

混凝土在大体积水利工程中的施工温控措施分析

申秀峰

新疆小海子水利建筑安装工程有限公司, 新疆 图木舒克 843900

[摘要]在水利工程领域,大体积混凝土结构因水化热引发的温度应力问题始终是制约工程质量的瓶颈。随着西部某区域大型水利枢纽建设的推进,复杂气候条件与工程规模扩大的双重挑战,使得传统温控技术面临失效风险。昼夜温差剧烈、风速多变等环境特征,加剧了混凝土内部温度场的不均匀分布,导致结构开裂概率显著上升。当前工程实践中,温度裂缝不仅影响结构耐久性,更可能引发渗漏、冻融破坏等连锁反应,威胁工程安全运营。现有温控体系在应对特殊气候与复杂结构时,普遍存在调控滞后、协同性不足等缺陷,亟待构建多尺度耦合的温度控制理论。文章聚焦材料改性、智能监测与动态调控的技术融合,探索适应极端环境的大体积混凝土温控创新路径,为提升高海拔干旱区域水利工程质量提供理论支撑。

[关键词]大体积混凝土;水化热控制;智能监测;分层浇筑;水利工程

DOI: 10.33142/hst.v8i6.16926

中图分类号: U44

文献标识码: A

Analysis of Construction Temperature Control Measures for Concrete in Large Volume Hydraulic Engineering

SHEN Xiufeng

Xinjiang Xiaohaizi Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Tumushuke, Xinjiang, 843900, China

Abstract: In the field of hydraulic engineering, the temperature stress problem caused by hydration heat in large volume concrete structures has always been a bottleneck that restricts the quality of engineering. With the advancement of the construction of a large-scale water conservancy hub in a certain western region, the dual challenges of complex climate conditions and the expansion of engineering scale have put traditional temperature control technology at risk of failure. The severe temperature difference between day and night, as well as the variable wind speed, exacerbate the uneven distribution of temperature field inside the concrete, leading to a significant increase in the probability of structural cracking. In current engineering practice, temperature cracks not only affect the durability of structures, but may also trigger chain reactions such as leakage and freeze-thaw damage, posing a threat to the safe operation of engineering. The existing temperature control system generally has deficiencies such as lagging regulation and insufficient coordination when dealing with special climates and complex structures, and urgently needs to construct a multi-scale coupled temperature control theory. The article focuses on the technological integration of material modification, intelligent monitoring, and dynamic control, exploring innovative paths for temperature control of large volume concrete to adapt to extreme environments, and providing theoretical support for improving the quality of water conservancy engineering in high-altitude arid areas.

Keywords: large volume concrete; hydration heat control; intelligent monitoring; layered pouring; water conservancy project

引言

西部某区域作为国家水利基础设施建设的重点区域,其独特的地理气候特征对混凝土施工技术提出特殊要求。该地区年均温差超过 40℃,干燥多风环境加速混凝土表面水分蒸发,导致温缩与干缩耦合效应显著。近年来,随着拱坝、输水隧洞等大体积混凝土结构的高度与跨度不断突破,结构内部水化热积聚现象愈发严重。传统温控方法依赖单一冷却手段,难以实现温度场演变与结构应力发展的动态平衡。现有监测系统存在空间分辨率不足、响应延迟等问题,无法精准捕捉温度梯度突变。施工过程中,环境因素与工艺参数的交互影响机制尚未完全明晰,导致温控措施与实际工况匹配度不足。这些技术瓶颈使得工程裂缝发生率长期居高不下,严重制约区域水资源调配系统的安全性,迫切需要通过技术创新建立适应特殊环

境的温控技术体系。

1 研究桥梁工程中混凝土施工技术及温控措施应用的现实意义

据权威数据显示,在桥梁工程中,混凝土结构在施工过程中最常见的病害是裂缝问题,该问题严重影响施工技术与温控措施的实际应用效果。为科学合理地解决这一病害,提升桥梁工程项目的耐久性与使用寿命,施工单位应高度重视施工阶段的温度控制工作。通过加强混凝土施工过程中的温度调控及其监测管理,可有效提高大体积混凝土施工技术的应用质量和控制水平。此外,还应对既有桥梁工程中混凝土施工技术及温控措施的实施现状进行深入分析,从中总结经验,发现问题,以实现技术与措施的针对性和适用性在实际工程中的有效落地。如此,方能有效预防和控制混凝土结构中裂缝的产

生,最大限度地保障桥梁工程建设的安全性与可靠性。

2 桥梁工程中大体积混凝土施工技术及温控措施的应用现状

2.1 技术应用层面存在的不足

当前大体积混凝土施工技术在复杂环境适应性方面仍存在显著短板。在部分工程项目中,骨料预冷系统的运行参数与设计方案存在偏差,导致混凝土入模温度超出允许范围,引发温度梯度超标现象。传统养护技术对极端气候的响应能力不足,尤其在强风干燥环境下,常规覆盖材料的保温保湿效能急剧下降,加速表面水分蒸发与温度波动。振捣工艺的机械化程度不足,导致结构内部密实度分布不均,形成局部薄弱区域^[1]。智能化设备的集成应用尚未形成完整体系,部分传感器布设位置与数量未考虑温度场三维传导特性,监测数据难以真实反映结构整体热力学状态。材料体系方面,低热水泥与掺合料的协同效应研究不足,实验室配比成果与现场施工条件匹配度较低,削弱了水化热控制的实际效果。

2.2 管理机制层面的薄弱环节

全过程温度控制管理存在系统化缺陷。施工组织设计中温控措施的专项规划深度不足,未能建立温度场演变与施工进度动态关联模型。现场监测数据的采集、传输与分析流程缺乏标准化体系,部分项目仍依赖人工记录与经验判断,导致温度调控存在滞后性。参建各方的责任界面划分模糊,设计单位提供的温控指标与施工单位实施能力之间缺乏有效衔接机制。质量验收环节对温度控制效果的评估过于依赖最终表观检查,忽视施工过程中的温度应力累积效应。技术交底内容未充分考虑一线作业人员的实操理解能力,先进温控设备的操作规范执行率普遍偏低。应急预案体系不完善,对突发温度异常事件的处置多依赖临时决策,缺乏系统化的处置流程与技术储备。

2.3 技术创新的实践瓶颈

新材料新工艺的工程转化面临多重障碍。实验室研发的低热混凝土配合比在施工现场受原材料波动影响,性能稳定性显著降低。智能温控设备的可靠性在恶劣工况下难以保障,沙尘侵入、温度骤变等环境因素导致传感器故障率升高。新型相变储能材料的大规模应用受成本制约,其长期耐久性与结构本体的相容性仍需验证。BIM 技术在实际温控管理中的应用多停留在三维可视化层面,未能实现温度场仿真与施工过程的深度耦合。技术标准体系更新滞后,现有规范对智能监测、动态调控等新技术缺乏针对性指导条款^[2]。产学研协同创新机制不健全,高校研究成果与工程实际需求存在代际差异,导致部分先进技术陷入实验室有效、工地失效的困境。人才梯队建设不足,既懂混凝土材料科学又掌握智能控制技术的复合型人才稀缺,制约技术创新成果的落地实施。

3 工程中大体积混凝土施工技术及温控措施的应用要点

3.1 混凝土施工技术优化

3.1.1 配比设计

大体积混凝土的配比设计需以热力学性能与结构耐久性为核心导向。在水利工程中,胶凝材料优先选用中热或低热硅酸盐水泥,并复合 30%~50%的粉煤灰与矿粉双掺体系,通过火山灰效应与微集料效应协同降低水化热峰值。粗骨料采用四级配优化组合,最大粒径控制在 80mm 以内以改善堆积密度,减少水泥用量;细骨料选用 MB 值 ≤ 1.0 的机制砂,严格控制含泥量 $\leq 2\%$ 。水胶比控制在 0.38~0.42 区间,在满足泵送要求前提下最大限度降低收缩变形。抗裂纤维掺量宜为 0.9~1.2kg/m³,形成三维网状阻裂结构。外加剂体系采用缓凝型聚羧酸减水剂与引气剂复合配方,初凝时间延长至 12~16h 时,使水化放热峰与混凝土弹性模量增长相匹配。对于水位变动区混凝土,需额外掺入 5%~8%的硅灰以提高抗渗性与抗冲磨性能。

3.1.2 搅拌运输

水利工程混凝土搅拌系统需配置骨料预冷车间,采用喷淋+风冷+真空汽化三级冷却工艺,将粗骨料温度降至 5℃ 以下。搅拌楼配备液氮速冷装置与冷水机组联动系统,确保出机温度 $\leq 12^{\circ}\text{C}$ 。运输罐车采用双层不锈钢罐体,夹层填充聚氨酯发泡保温材料,配置 5G 物联网温度监测终端,实时传输混凝土温度、坍落度等参数至调度中心。长距离运输时启用罐体间歇式低速搅拌模式,转速控制在 2~4r/min,避免拌合物离析。极端高温时段启动应急运输预案,运输路线沿途设置遮阳棚与喷雾降温点,确保混凝土入仓温度不超过设计允许值。对于坝体深槽部位浇筑,采用缆机+吊罐的垂直运输方式,吊罐配备电动液压卸料门与保温夹层,实现精准布料与温度控制的双重目标。

3.1.3 浇筑施工技术

大坝混凝土浇筑采用通仓薄层连续上升工艺,分层厚度控制在 0.8~1.2m 范围,层间间歇期按混凝土温升曲线确定为 5~7d。仓面配置激光整平机与变频振捣机组,振捣棒插入间距不大于振捣作用半径的 1.5 倍,确保骨料分布均匀。对于廊道、闸墩等复杂结构部位,采用自密实混凝土配合比,扩展度控制在 650 $\pm$ 50mm, T500 时间保持在 3~5s 区间。仓面环境控制系统包含移动式防风帷幕、智能喷雾装置与红外测温仪,维持浇筑区域风速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 、相对湿度 $\geq 90\%$ 的微环境。采用斜层铺料法施工时,倾角控制在 10°~15° 范围,每层铺料厚度不超过 50cm,防止骨料滚落导致离析。特殊气候条件下启用冬季暖棚法或夏季遮阳喷雾法,确保混凝土内外温差始终控制在规范允许范围内。

3.1.4 养护施工技术

水利工程混凝土养护实施全过程温湿度精准调控。初

期采用防水养护膜全覆盖+自动喷淋系统,水温与混凝土表面温差控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,喷淋间隔不超过 2h。中期启动预埋冷却水管系统,通水流量按 $1.0\sim 1.5\text{m}^3/\text{h}$ 调控,降温速率严格限制在 $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 范围内。对于闸墩、溢流面等关键部位,采用相变储能保温模板,其相变温度点设置为 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$,通过潜热交换缓冲昼夜温差冲击。智能养护平台集成分布式光纤测温、无线湿度传感与 BIM 模型,实现温度场三维可视化监控与预警。结构棱角部位采用纳米气凝胶毡多层包裹,局部补强区域设置电伴热系统,确保边缘部位与主体结构的同步降温。后期养护引入环境适应性过渡机制,保温层拆除按先内后外、分层分段原则进行,拆除速率与混凝土弹性模量增长曲线动态匹配^[3]。

3.2 温控措施运用控制

3.2.1 温控措施

水利工程大体积混凝土温控需建立全过程、多层次的综合防控体系。在坝体结构中,采用内降外保的总体策略:内部通过预埋冷却水管网络实现主动降温,管间距按 $1.0\sim 1.5\text{m}$ 呈梅花形布置,通水流量依据混凝土温度场实时反馈进行动态调节;外部则采用复合保温体系,迎水面设置 XPS 保温板与防渗膜复合结构,背水面敷设自适应气凝胶毡。针对不同结构部位实施差异化控制:基础约束区采用低热水泥+高掺合料+加密冷却管三重防护,将最高温升控制在 25°C 以内;自由区则通过优化浇筑层厚与间歇期实现自然散热。新型相变调温材料在闸墩等薄壁结构中应用效果显著,其相变温度点精确设定在 $35\sim 40^{\circ}\text{C}$ 区间,通过相变潜热吸收峰值热量。智能温控系统集成物联网与 BIM 技术,实现冷却水流量、水温与混凝土温度场的闭环控制,调控响应时间缩短至 15min 内。特殊气候条件下,仓面环境控制系统可自动调节防风帷幕角度与喷雾强度,维持浇筑区域稳定的温湿度环境。

在水利工程实践中,还需特别关注不同季节的温控策略差异。夏季施工重点强化预冷措施,采用骨料堆场遮阳+喷雾降温+冷水浸泡的组合工艺,将原材料温度控制在规范限值内;冬季则侧重保温防冻,建立暖棚加热+蓄热养护+温度监测三位一体的防寒体系。对于水位变动区混凝土,需额外考虑干湿交替条件下的温度应力变化,采用微膨胀型补偿收缩混凝土配合比,并在表面涂覆憎水型保温涂料。导流底孔等特殊结构部位的温控需与金属结构安装协调,预埋冷却水管避开锚固件位置,同时保证降温效果。近年来发展的智能温控材料,如温度敏感型水凝胶、形状记忆合金等,为水利工程温控提供了新的技术路径,这些材料能根据环境温度自主调节导热系数,实现更精准的温度调控^[4]。

3.2.2 温控监测

温度场感知技术正从离散点测量向全域场重构跃迁。分布式光纤传感系统通过布里渊散射频移解析技术,实现

0.05°C 温度分辨率与厘米级空间定位精度,其全分布式特性可完整捕捉结构内部温度梯度的三维分布特征。无线传感器网络的自组织优化算法突破传统监测的时空局限性,节点通过自适应跳频技术抵抗电磁干扰,在复杂施工环境下维持 98% 以上的数据完整率。非接触式监测技术的创新体现在太赫兹波谱分析的应用,通过混凝土介电常数与温度的相关性建模,实现无损伤的内部温度场反演,尤其适用于预埋传感器受限的薄壁结构。监测数据的智能解析依托数字孪生平台,将实时温度场与多物理场耦合模型动态校准,通过参数辨识算法不断优化模型精度,预测误差可控制在 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 范围内。异常诊断系统集成深度学习与知识图谱技术,通过温度场时空演变模式的模式识别,提前 12h 预警温度应力超限风险,并自动生成包含调控位置、强度与时序的优化方案。

3.2.3 施工阶段控制

全周期温控需构建环境-结构-工艺的多层次调控体系。浇筑阶段实施热环境主动营造技术,通过移动式空气幕系统将仓面风速控制在 2m/s 以下,结合超声波雾化装置维持表面湿度 $\geq 90\%$,形成抑制塑性收缩的微气候环境。升温期采用分区分级通水策略,核心高温区域配置双回路冷却管网,通过 PID 算法动态调节水温与流量,确保降温速率与混凝土弹性模量增长的协同性^[5]。降温阶段重点突破几何突变区域的温度梯度控制,在结构棱角部位部署柔性电热膜与微型冷却管的复合系统,通过局部主动调温将边缘温差梯度压缩至 $12^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以内。施工时序的智能决策依托多目标优化算法,综合考虑气象条件、资源供给与结构热力学响应,生成帕累托最优浇筑窗口方案,使温度超标概率降低 65% 以上。应急调控机制建立监测-评估-执行的快速响应链,当温差接近临界值时,自动触发三级联控程序:一级响应提升通水流量 20%,二级响应启动表面辐射加热,三级响应实施结构应力实时监测与临时支撑加固。质量追溯系统通过区块链与物联网融合技术,实现每个温控操作的时间戳记录与不可篡改存证,形成全生命周期的数字化质量档案。

4 结语

大体积混凝土温控技术的革新是保障水利工程长效运行的核心环节。本文通过系统梳理西部某区域工程实践经验,揭示环境-材料-工艺多要素耦合作用机制,提出基于智能感知与动态调控的温控技术框架。研究证实,相变储能材料与分布式光纤监测的协同应用,可显著提升温度场控制精度;环境响应型保温体系与智能通水系统的联合调控,有效抑制了温度应力集中现象。未来研究应进一步突破极端气候条件下混凝土水化热演变预测模型,开发具有自修复功能的智能温控材料体系。建议深化数字孪生技术在施工全过程的应用,通过虚拟仿真与实体工程的实时交互,实现温度控制的超前预判与精准执行。同时,需加

强多学科交叉研究,将新材料科学、物联网技术与传热学理论深度融合,构建适应复杂环境的大体积混凝土温控标准体系,为新时期水利工程高质量发展提供技术保障。

[参考文献]

- [1]罗美焰.公路桥梁工程施工中混凝土施工技术的应用[J].运输经理世界,2024(26):65-67.
[2]王强.道路桥梁工程中混凝土路面施工技术研究[J].交通建设与管理,2024(5):177-179.
[3]王强.道路桥梁工程中混凝土路面施工技术研究[J].交

通建设与管理,2024(6):91-93.

[4]李来东,赵海洋.市政道路桥梁工程施工技术应用及质量控制策略分析[J].运输经理世界,2025(5):107-109.

[5]成千兵.薄壁混凝土裂缝产生原因及防治对策[J].建材发展导向,2023,21(16):63-66.

作者简介:申秀峰(1982.4—),毕业院校:大专西京学院,在职本科:国家开放大学,所学专业:土木工程,当前就单位名称:新疆小海子水利建筑安装工程有限公司,就单位职务:分公司经理,职称级别:中级。