缝的重要原因;结合工程实际分析,除了施工期严格的混凝土温控措施,坝体表面保护在工程建设和运行期都能发挥重要作用,可有效防止寒潮引起的温度裂缝,提升坝体混凝土质量、耐久性和结构安全性。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M]. 北京:水利电力出版社,1979.
- [2] 梁润,陈锦桂,杨康宁,等. 寒潮影响下的混凝土坝块内外温差与内表温差[J]. 武汉水利电力学院学报, 1985(4):42-48.
- [3] 雷雨萍,黄天润. 拉西瓦拱坝施工期温度应力反演计算与典型坝段裂缝成因分析[J]. 西北水电, 2020(S1):60-66.
- [4] 周人飞,刘勋楠,刘玉. 东南亚地区某碾压混凝土坝裂缝成因及防治措施研究[J]. 广东水利水电, 2024(1):51-56.
- [5] 朱岳明,贺金仁,石青春,等. 龙滩大坝坝面长间歇和寒潮冷击的温控防裂分析[J]. 水力发电, 2003, 29

(5):6-9.

- [6] Li Shouyi, Ren Jinke, Wu Zhongming, et al. Simulation of temperature field -RCC arch dam[J]. *International Water Power and Dam Construction*, 2008, 60(4):16-18.
- [7] 何 劲, 陈尧隆, 李守义. 寒潮引起的碾压混凝土坝温度应力计算[J]. *西安理工大学学报*, 1999, 15(4):91-94.
- [8] 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.
- [9] 马 刚, 常晓林. 基于实测温度的拱坝裂缝稳定性分

析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(4):31-36.

- [10] 黄爱国. 影响下的混凝土坝块的表面温度与表面保护[J]. *武汉水利电力大学学报*, 1995, 28(2):118-122.
- [11] 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.
- [12] 戴宏斌, 严 涛, 刘 茜, 等. 寒潮对导墙坝段施工期温度应力影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3):200-206.

(上接第124页)

- [20] 周雪莹, 杜 叶, 连 宾. 不同培养条件对胶质芽孢杆菌诱导碳酸钙晶体形成的影响[J]. *微生物学报*, 2010, 50(7):955-961.
- [21] Zheng Tianwen, Qian Chunxiang. Influencing factors and formation mechanism of CaCO₃ precipitation induced by microbial carbonic anhydrase[J]. *Process Biochemistry*, 2020, 91:271-281.
- [22] Li Zhenfang, Liu Aizhu, Sun Chunhui, et al. Biomineralization process of CaCO₃ precipitation induced by *Bacillus mucilaginosus* and its potential application in microbial self-healing concrete[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2024, 196:1896-1920.
- [23] 庞彩燕, 李广悦, 孙 静, 等. 一株沙福芽孢杆菌生长及其产碳酸酐酶特性[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42(1):67-73.
- [24] 李 为, 曹 龙, 周蓬蓬, 等. 温度对细菌碳酸酐酶催化碳酸钙沉积的影响[J]. *地球与环境*, 2013, 41(4):371-377.
- [25] 李 为, 余龙江, 余俊峰, 等. 岩溶环境因子对细菌胞外碳酸酐酶表达及活性的影响[J]. *微生物学通报*, 2005, 32(5):35-39.
- [26] Zeng Xiaoxi, Zhou Huibo, Hu Yuehua, et al. Study on the influence factors of desilication in bioleaching by *B.*

Mucilaginosus [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 415-417:1740-1743.

- [27] 董颖博, 赵 钰, 林 海, 等. 胶质芽孢杆菌淋洗石煤提钒尾渣中重金属研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(6):1992-2001.
- [28] Zhu Jiahua, Sun Jing, Pang Caiyan, et al. Isolation, identification, and carbonate mineralization characteristics of a newly carbonic anhydrase-producing strain[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2024, 196(11):8009-8025.
- [29] Shen Yan, Yu Chuang, Yu Xiaoniu. Bioremediation of cadmium ions by *Bacillus mucilaginosus* and its removal mechanism[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2022, 233(4):132.
- [30] Zhang Qingshan, Liang Long, Jing Mengjuan, et al. Bioleaching of available silicon from coal tailings using *Bacillus mucilaginosus*: a sustainable solution for soil improvement[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2023, 30(40):93142-93154.
- [31] Huang Jiafu, Ou Yiyi, Zhang Dimeng, et al. Optimization of the culture condition of *Bacillus mucilaginosus* using *agaricus bisporus* industrial wastewater by Plackett-Burman combined with Box-Behnken response surface method. [J]. *AMB Express*, 2018, 8(1):141.