

张晓光, 李松辉, 雒翔宇. 高寒区混凝土坝越冬面的水平开裂机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 149-156.
ZHANG Xiaoguang, LI Songhui, LUO Xiangyu. Study on the horizontal cracking mechanism of concrete dams overwintering surface in high cold regions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 149-156.

高寒区混凝土坝越冬面的水平开裂机理研究

张晓光¹, 李松辉², 雒翔宇²

(1. 松花江水力发电有限公司丰满大坝重建工程建设局, 吉林 吉林 230000; 2. 中国水利水电科学研究院
流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 越冬面层间结合与防裂是高寒区混凝土坝施工建设的重点、难点。基于监测资料及观测结果, 通过三维有限元数值仿真分析, 探索不同因素对越冬后新老混凝土结合面法向应力的影响, 通过仿真结果阐明上下层温差、自生体积变形、层间结合强度等不同因素状态下的层间应力状态。分析结果表明, 高寒区越冬层的张开、闭合、黏结状态取决于施工过程中新老混凝土温差、自生体积变形和层间结合强度3项关键因素。其中新老混凝土温差和自生体积变形将导致较大的法向应力作为阻止层间结合的驱动力, 而层间结合强度作为阻止层间开裂的抵抗力。根据分析结果可知高寒区越冬后新浇混凝土重点控制指标就是新老混凝土温差及通过层间特殊施工工艺增强层间结合, 上下层温差叠加自生体积变形差异引起的层间面应力较大, 尤其是在端部约束等作用时, 因此在保障温控措施的同时增大层间结合强度也是越冬后新浇混凝土的施工重点。

关键词: 高寒区; 越冬面; 层间应力; 新老混凝土

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.031

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0149-08

Study on the horizontal cracking mechanism of concrete dams overwintering surface in high cold regions

ZHANG Xiaoguang¹, LI Songhui², LUO Xiangyu²

(1. Fengman Dam Reconstruction Engineering Construction Bureau of Songhua River Hydroelectric Power Generation Co., Ltd., Jilin 230000, Jilin, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The combination of winter surface layers and crack prevention is a key and difficult point in the construction of concrete dams in high cold areas. Based on the monitoring data and observation result, through three-dimensional finite element numerical simulation analysis, the influence of different factors on the normal stress of the interface between new and old concrete after overwintering is explored. Through simulation result, the interlayer stress state under different factors such as temperature difference between upper and lower layers, self generated volume deformation, and interlayer bonding strength is elucidated. The analysis result indicate that the opening, closing, and bonding state of the winter layer in high-altitude cold regions depend on three key factors: temperature difference between new and old concrete, self generated volume deformation, and interlayer bonding strength during construction. The temperature difference between new and old concrete and the self generated volume

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3090102); 陕西省东庄水利枢纽工程大坝建设期温控科研项目 [DZ-JSFW-KY-203-028(DBWKKY)]; 巴基斯坦巴沙项目(土建标)及唐吉尔水电项目温度控制标准及温控措施研究(DBDP-DC-CHN-004)。

作者简介: 张晓光(1977—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事水电站建设管理。E-mail: 3045297404@qq.com

通信作者: 雒翔宇(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水工结构分析研究。E-mail: luo_xy@iwhr.com

deformation will result in a larger normal stress as the driving force to prevent interlayer bonding, while the interlayer bonding strength will serve as the resistance force to prevent interlayer cracking. According to the analysis result, it can be concluded that the key control indicators for newly poured concrete in high cold areas after overwintering are the temperature difference between new and old concrete, as well as the strengthening of interlayer bonding through special interlayer construction techniques. The interlayer surface stress caused by the difference in self generated volume deformation caused by the temperature difference between upper and lower layers is relatively large, especially under the effect of end constraints. Therefore, increasing interlayer bonding strength while ensuring temperature control measures is also a key construction focus for newly poured concrete after overwintering.

Keywords: high cold areas; overwintering surfaces; interlayer stress; new and old concrete

0 引言

北纬寒冷区、高寒区混凝土大坝建设成为我国水利工程建设的主要趋势之一,随着一大批大型水利工程的建设施工,混凝土冬季停工已经成为当下施工的主要环节之一。那么开春后混凝土坝的继续浇筑将面临重大调整,众所周知长间歇后的混凝土温控防裂难度大,得到重点关注后对温控施工的精准化、细致化把控使得越冬长间歇新浇混凝土温控防裂技术难题基本突破,新浇混凝土实现了较大的质量提升^[1]。但是对于长间歇后新老混凝土的黏结受多方面因素影响,包括新老混凝土温差、自生体积变形等热力学差异,对于施工周期长、仓面尺寸大的混凝土坝而言,施工中将面临多次长间歇后新老混凝土的位于高寒区混凝土坝冬季停止施工越冬后的混凝土坝防裂成为当下工程的重点、难点^[2]。

北方寒冷、高寒区混凝土坝施工温控防裂成为近年来保障施工的关注重点,多项科学研究也主要针对恶劣低温环境下的混凝土温控防裂开展,从朱伯芳院士提出大体积混凝土温控理论后,多项混凝土坝的温度应力及温控措施的仿真分析均基于上述理论^[3]。随着超高混凝土坝的多项应用,温度应力、温控措施超大规模仿真分析软件也越来越成熟,与现场有力的施工措施相结合,国内多项超高坝的温控防裂技术得到了解决,大幅度提高了我国的建坝质量^[4]。随着高寒区混凝土坝的不断规划建设中,寒冷极端恶劣环境下的温控防裂技术及落地已经成为当下混凝土坝施工建设的重要关注点,随着东北极寒天气下丰满大坝建设为以后高寒区混凝土坝的施工建设提供了宝贵的工程经验^[5]。日后的黄藏寺、叶巴滩、拉西瓦等高坝建设中,高寒大温差租用下的混凝土坝性态影响及措施已有深入研究,尤其是应对冬季施工或者冬季停工条件下的混凝土坝保温方法、保温标准及措施做了大量的研究^[6-7]。实现了寒区混凝土坝冬季施工条件

下抗冰冻、冰拔、极端温差等不同因素的不利影响下的应对措施,大幅度解决了恶劣条件下的抗裂难题^[8-9]。

根据目前混凝土坝施工过程中的防裂重点主要有3点,即在极大温差影响作用下的上下游开裂风险、温度骤降或者冬季寒潮等情况下的仓面、表面开裂分析以及内部顺河向方向基础温差导致的开裂问题^[10-11]。在今天的施工过程中发现,寒冷区常规的越冬保温在保障越冬期间仓面防裂的前提下,开春浇筑过程中越冬后由于长间歇老混凝土上进行新混凝土的浇筑成为当前高寒区越冬施工的重点和难点^[12-14]。根据大体积混凝土温控理论,长间歇后新浇混凝土的防裂关键在于上下层温差的控制^[15]。根据已有研究成果可知,长间歇后由于老混凝土硬化发热过程,北方越冬后新浇混凝土面临通常 30 GPa 以上的强约束,按照常规施工温控方案,最主要是通过降低新浇混凝土最高温度保障新老混凝土温差从而达到新浇混凝土抗裂的目的^[16]。而对于新浇混凝土是否可以实现与老混凝土的完美结合,保证新老混凝土中间不出现裂缝似乎没有进行深入的研究,往往的采取方案是通过新老混凝土的电镐凿毛、浇筑过程均匀振捣实现越冬层后新老混凝土有效结合^[17-19]。部分工程根据施工经验,起初采用了加大配筋和增强钢筋解决这种裂缝的产生^[20-21],实践工程表明增大配筋率只能起到最大程度的限裂作用,对于越冬后新老混凝土的防裂效果微弱。但是事实证明上述方法并未得到有效改善混凝土坝越冬后水平层间裂缝问题,水平裂缝依旧成为重力坝建设后期运营中的痛点和难点,主要原因是在混凝土坝长间歇后不同工程水平缝的温控需要从常规措施和结构措施上做到精细化、精确化,保障竖向应力小于水平结合力,才能做到越冬后混凝土水平层面的完美结合^[22-23]。

基于上述问题,本研究将针对高寒区混凝土坝越冬施工水平防裂难的问题,基于新老混凝土材料差异

性通过数值仿真分析, 探索自生体积变形、上下层温差、新老混凝土结合强度等对水平裂缝的影响程度, 为真实施工提供防裂重点和指明施工方向。进一步以温度年变化为边界仿真分析水平缝在年温度变化条件下的裂缝扩展规律及发展规律。本研究成果可以为高寒区混凝土坝越冬后水平缝防裂施工提供关键技术指导。

1 高寒区混凝土坝越冬后水平开裂分析方法

高寒区混凝土越冬面的层间结合低、容易产生水平向裂缝的主要原因是长间歇后新老混凝土出现明显的温差和自生体积变形差异, 导致新老混凝土收缩变形发生明显的差异性。同时由于混凝土坝具有大仓面、约束条件复杂等因素, 叠加新老混凝土结合强度低的时候, 会明显在边界出现开裂情况, 随着运行期水压荷载和年变化气温影响, 导致水平裂缝进一步扩展的现象。因此针对越冬后混凝土施工的水平裂缝分析主要通过温度应力、自生体积变形差异、约束和层间结合方面入手分析, 本文利用 SAPTIS 软件计算分析高寒区越冬层的水平裂机理^[24]。

(1)越冬长间歇后的应力分析。高寒区混凝土坝长间歇后弹模增大、老混凝土对新混凝土约束增强、新老温差增大, 从而产生超出层间结合强度的应力。同时由于混凝土仓面较大、施工因素等不利影响容易产生较大的端部约束, 增加了水平薄弱面的开裂风险。如图 1 所示, 借鉴朱伯芳院士的刚性基础上新浇块均匀冷却时的温度应力分析^[1]。相应的应力解公式如下

$$\sigma = K_R \cdot K_f \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_f E_f}} \quad (2)$$

$$K_R = \left(\frac{\frac{L}{H} - 1}{\frac{L}{H} + 10} \right)^{h/H} \quad (3)$$

式中, H 为新浇混凝土高度; E_f 老混凝土弹性模量; E_c 新浇混凝土弹性模量; A_g 混凝土横截面积; A_f 约束面积; α 为线膨胀系数; h 为距离层间面的高度; σ 新浇混凝土温度应力值。

根据越冬后新浇混凝土温度应力公式分析, 可知降低应力数值的关键在于温差值和约束系数 K_f , 其中越冬后 E_f 、 E_c 、 A_g 等数值均为固定, 但是由于端部出现不同程度约束时, A_f 约束面积会受到不同程度的影响。因此通过公式可知温度应力的关键在于温

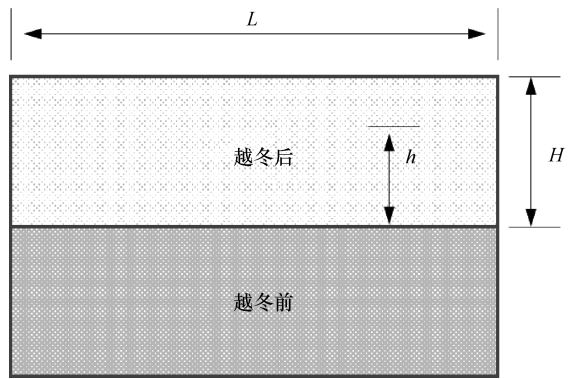


图 1 越冬前后新老混凝土温度应力分析示意

差和约束。

(2)越冬后的材料差异性。本研究中将基于长间歇特性及混凝土的硬化特性, 仿真分析混凝土坝越冬后的浇筑过程、探索分析水平结合面的应力规律。根据上述内容分析可知, 越冬后长间歇的关键在于温差和约束。按照混凝土复杂应力状态下的整体平衡外荷载公式可知, 自生体积变形是其中关键一项。通常情况下, 混凝土在复杂应力状态下的整体平衡方程如下式所示

$$\{\Delta P_n\} = \{\Delta P_n\}^{L, c} + \{\Delta P_n\}^T + \{\Delta P_n\}^0 \quad (4)$$

式中, $\{\Delta P_n\}^{L, c}$ 为外荷载和徐变荷载增量; $\{\Delta P_n\}^T$ 温度荷载增量; $\{\Delta P_n\}^0$ 为自生体积变形荷载增量。

根据越冬后新浇混凝土与老混凝土对比分析可知, 无论是同样混凝土还是不同类型混凝土自生体积变形差异必然存在。按照高寒区冬季越冬施工规律可知, 越冬时间通常为 3 个月以上, 新浇混凝土与老混凝土的自变差异龄期至少相处 90 d, 自变荷载增量成为关键因素之一。

2 越冬层间结合影响因素敏感性分析

基于上述分析可知, 混凝土坝越冬后开裂的主要因素为温度荷载、自生体积变形、约束 3 个主要荷载因素和 1 个自身缝面黏结强度低因素, 因此本文针对温度荷载、自生体积变形、层面缝强度和约束对缝面开裂的影响分析。本文以国内高寒区某工程为例, 研究分析典型坝段在上下层温度、自生体积变形差异等关键因素的水平缝间应力特征, 进一步结合层间缝结合强度, 基于水平缝应力规律分析按照分析越冬层面防裂机理。具体工况如下。

(1)上下层温差。本文跟实际监测结果反演分析混凝土浇筑过程的温度线, 并统计分析了施工过程中的上下层温差特征。基于实际温度监测结果, 结合上下层温度 10 °C、15 °C、20 °C 分析层间应力特征。

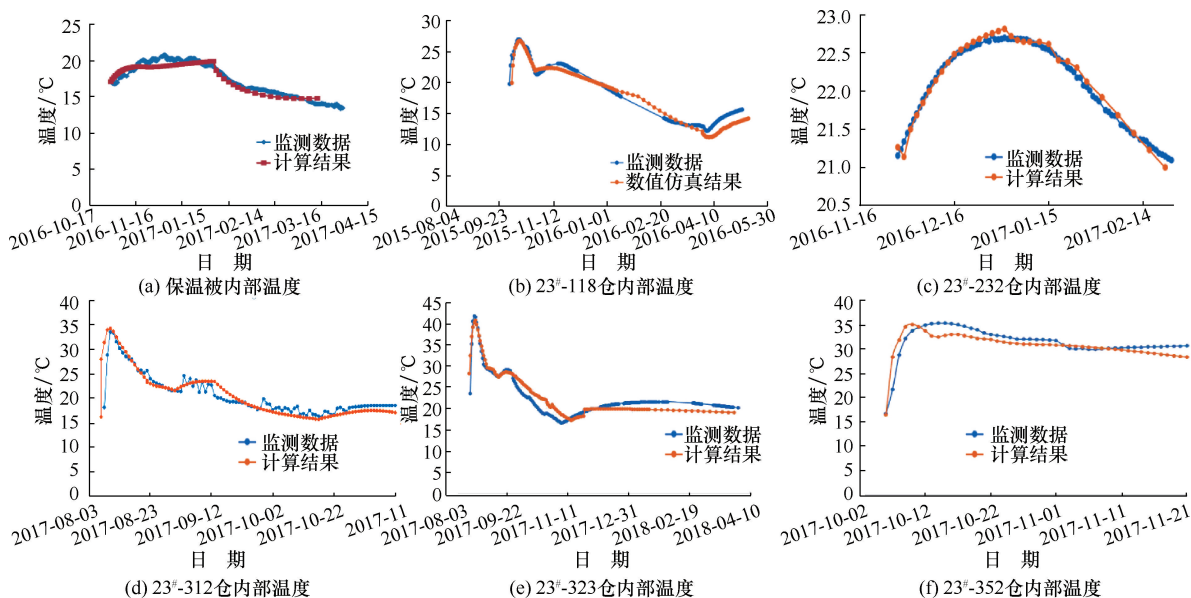


图2 根据现场监测反演温度过程线

表1 根据监测结果统计的上下层温差

上层浇筑时间	浇筑高程/m	下层平均温度/°C	浇筑层最高温度/°C	温差/°C
2017-06-01	218~220	13.25	28.60	15.35
2017-07-03	220~222	14.87	32.92	18.05
2017-07-29	222~225	15.60	44.37	28.77
2017-08-14	225~227.5	15.96	38.82	22.86

(2) 自生体积变形。越冬层后的新老混凝土差异性主要体现在自生体积变形的差异性。而自生体积变形的差异性是在越冬层新老混凝土无法避免的难题, 主要体现在两方面: 越冬结束后老混凝土经历自生体积变形收缩完成, 而新浇混凝土水化过程中自生体积变形从0开始, 对于收缩型混凝土自变的差异必然产生; 自生体积变形差异性体现在越冬前后不同配合比混凝土, 尤其出现在碾压混凝土重力坝的建设当中, 例如碾压混凝土重力坝的典型坝段越冬前用碾压混凝土越冬后用常态混凝土, 两种类型的自变数值差异更大。因此本文研究中选取的越冬前后自生体积变形曲线如图3所示。

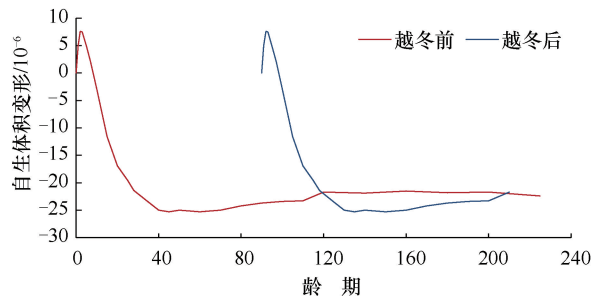


图3 自生体积变形值对比

表3 混凝土基本计算参数

绝热温升/°C	弹性模量/GPa	容重/t·m ⁻³	线胀系数	泊松比
$T = 24.2 \times (t - 0.30) / (t + 3.0)$	$E = 44.8 \times (1 - \exp(-0.5t^{0.6}))$	2.45	0.75	0.167

注: 裂缝所用的强度参数: 缝的初始状态, =0 张开, =1 接触, =2 粘接。

(3) 层间结合强度。根据越冬层后的施工特征, 对不同层间结合强度进行分析, 探索法向应力作用下的不同层间结合强度对于开裂和扩展的影响。主要强度如下表所示。

表2 层间结合强度定义值

工 况	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa
1	1.00	1.00
2	0.80	0.80
3	0.50	0.60
4	0.30	0.30

(4) 有限元仿真分析模型。本文根据某工程建立有限元分析模型, 根据拟定施工进度分析不同工况及参数条件下的越冬前后混凝土应力性态。有限元模型及对应浇筑过程示意如图4所示。

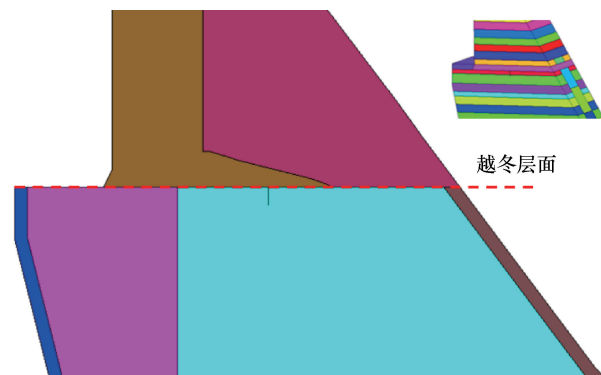


图4 有限元仿真分析模型

(5) 主要计算参数如表3所列。

3 数值结果及分析

根据上述相关参数、模型进行不同工况的仿真分析, 探索不同敏感因素的混凝土越冬面的法向应力规律。

3.1 计算仿真结果

3.1.1 开裂特性分析

采用界面单元时, 按照层间强度分别进行分析后发现。设定混凝土层面最大拉应力强度为 0.8 MPa, 当层间应力值大于 0.8 MPa 时出现开裂。根据层面缝状态可以看出, 在经历降温过程中层面缝的张开主要出现在上游部位和下游测引水部位混凝土两侧。本文选取了两侧的节点应力过程线进行分析, 主要位置为从上游到下游: -5.89(上游部位 3 个点)、30.73、29.18(下游部位两个点)。如图 5 所示, 层间强度分别为 0.3 MPa、0.5 MPa、0.8 MPa 的层面开裂云图, 1.0 MPa 不出现开裂现象。

根据实际浇筑情况, 本文综合混凝土真实温度过程线、自生体积变形差异, 仿真分析了混凝土坝的浇筑过程, 包含混凝土的浇筑过程、冷却过程、保温边界等关键要素仿真分析。层间结合部位采用界面单元

模拟, 初始状态设定为黏结状态, 不出现开裂现象, 主要目的为分析施工过程中的应力发展规律。仿真分析结果如图 6 所示。从开裂位置和应力过程线可以看出, 混凝土层面开裂从端部开始进行向内扩展。

3.1.2 应力状态分析

(1) 上下层温差。越冬前碾压混凝土越冬时间为 2016 年底 2017 年初, 层间间歇时间最长达 7 个多月。越冬面以下为碾压混凝土, 以上为常态混凝土。根据规范中两点关键要求: 在龄期超过 28 d 的老混凝土面上浇筑混凝土时, 应采取短间歇均匀上升或薄层连续上升的浇筑方式。新老混凝土容许温差可取 15℃~20℃, 当浇筑块长边长度大于 40 m 时宜取小值; 新老混凝土容许温差(℃), 为老混凝土面上 0.25l 高度范围内的新混凝土最高温度与浇筑新混凝土时下层老混凝土 0.25l 高度范围内的平均温度(℃)。如图 6 至图 8 所示, 本研究提取了典型坝段各个坝段在 2017 年入春后浇筑新混凝土的内部温差与下部老混凝土的温差值, 出现明显大于规范值的情况。坝段 218~222 高程中出现异常较高温度, 分别为 40℃和 45℃, 温差甚至达到 30℃。新老混凝土温度较大, 直接导致层间缝拉应力过大, 较大面积

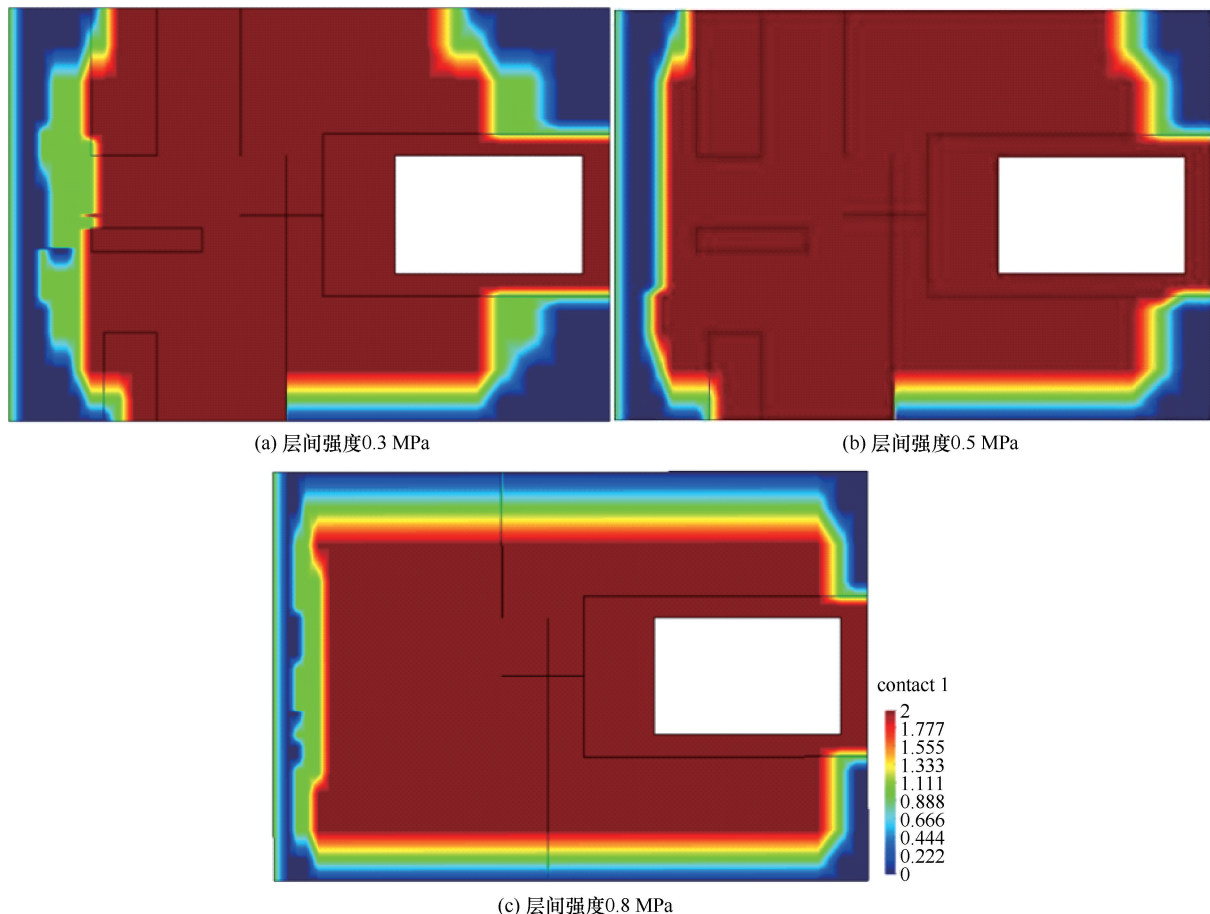


图 5 不同强度下的层面缝状态(单位: MPa)

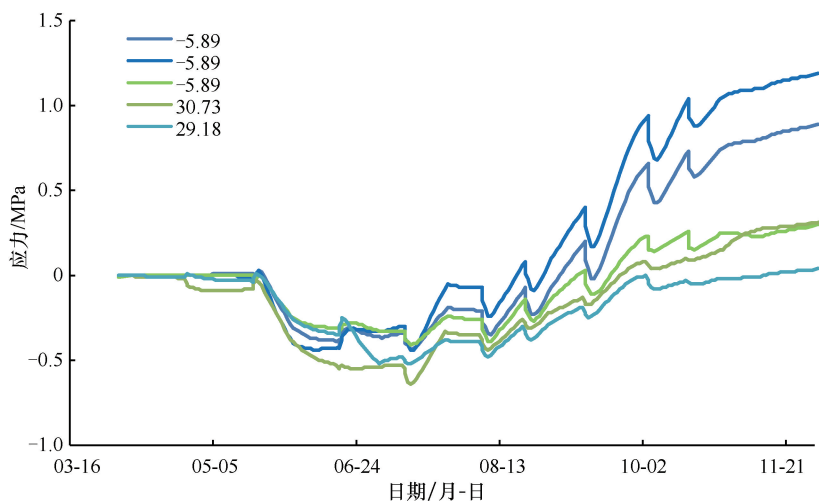


图6 基于真实施工的应力过程线

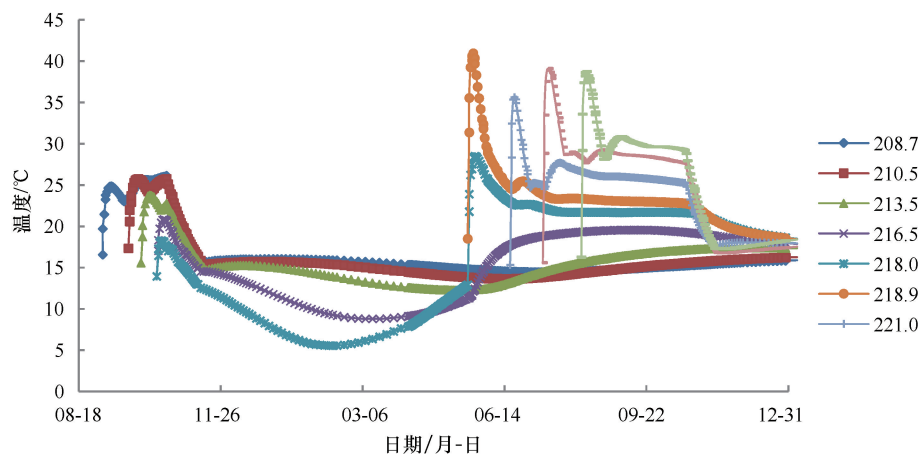


图7 典型部位越冬前后的温度过程线

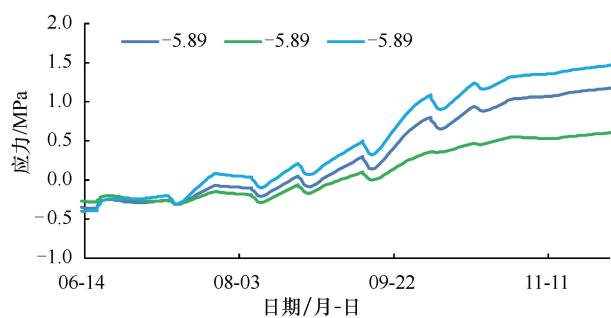


图8 考虑上下层温差单因素的层间法向应力

拉应力超出强度值。从施工期坝体结构的温度应力场研究发现, EL218 高程以上温度值明显高于 218 高程以下, 在 EL218 高程处明显出现较大拉应力作用, 同时从 2017 年底的坝体位移场可以看出, EL218 高程上下位移存在明显的分界线。仿真过程中设定层间结合强度无线大不拉开的状态下可以看出新浇混凝土在完成一冷温降结束后应力可以达到 1.0 MPa 以上。

(2) 自生体积变形。自生体积变形改变后层面缝的应力过程线及最大法向力与切向力包络图如图所示, 从选取的点分析可以看出, 自生体积变形的增长影响应力值变大 0.3 MPa。本工程中的收缩值非常不利于层间越冬面的结合, 根据计算结果可知, 自生体积变形可引起层面 0.5 MPa 左右的法向拉应力。同时根据图 9 可以看出, 自生体积变形作用下, 层面缝应力较大区域主要发生在上游部位和下游压力外包混凝土周围。

(3) 端部约束作用。下图为层面缝不同强度的裂缝扩张最终状态, 从图 10 可以看出, 层面缝强度降低后, 开始影响压力钢管上游方向部位会受到影响, 最终状态中会发生开裂现象。本工程分析中下游面为压力包管, 进行了提前施工, 因此施工中容易引起下游面的约束, 根据分析结果上游面出现了最大近 1.0 MPa 的法向应力值。

3.2 越冬后新老混凝土层间结合开裂风险分析

从温控理论而言, 主要驱动

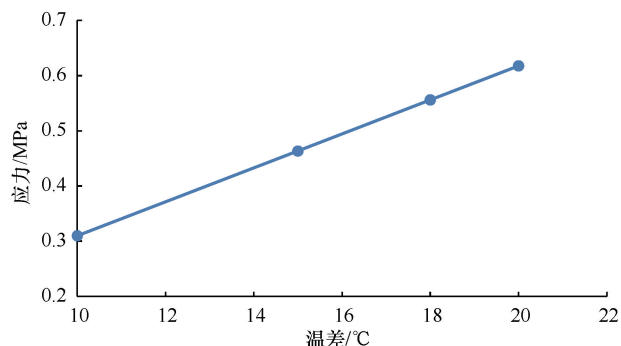


图9 上下层温差与应力关系曲线

水平裂缝的因素是竖向出现大于层间结合强度的应力, 而驱动水平裂缝的关键因素在于混凝土材料的差异性和长间歇, 因此针对越冬后新老混凝土的层间防裂需要充分考虑混凝土差异引起的自生体积变形、上下层温差和层间自身结合强度。根据分析结果可知形成的主要原因可以总结为以下四点。

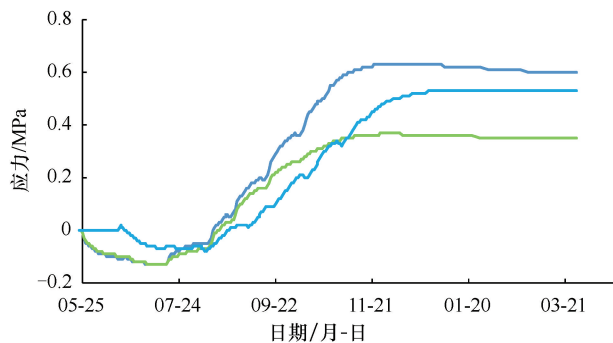


图 10 自生体积变形作用下的代表点应力过程线

(1) 施工长间歇影响因素。施工长间歇是导致层面缝开裂的关键因素之一。典型坝段 EL218 上部混凝土覆盖施工时段与下部浇筑完成的间歇时间最长达 7 个多月。7 个月的长间歇将导致以下不利因素：上下层混凝土出现明显温度差并较难控制于规范值以内；长间歇将导致上下层混凝土出现较大的自生体积变形收缩差异；长间歇后底部混凝土硬化结束，弹性模量增大出现较强约束；长间歇后新浇混凝土与老混凝土接触部位较难达到理想黏结状态。上述等不利影响均会影响层面的粘结状态。

(2) 上下层温差过大影响因素。上下层温差较高。根据监测温度及温度场的数值反演结果可知，越冬层新老混凝土浇筑时间超过 180 d，典型坝段越冬后层面高程范围内浇筑的混凝土内部平均最高温差超过了 20℃，只有越冬后少数仓位温差低于 20℃。其中部分坝段 218~222 高程中出现异常较高温度，分别为 40℃ 和 45℃。从计算结果中也可以看出，这部分温度荷载可引起层面缝将近 1 MPa 的法向拉应力。

(3) EL218 层面上下层混凝土特性存在差异。首先是绝热温升的差异，常态混凝土的绝热温升大于碾

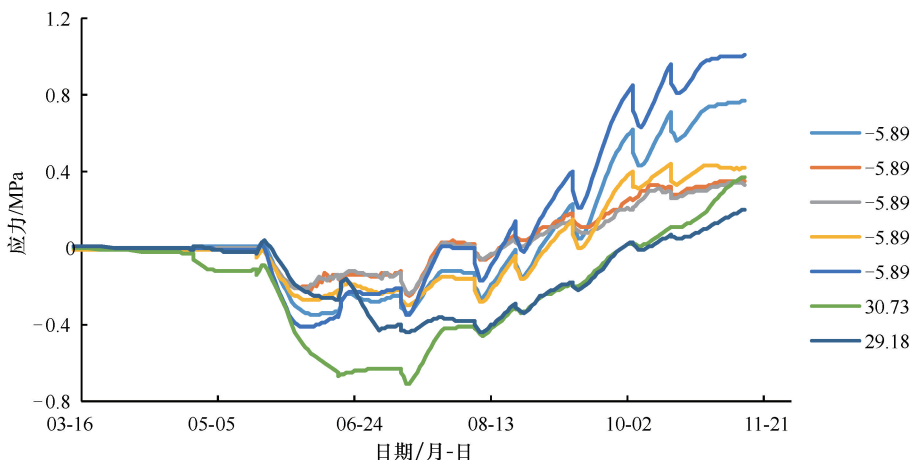


图 11 端部约束作用下的关键点应力过程线

压混凝土的绝热温升，并且升温速度较快。常态混凝土容易内部温度上升较快较高，从而导致上下层温差较高，增大了 218 高层间 Z 方向应力值。其次是线膨胀系数差异，常态混凝土线膨胀系数值明显大于碾压混凝土，导致同样温度变化下产生较大变形。常态混凝土与碾压混凝土的自生体积变形差异，经历 180 d 的越冬后浇筑常态混凝土，此时碾压混凝土自生体变形收缩几乎完成。经历几乎 230 d 以后常态混凝土发生最大收缩变形，25 的收缩值非常不利于层间越冬面的结合，根据计算结果可知，自生体积变形可引起层面 0.5 MPa 左右的法向拉应力。

(4) 层面缝强度不足影响因素。根据计算结果可知，层面缝拉应力较大位置主要集中于上部位和下游压力外包混凝土周围。由于上述因素产生较大的法向应力较大，当施工过程中层间结合施工过程中由于各方面因素会导致强度较低，此时当温度荷载、自变荷载等产生的应力大于层间结合强度时容易导致层面出现裂缝。

(5) 端部约束。越冬前后出现较大的开裂与混凝土的端部约束作用密切相关，由于越冬后新混凝土受到老混凝土的约束作用，根据分析发现法向应力最大位置通常出现在混凝土结合部位的四周。如果出现某个端部较大约束时，将会导致未受约束部位应力增大，出现开裂现象。

4 结论

本文根据高寒区混凝土坝施工越冬的特征，针对越冬后新老混凝土的实时监测温度特征和材料特性进行了仿真分析，分别针对影响越冬层间结合的关键因素进行了深入分析，得出了主要结论如下。

(1) 越冬层新老混凝土上下层温差和自生体积变形差异是引起层间水平开裂的主要诱因，其中上下层温差控制需要根据实际工程加强温控措施保障应力最小，而自生体积变形属于配合比设计完成后的固有特性，修改难度小，因此对于越冬层的新老混凝土浇筑降低应力的最好方案是使用同一配合比混凝土最大程度降低新老混凝土温差。

(2) 越冬层后新老混凝土层间结合强度是抵抗水平开裂的关键，需要在越冬施工后通过充分凿毛等方法增大结合强度，如果

层间缝强度较小时, 非常容易导致较低法向拉应力状态下层面缝开裂。同时需要再仓面周围布设钢筋, 在周围出现开裂情况下不会进一步发生裂缝扩展现象。

(3) 混凝土坝施工中端部约束端部约束对于水平裂缝的开裂和扩展起到不利影响, 建议施工过程中充分优化施工工艺, 调整施工工序减少端部约束。主要的端部约束例如典型坝段压力包管等的施工。

参考文献:

[1] 韩小妹, 邵剑南, 杨春宝. 高寒区混凝土坝低温防裂温控措施的探讨[J]. 水利规划与设计, 2021(1): 115-119.

[2] 刘毅, 杜雷功, 钱文勋, 等. 高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 45-52.

[3] 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.

[4] 袁广林, 黄方意, 沈华, 等. 大体积混凝土施工期的水化热温度场及温度应力研究[J]. 混凝土, 2005(2): 86-88.

[5] 张国新, 刘毅, 刘有志, 等. 高混凝土坝温控防裂研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1068-1078.

[6] 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.

[7] 杨俊峰, 李萌, 李松辉, 等. 寒冷地区特高拱坝混凝土最高温度控制研究: 以东庄拱坝为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(7): 93-103.

[8] KOGBARA R B, IYENGAR S R, GRASLEY Z C, et al. Relating damage evolution of concrete cooled to cryogenic temperatures to permeability[J]. Cryogenics, 2014, 64: 21-28.

[9] 高鹏, 胡筱, 辛建达, 等. 粉煤灰掺量对高水胶比混凝土抗裂能力的影响[J]. 水力发电, 2021, 47(4): 122-126.

[10] 张庆龙, 马睿, 胡昱, 等. 大体积混凝土结构温度应力智能控制理论[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 11-21.

[11] 张国新, 刘毅, 朱伯芳, 等. 高拱坝真实工作性态仿真的理论与方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 167-174.

[12] 李松辉, 雒翔宇, 张国新, 等. 船闸等薄壁结构长间歇后温控防裂措施研究[J]. 水力发电, 2022, 48(4): 49-53.

[13] 刘晓平, 姚迪, 曹周红, 等. 岩质地基上船闸底板混凝土温控措施研究[J]. 水力发电, 2007, 33(10): 81-83.

[14] XIE J, YAN J B. Tests and analysis on thermal expansion behaviour of steel strand used in prestressed concrete structure under low temperatures[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12: 1-10.

[15] 张国新, 刘毅, 李松辉, 等. “九三一”温度控制模式的研究与实践[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 179-184.

[16] 张国新, 刘茂军, 李松辉, 等. 高寒区混凝土坝长间歇薄层浇筑越冬保温方法[J]. 水利水电技术, 2016, 47(6): 25-28.

[17] 刘延涛, 许政. 高寒区水电站碾压混凝土坝段保温方案的优化[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(6): 776-779.

[18] 张国新. 碾压混凝土坝的温度控制[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 41-46.

[19] 李明超, 张梦溪, 王孜越. 考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝开裂结构温度场与温度应力数值分析[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 551-559.

[20] SCHNEIDER K, MICHEL A, LIEBSCHER M, et al. Mineral-impregnated carbon fibre reinforcement for high temperature resistance of thin-walled concrete structures [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97: 68-77.

[21] SHEHZAD M K, FORTH J P, BRADSHAW A. Imposed loading effects on reinforced concrete walls restrained at their base [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-structures and Buildings, 2020, 173(6): 413-428.

[22] 李子阳, 王建, 金永强. 大坝水平裂缝稳定性分析[J]. 水力发电, 2007, 33(7): 36-38.

[23] 雷炎. 观音阁水库混凝土坝上游水平裂缝修补试验研究[J]. 安徽农业科学, 2007(15): 4708.

[24] 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.

(责任编辑 王 璐)