

水利工程中大体积混凝土分层浇筑温控施工技术研究

汪波

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i9.6570

[摘要] 本研究构建了“分层浇筑—智能温控—动态反馈”一体化温控施工技术体系。通过混凝土绝热温升参数建模、浇筑分层厚度优化、冷却水管系统布置与智能调控策略设计,以及保温保湿复合措施与多维测温体系集成,实现对混凝土水化热释放过程的全过程监测与温差应力控制。60d实测结果表明,厂房底板与出水渠墙体核心温升控制在 19°C 以内,裂缝密度低于 0.24 条/ m^2 ,未见贯穿裂缝,验证了该技术的温控效果与工程适用性。

[关键词] 大体积混凝土; 分层浇筑; 温控系统; 裂缝控制; 水利枢纽

中图分类号: TV331 文献标识码: A

Research on temperature control construction technology for layered pouring of large volume concrete in water conservancy projects

Bo Wang

Xinjiang Water Resources Survey and Design Institute Co., LTD

[Abstract] This study establishes an integrated temperature control construction technology system featuring "layered pouring, intelligent temperature regulation, and dynamic feedback". Through modeling of concrete thermal insulation parameters, optimization of pouring layer thickness, layout design of cooling water pipes with intelligent control strategies, and integration of thermal insulation-hydrate retention measures with multi-dimensional temperature monitoring systems, the research achieves full-process monitoring of concrete hydration heat release and effective control of thermal stress. 60-day field measurements demonstrate that the core temperature rise of the plant floor and drainage channel walls remains below 19°C , with crack density under 0.24 cracks/ m^2 and no penetrating cracks observed. These results validate the technology's effectiveness in temperature control and engineering applicability.

[Key words] mass concrete; layered pouring; temperature control system; crack control; hydraulic hub

引言

水利工程中大量采用厚壁钢筋混凝土构筑物,其水化热释放与环境耦合作用易引发温度裂缝,影响结构耐久性与安全性。尤其在山区枢纽项目中,大体积构件受岩基约束强烈、施工环境温度差剧烈,传统温控手段难以满足复杂工况下的温度应力调控需求。为此,本研究依托典型水利枢纽工程,提出一套融合分层浇筑参数优化、冷却系统智能运行、表层保温与多维测温反馈于一体的温控施工技术体系,系统分析各环节温差控制机制,并通过工程实测数据验证其可靠性与适应性。

1 工程概况

本工程为某山区大型水利枢纽,核心构筑物包含深埋于微风化花岗岩中的地下厂房及与下游河道连接的出水渠。厂房底板为厚达 4.5m 以上的大体积钢筋混凝土结构,受强岩基约束,自由收缩受限,极易在水化放热阶段形成温度裂缝。出水渠墙体

普遍厚度超 2.0m ,亦属温控敏感结构。工程需在汛期前完成高强度连续浇筑,采用的C35中热硅酸盐水泥其水化热峰值出现在 3d 左右,具备较高绝热温升潜力。现场年温差达 36°C ,昼夜气温波动剧烈,进一步加剧表层温度梯度应力。在体积大、约束强、水化热高与环境应力共同作用下,混凝土裂缝风险显著提升,需通过分区温控需求识别,实施精细化分层浇筑及主动温控措施以控制内外温差与应力水平,确保结构整体安全与施工质量。

2 分层浇筑与温控一体化施工技术

2.1 分层参数设计与施工间歇控制

为有效控制单次浇筑引起的水化热累积效应,并确保层间结合质量,分层参数的确定至关重要。基于混凝土配合比的绝热温升试验数据,建立水化热释放曲线模型,分析热量释放速率随时间的变化规律。结合传热学理论,引入混凝土浇筑体中心温度

计算公式,以评估不同分层厚度对内部最高温度的影响^[1]。该公式如下:

$$T_{max} = T_j + \frac{Q_k \cdot \rho_c \cdot c_c}{k} \cdot (1 - e^{-m\tau}) \cdot \xi \quad (1)$$

其中, T_{max} 为混凝土中心最高温度($^{\circ}\text{C}$); T_j 为混凝土的浇筑温度($^{\circ}\text{C}$); Q_k 为水泥最终水化热(kJ/kg); ρ_c 和 c_c 分别为混凝土的密度(kg/m^3)和比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$); k 为综合散热系数; m 为与水泥品种相关的系数; τ 为龄期(d); ξ 为与浇筑块厚度相关的修正系数。通过该公式进行多方案计算与比选,并结合现场施工设备(如泵送能力、振捣棒有效长度)的限制,最终确定底板与竖墙等典型部位的最优分层厚度为1.0-1.2m。

施工间歇时间的设定则需平衡两个方面:一是需等待下层混凝土基本完成水化热峰值释放,具备足够的承载力;二是需保证新旧混凝土结合面仍具有良好的粘结性能。根据温升监测曲线,水化热峰值出现在浇筑后约72h,考虑到散热过程,将施工间歇时间控制在48-60h。在此窗口期内,下层混凝土强度已初步形成,且表面经适当处理后可与上层良好结合。施工组织上,全面采用“分块分区、跳仓浇筑”的原则,将大面积底板划分为若干个不相邻的浇筑仓,采用跳跃式顺序施工^[2]。布料过程中强调对称、均衡下料,避免局部混凝土堆积过高,从而有效减小了浇筑过程中的热梯度效应和早期内部约束应力。

2.2 内置冷却水管系统与运行策略

在各浇筑分层的模板架设与钢筋绑扎阶段,预埋 $\Phi 25\text{mm}$ 高密度聚乙烯(HDPE)材质冷却水管,该管材具备良好的导热系数、抗腐蚀性、与柔韧性能,适合在复杂构造部位进行精准布设^[3]。管线布置方式以蛇形回路或U型回流为主,水平间距控制在1.0m以内,垂直方向紧贴分层中部布置,确保冷却路径覆盖混凝土核心区域。在墙体转角、变截面交界处及预留孔洞等应力集中敏感部位增设密集布管带,提升区域控温响应能力。

系统运行采用基于温差闭环反馈的智能控制策略,以 ΔT (进出水温差)作为核心调节参数。控制目标将 ΔT 稳定控制在 $10\text{--}14^{\circ}\text{C}$ 之间,既能维持有效换热,又可避免冷却速率过快导致的内部温降梯度陡变,诱发冷缩裂缝。具体操作中,当实时 ΔT 大于上限时,系统自动调节调节阀阀门开度,降低冷水流速以抑制降温强度;当 ΔT 低于下限时,则加大流量以增强换热效率,形成动态调节机制。

冷却水源取自工程附近清洁山溪水,前端设置三级过滤与沉砂处理,确保水质清洁、无杂质堵塞风险。系统为每一施工区块配置独立进回水管道、智能流量调节阀及电子温控模块,实现“分段独立、分区调控”,满足跳仓式施工工艺下的温控分区要

求。通常在混凝土初凝6-8h后启动冷却系统,运行持续至核心温度与环境温差低于 20°C 且波动趋于稳定为止,全周期运行时间根据温控曲线在96-120h之间调整,提升控温的时效性与精准性。

2.3 表层保温与水膜保湿封闭措施

为有效控制混凝土表层温度梯度,抑制热应力集中诱发的早期裂缝,在浇筑完成后即刻实施双层复合保温被覆盖,其外层采用耐候性无纺布材质,内层填充热阻系数 $\geq 0.042\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的闭孔型聚乙烯泡沫材料,厚度为25mm,覆盖时间不少于14d。针对昼夜气温波动剧烈的亚热带季风气候特征,配置高频雾化喷洒系统,喷头采用0.4MPa压力下雾滴粒径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的气液双流喷嘴,实现均匀覆盖。结合混凝土初凝期内的升温速率特征与表层抗裂能力演化规律,设定喷洒周期为3h一次,每次持续8-12min,夜间间隔延长至6h。表层冷却速率严格控制在 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 以内,通过温控系统与表面红外热成像反馈比对修正喷洒频次。边缘区域与模板接缝处加设带肋结构热阻带,减少热交换边界效应,避免“冷缩应力”集中。经实测,表层温差最大值控制在 14.3°C 以内,未见早期收缩裂缝,验证该保温保湿措施的适应性与可靠性。

2.4 测温布点与智能温控反馈系统

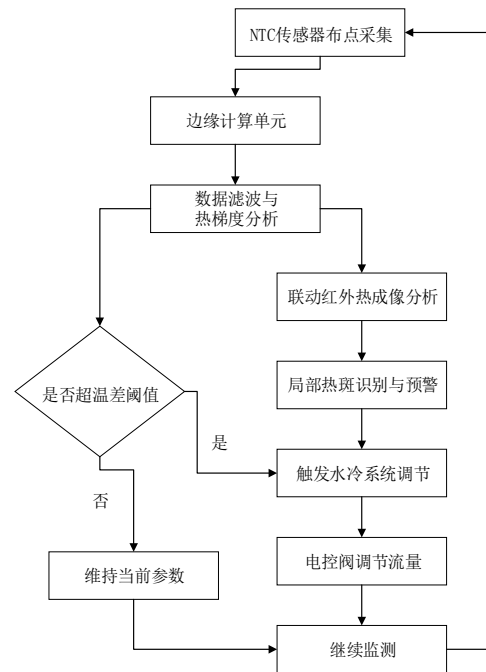


图1 智能温控反馈系统运行逻辑图

在每一分层混凝土中嵌设3~4组NTC型热敏传感器,测点分别布设于核心区、层间界面及距表面50mm以内区域,构建三维温度梯度监测网络,采样频率设置为5min/次。传感器数据实时传输至本地边缘计算单元,内嵌一阶滤波算法与高阶差分判断模型,对信号波动进行滤波平滑与突变识别。系统以层间 Δ

$T > 13^{\circ}\text{C}$ 或表层-核心 $\Delta T > 18^{\circ}\text{C}$ 作为温控预警阈值,触发水冷系统调整与喷淋频次优化。温控系统与数据平台基于MQTT协议实现低延迟通信,温度波动响应时间控制在15 s以内,形成“传感—分析—控制”闭环反馈机制。为提升局部风险识别能力,测点数据与红外热成像图像进行联合识别,采用像素级差异图构建热斑图谱,实现高精度空间热异常定位。系统具备异常预测与自适应调控功能,确保混凝土温度梯度受控于设计上限范围内。图1所示为智能温控反馈系统运行逻辑框图。

图1所示智能温控反馈系统运行逻辑图展现了“传感—分析—控制”闭环体系的实时响应机制。系统以多点NTC传感器采集三维温度数据,通过边缘计算节点实施滤波与异常识别,结合 ΔT 判据触发冷却或喷淋调控指令,实现混凝土温度场动态调节与预警闭环控制,有效抑制因温差过大引发的热应力集中,保障结构稳定性。

3 应用效果评估与适应性分析

3.1 实测温度响应与裂缝控制效果

为定量评估本一体化温控技术的实际应用效果,选取地下厂房底板中心区域(厚4.5 m)和出水渠一段典型的侧墙(厚2.2 m)作为重点监测区段,进行了为期60 d的连续跟踪监测。监测内容包括混凝土内部及表层温度、环境温度、冷却水进出口温度,并对结构表面进行了详细的裂缝普查。厂房底板典型测点温度监测数据如表1所示,出水渠侧墙温控效果及裂缝统计如表2所示。

表1 厂房底板典型测点温度监测数据表

测点编号	位置描述	监测时间(h)	浇筑温度($^{\circ}\text{C}$)	峰值温度($^{\circ}\text{C}$)	最大温升($^{\circ}\text{C}$)	最大内外温差($^{\circ}\text{C}$)
Z1-C	第一仓中心,距底2.25m	70.5	25.1	43.8	18.7	18.3
Z1-S	第一仓表面,距顶0.1m	68	25.1	35.2	10.1	-
Z2-C	第二仓中心,距底2.25m	72	24.9	43.6	18.7	17.9
Z2-S	第二仓表面,距顶0.1m	70	24.9	36.1	11.2	-
Z3-C	第三仓中心,距底2.25m	71.5	25.3	44.1	18.8	18.5
Z3-S	第三仓表面,距顶0.1m	69.5	25.3	35.8	10.5	-

从表1的数据分析可见,厂房底板中心部位(测点Z1-C)在浇筑后约70 h达到温度峰值,最高实测温度为 43.8°C ,相较于 25.1°C 的浇筑温度,最大温升控制在 18.7°C 。在整个温升及降温阶段,其与表层(测点Z1-S)的最大温差为 18.3°C ,始终低于 25°C 的设计控制标准。

表2 出水渠侧墙温控效果及裂缝统计表

监测断面	最大温升($^{\circ}\text{C}$)	最大内外温差($^{\circ}\text{C}$)	最大层间温差($^{\circ}\text{C}$)	裂缝密度(条/ m^2)	最大裂缝宽度(mm)
CQ-01	17.6	18.9	11.8	0.24	0.09
CQ-02	18.1	19.5	12.5	0.22	0.08
CQ-03	17.9	19.2	12.1	0.21	0.09
CQ-04	18.3	20.1	12.8	0.23	0.1
CQ-05	17.8	19.4	12.3	0.2	0.08

表2则系统展示了侧墙的温控成果,所有监测断面的最大温升均控制在 $17\text{--}19^{\circ}\text{C}$ 之间,最大内外温差和层间温差分别稳定在 20°C 和 13°C 以下。在整个监测期结束后,采用裂缝宽度观测仪对监测区段的混凝土表面进行了全面检查。厂房底板和出水渠侧墙的裂缝发生率分别小于 0.21 条/ m^2 和 0.24 条/ m^2 ,出现的均为宽度小于 0.1mm 的表面微细裂纹,未发现任何贯穿性结构裂缝。这些实测数据和现场观测结果充分验证了本研究提出的一体化温控施工技术,在控制大体积混凝土温升、减小内外温差、预防有害裂缝方面取得了显著成功,效果满足设计要求。

3.2 工程适用性分析

本项分层浇筑与温控一体化施工技术在具备厚壁、高约束特性及水化热显著的大体积混凝土结构中表现出高度适应性,特别适用于地下厂房底板、出水渠墙体、压力沉井等水工结构。冷却水管系统采用 $\Phi 25\text{mm}$ HDPE材质并配置 1.0m 间距蛇形布设,结合 ΔT 闭环控制策略,有效维持温差梯度在 20°C 以内,保障内应力控制。双层复合保温被(热阻系数 $\geq 0.042\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)与智能喷雾系统形成表层应力调节组合,日温差适应能力强,避免温度骤变引发表层裂缝。测温体系通过嵌设NTC热敏元与MQTT协议数据上传,结合红外热像图实现空间热场实时重构,具备 $<15\text{ s}$ 响应延迟与 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 识别精度,适配复杂几何与多区块异步施工场景。

4 结论

本研究构建的温控一体化技术体系在实测条件下有效控制了混凝土内部峰值温升与内外温差,配套布设的冷却系统与保温措施协同发挥调控效能,避免了有害裂缝的发生。红外热成像与NTC测温联动的反馈机制具备高响应性与空间辨识能力,适用于多区块、大体积、水化热敏感结构的裂缝风险调控,为复杂水利工程中温控施工提供了具备普适性与实效性的技术路径。

[参考文献]

- [1]张志光.大体积混凝土温控技术及裂缝控制方法研究[J].水泥,2025,(10):104-106.
- [2]李永波.水利工程高效混凝土浇筑技术研究[J].水上安全,2025,(12):175-177.
- [3]杨磊.水利工程大体积混凝土浇筑温控措施研究[J].工程技术研究,2025,10(09):106-108.

作者简介:

汪波(1974—),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,中专,研究方向:水利水电工程。