

杨进, 喻峰, 孙振阳, 等. 碾压式导电混凝土越冬期温控特性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 53-56.
YANG Jin, YU Feng, SUN Zhenyang, et al. Analysis of temperature control characteristics of electrically conductive roller-compacted concrete during overwintering period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 53-56.

碾压式导电混凝土越冬期温控特性分析

杨进¹, 喻峰¹, 孙振阳², 张梦溪², 田丹³

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443002; 2. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 3. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

摘要: 高寒地区极端气温低、冬季时间长的气候增大混凝土坝开裂风险, 当前覆盖隔热材料的保温措施被动隔热, 安装和拆卸程序繁杂。导电混凝土由胶凝材料、导电材料等组成, 兼具混凝土材料良好的力学性能和独特的电热性能, 应用于混凝土坝越冬层等关键部位, 既能满足坝体材料性能需求, 又可维持越冬层温度稳定。建立了高寒区碾压混凝土坝典型坝段的有限元模型, 并依据坝体抵御低温所需供能的 $U-\Delta T$ 模型设计了6种越冬保温方案, 开展了常规保温材料和导电混凝土通电加热的温控仿真。结果表明: 导电混凝土通电加热温控可使上游测点温度维持在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 下游测点温度维持在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 顶部测点温度维持在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据含导电混凝土越冬层的碾压混凝土坝施工期温度场计算, 可以发现冬季导电混凝土越冬层通电后对坝体表面温度场影响显著, 坝体内外温差减小, 有利于大坝温控, 可为解决高寒区混凝土坝的温控防裂提供新的研究思路。

关键词: 碾压式导电混凝土; $U-\Delta T$ 模型; 温度控制; 大坝温度场

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.013

中图分类号: TV49

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0053-04

Analysis of temperature control characteristics of electrically conductive roller-compacted concrete during overwintering period

YANG Jin¹, YU Feng¹, SUN Zhenyang², ZHANG Mengxi², TIAN Dan³

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The climate of low extreme temperatures and long winter time in alpine regions increases the risk of cracking of concrete dams, and the current thermal insulation measures covered with thermal insulating materials are passive insulation, with cumbersome installation and dismantling procedures. Conductive concrete consists of cementitious materials, conductive materials, etc., both good mechanical properties of concrete materials and unique electro-thermal properties, applied to the overwintering layer of concrete dams and other key parts, both to meet the needs of the dam material performance, but also to maintain the temperature stability of the overwintering layer. Therefore, a finite element model of a typical dam section of a crushed concrete dam in the alpine zone was established, and six overwintering insulation schemes were designed based on the $U-\Delta T$ model of the energy supply required for the dam body to resist low temperature, and the temperature control simulation of conventional thermal insulation materials and electrically heated conductive concrete was carried out. The result show that the

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52309166); 中国长江电力股份有限公司科研项目(Z222302036)

作者简介: 杨进(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事大坝运行安全管理研究。E-mail: yang_jin2@ctg.com.cn

通信作者: 孙振阳(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构数值模拟研究。E-mail: szy205@tju.edu.cn

temperature control of conductive concrete with electric heating can maintain the temperature at the upstream measurement point at 18 °C, the temperature at the downstream measurement point at 23 °C, and the temperature at the top measurement point at 30 °C. [Conclusion] According to the temperature field calculation during the construction period of the crushed concrete dam containing conductive concrete wintering layer, it can be found that the conductive concrete wintering layer electrified in winter has a significant effect on the surface temperature field of the dam, and the temperature difference between the inside and outside of the dam is reduced, which is favorable to the temperature control of the dam, and it can provide new research ideas for solving the temperature control and anti-cracking of the concrete dams in high alpine areas.

Keywords: electrically conductive roller-compacted concrete; $U-\Delta T$ model; temperature control; dam temperature field

0 引言

现阶段,我国的水能开发由中部、东部逐渐向水能资源丰富且开发程度较低的西部高海拔高纬度地区转移。与气候温和地区相比,高寒地区的共同特点是超大温差、极端低温、强辐射、大风、干燥等复杂条件,此外,高海拔地区还存在低气压、含氧量低等不利条件,这些复杂条件增大了混凝土坝开裂的风险^[1]。多座修建于高寒区的高混凝土坝发生了严重的开裂问题^[2],如奥地利的 Zillergrundle 坝坝踵发生严重开裂并造成渗漏问题;俄罗斯萨扬舒申斯克坝从施工到运行先后出现了 5 590 条裂缝,修补工作历经 10 a,耗资巨大^[1]。以上工程案例表明,高寒区高混凝土坝的安全建设与运行仍然是一个重点问题。为防止高寒区混凝土坝温度裂缝的产生,施工过程中通常采取以下措施^[3]:(1)对骨料进行预热,提高混凝土入仓温度;(2)覆盖保温材料,减少坝体表面热量散失;(3)分层揭被,避免发生温度骤降;(4)人为设置伸缩缝、诱导缝,避免不规则温度裂缝的产生。

新型功能混凝土材料的提出可为解决水工结构工程问题提供新的解决思路。作为一种智能混凝土材料,导电混凝土(Electrically Conductive Concrete, ECON)具有混凝土材料良好的力学性能兼备优异的电热性能。导电混凝土是一种由胶凝材料、导电材料(如碳纤维、纳米炭黑、钢纤维等)、骨料和水组成的多功能混凝土材料。导电材料加入混凝土后,可使混凝土的电阻率有效地降低 3~4 个数量级,使其具有良好的导电性。此外,导电混凝土还具有耐久性好、抗弯抗冲击性能优异等特点。因此,利用新型功能材料的电热性能,并形成一套针对大体积混凝土结构温控的精确供电模式,可为高寒地区高混凝土坝建设尤其是越冬层面的温控防裂提供新的解决思路。

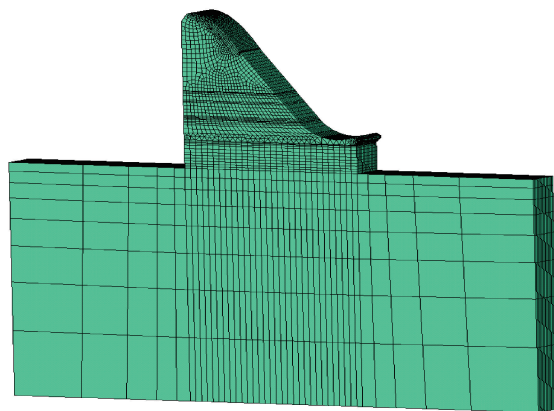
1 $U-\Delta T$ 供电模型

当混凝土表面与气温存在温差时,ERCC 越冬层与空气接触后,在气温作用下,会发生热量的交换,

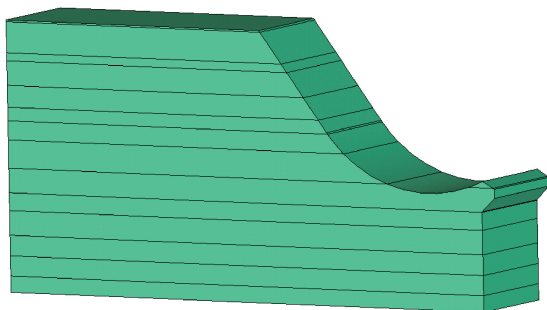
为防止越冬层面内外温差过大,减弱冷空气作用下越冬层面的温降作用,单位时间内 ERCC 越冬层面产生的热量应等于混凝土与空气交换的热量,可得能够抵御低温的 ERCC 层两侧的电压。

2 数值模型与材料参数

为研究碾压式导电混凝土越冬层的温控效果,选取某水利工程溢流坝段开展有限元仿真分析,计算模型如图 1 所示,该坝段高度为 100.0 m,坝段顺河向最大底宽为 109.8 m,横缝间距为 21.0 m,ERCC 越冬层厚度为 0.30 m,地基延伸范围为 150 m,主体碾压混凝土坝为分层浇筑,建立如图 1(b)所示的分层模型,将模型离散为二次的热电耦合单元,单元总数 35 868,节点总数 138 766。



(a) 溢流坝段三维有限元计算模型



(b) 溢流坝段已浇筑混凝土三维分层模型

图 1 我国高寒区某碾压混凝土重力坝仿真模型

仿真过程中涉及的材料包括:碾压式导电混凝土 ERCC,浇筑范围 2 561.7~2 562.0 m,主体三级配 RCC(C₉₀15F50W4)以及基岩共三种材料,通过混凝土材料试验与基于实测数据的反演分析,可得到以上三种材料的热力学参数,如表 1 所列。

表 1 坝体材料热力学参数

材料参数	ERCC	C ₉₀ 15F50W4 三级配 RCC	基 岩
导热系数 $\lambda/(\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	10.29	6.58	6.87
热交换系数 $\beta/(\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	45.70	45.70	45.70
比热容 $c/(\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	1.086	0.778	0.720
线膨胀系数 $\alpha/10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	4.56	9.43	7.00
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 302	2 520	2 666
泊松比 μ	0.167	0.167	0.200
弹性模量 E/GPa	29.20	31.60	12.00

3 温度荷载与边界条件

3.1 施工期温度荷载

温度荷载主要考虑混凝土初始浇筑温度、ERCC 电热效应、混凝土水化热与环境温度的共同作用。选取的计算时间段为施工期(含冬季停工),将每层模型的浇筑温度作为温度场计算的初始条件。电热效应则主要考虑“电-热耦合”作用,对 ERCC 越冬层的上下表面施加电压荷载使其形成电势差,冬季停工期间每日的电压荷载与当日的坝体温度和气温条件有关,可根据提出的 $U-\Delta T$ 模型计算得到。

混凝土中水泥的水化热是影响混凝土坝温度场分布的重要因素,在施工期温度场仿真计算时,通常对坝体混凝土施加绝热温升,ERCC 与 RCC(Roller Compacted Concrete)的混凝土绝热温升通过混凝土材料试验测试得到,随后根据坝体实测温度值对参数进行反演校准,得到准确可靠的混凝土水化产热,坝体混凝土的绝热温升参数如表 2 所列。

表 2 坝体混凝土绝热温升参数

双曲线公式	混凝土种类	θ_0	n
$\theta(\tau) = \frac{\theta_0 \tau}{n + \tau}$	ERCC	30.70	1.45
	RCC	27.32	6.50

表 3 越冬保温方案设计

方 案	上游面	下游面	越冬停浇面		是否通电
			保温措施	等效放热系数 $\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	
A1	4 层橡塑海绵	5 层橡塑海绵	3 层橡塑海绵	1.571	否
A2					是
B1	4 层橡塑海绵	5 层橡塑海绵	6 层橡塑海绵	0.799	否
B2					是
C1	4 层橡塑海绵	5 层橡塑海绵	9 层橡塑海绵	0.536	否
C2					是

3.2 边界条件

该工程地处高原高海拔地区,施工期的低温环境条件不利于坝体的温控防裂,尤其是冬歇期越冬层的保温至关重要。坝址区平均气温以年为周期变化,年平均气温仅为 0.4°C ,年极端温差达 61.6°C ,根据多年月平均气温,采用余弦曲线拟合得到坝址气温变

化方程为 $T(\tau) = 0.4 + 13 \cos \frac{\pi}{180}(\tau - 120)$, $T(\tau)$ 为第 τ 天的气温 ($^\circ\text{C}$),多年月平均气温如图 2 所示。

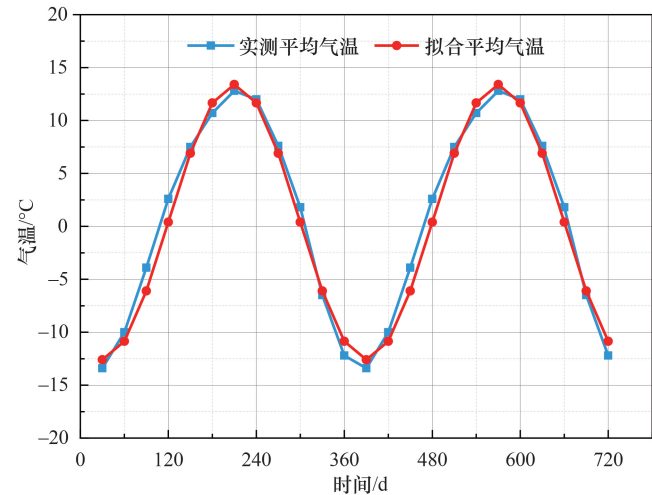


图 2 坝址区多年月平均气温

气温对大坝混凝土的作用主要考虑为对流边界条件(第三类边界条件),采取不同的保温措施主要是为了改变大坝与环境的热交换系数 β_s ,对大坝上下游面、越冬层面采用不同的保温措施。本工程选取的保温材料为每层厚 0.025 m 的橡塑海绵,通常保温层自身的比热容较小,可忽略不计。六种越冬方案如表 3 所列。

4 温控效果分析与结果讨论

为评价各个越冬方案的温控效果,利用已验证的温度场仿真参数,开展施工期温度场仿真计算,分析了越冬期第 61 天和第 111 天的各个方案作为保温措施的温度场分布,对比各方案越冬停工期间温度场的变化,可以发现:随着冬季停工时间推移,各个方案

坝体表面温度变化较为明显, 通电方案表面温度高于未通电方案; 内部最高温度略有降低, 越冬期第 61 天坝体内部温度为 36.9 ℃, 越冬期第 111 天坝体内部温度降低为 36.5 ℃。

越冬期 ERCC 层面的通电与否, 对越冬层附近温度场影响显著。通电后越冬层表面温度与坝体内部温差减小。对于未通电方案, 橡塑海绵保温厚度的变化直接影响到越冬期间坝体内外温差, 进而影响温控防裂效果; 对于通电方案, 橡塑海绵保温厚度的变化对越冬期间坝体内外温差影响较小, 表明对 ERCC 越冬层采取 $U-\Delta T$ 模型的供电模式能够适用于不同表面保温条件, 提升坝体温控防裂效果。

为评价导电混凝土越冬层通电方案的温控效果, 在越冬层面选取上游、下游和顶部共三个关键点, 以上测点均位于坝段横河向的中心, 距离两侧横缝的距离均为 10.00 m, 顶部测点则位于越冬面的几何形心, 距离上、下游测点均为 26.18 m。图 3(a)、(b)、(c) 分别为越冬层上游、下游和顶部测点的温度时程曲线。

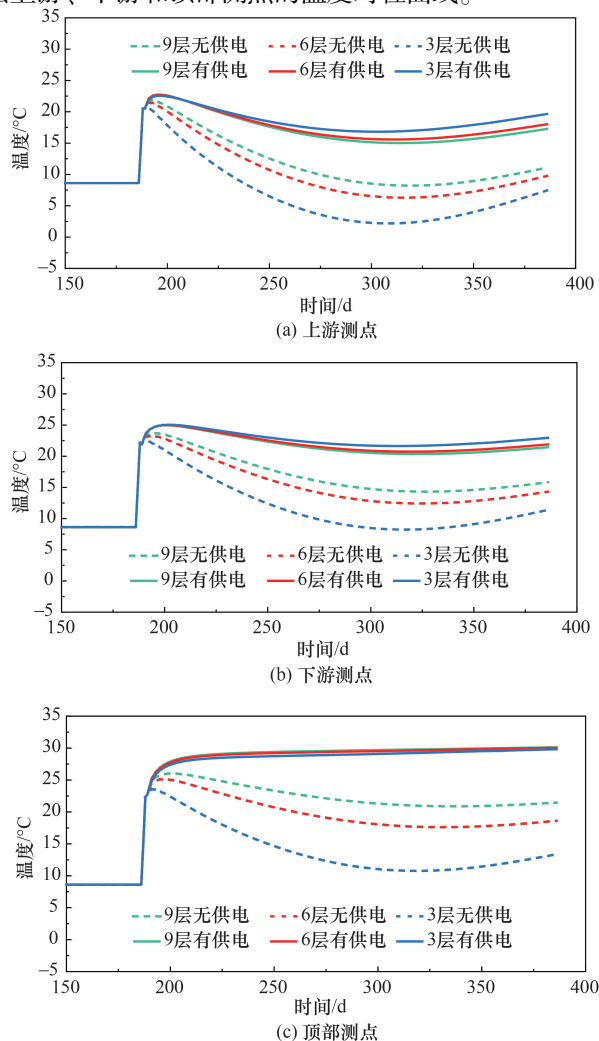


图 3 RCC 坝越冬面温度时程曲线

导电混凝土越冬层由于通电加热提供热量, 坝体表面温度不会出现快速下降的情况, 而是维持在一定温度范围。对于通电方案, 越冬层表面可以维持在一个稳定的温度; 对于未通电方案, 越冬层表面温度会出现不同程度的下降。以顶部测点为例进行分析, 覆盖 3 层保温被温度最低下降到 10 ℃, 覆盖 6 层保温被温度最低下降到 20 ℃, 覆盖 9 层保温被温度最低下降到 22 ℃。通过以上分析可得: 在无供电的条件下, 随着保温被层数(厚度)的增加, 越冬层温降变小, 说明无供电条件下增加保温被的厚度有利于坝体越冬层的温控; 在有供电的条件下, 保温被层数(厚度)的变化对各测点温度变化影响较小, 其中顶部测点的温度在不同保温条件下几乎一致, 表明对 ERCC 层采用合理的供电策略即可实现有效温控。

5 结 论

本文依托高寒区实际碾压混凝土坝工程, 建立典型坝段的三维有限元模型, 验证了模型、参数、荷载与边界条件的有效性, 开展施工期含 ERCC 越冬层的碾压混凝土坝温度场计算, 利用 $U-\Delta T$ 模型计算越冬期的供电电压时程变化, 对比不同保温措施下, ERCC 越冬层的关键点的时程变化, 可得出以下结论。

(1) 越冬期 ERCC 层面通电后对越冬层附近温度场影响显著, 越冬层表面温度与坝体内部温差减小, 有利于坝体温控;

(2) 相比于未通电方案, 通电方案中橡塑海绵保温被厚度的变化对越冬期间坝体内外温差影响较小, 不同保温被厚度方案通电后, 越冬层表面温度变化基本一致, 表明对 ERCC 越冬层采取 $U-\Delta T$ 模型的供电模式能够适用于不同表面保温条件, 提升坝体温控防裂效果;

(3) 采取 $U-\Delta T$ 模型的供电模式能够使坝体越冬层维持在一个稳定的温度, 其中上游测点温度可以维持在 18 ℃, 下游测点温度维持在 23 ℃, 顶部测点温度维持在 30 ℃。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全·拱坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
 [3] 朱兆聪. 寒冷地区中小型碾压混凝土重力坝温控防裂措施研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

(责任编辑 王 璐)