

# 复杂环境下高铁桥梁大体积混凝土温控防裂施工工艺

刘春晓

山东省路桥集团, 山东省济南市, 250000;

**摘要:** 针对复杂气象边界条件下高铁桥梁大体积混凝土温控与早期开裂风险问题, 围绕赣江特大桥 0#块施工实践开展研究。通过构建配合比与冷却系统协同控制方案, 结合分层分块浇筑、智能温度监测预警以及全龄期防风保湿养护措施, 对混凝土温度场与应力演化进行系统调控, 并利用温度监测数据、数值仿真与现场检测结果对施工效果进行综合分析。研究表明, 该技术体系能够有效控制温升与里表温差, 降低早龄期温度应力并抑制裂缝产生, 结构表面质量与整体安全性满足工程要求。研究提出的温控防裂闭环施工模式为复杂环境下高铁桥梁大体积混凝土施工提供了可复制的技术路径。

**关键词:** 大体积混凝土; 温度控制; 裂缝控制; 智能监测; 高铁桥梁

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.05.062

## 引言

高铁桥梁大体积混凝土在施工阶段易受水化热、环境温度差及风速变化等因素影响, 温度梯度与收缩变形耦合作用易引发早期开裂风险<sup>[1]</sup>。在河谷等复杂气象条件下, 昼夜温差和对流换热增强, 传统经验型温控措施难以满足高等级桥梁结构耐久性与安全性的要求。因此, 有必要建立系统化温控防裂技术体系, 通过材料设计、冷却调控、实时监测与养护管理等多环节协同控制, 实现温度场与应力场的协调调节。以赣江特大桥 0#块工程为例, 对大体积混凝土温控防裂施工工艺及其应用效果进行研究, 为类似桥梁工程提供参考。

## 1 工程概况

本研究以赣江特大桥 0#块大体积混凝土为案例。桥梁为 350 km/h 双线无砟轨道线路, 主跨 140 m 连续梁拱组合体系。0#块一次浇筑方量 2 880 m<sup>3</sup>, 混凝土强度等级为 C50 P60。场地气象季节差异明显, 夏季昼夜温差约 15 °C, 冬季寒潮 12 h 内降温约 10 °C, 相对湿度约 78%, 风速 3~7 m/s, 温度梯度与失水速率叠加, 使温控与抗裂难度增大。承台尺寸 12.8 m×28.4 m×4.5 m, 胶凝材料 460 kg/m<sup>3</sup>, 水胶比 0.32。控制目标为温升不超过 35 °C、里表温差不超过 20 °C, 养护期防裂系数  $K \geq 1.8$ 。施工组织通过配合比优化、分层浇筑、通水冷却、智能监测及全过程养护形成闭环温控防裂体系。

## 2 复杂环境下大体积混凝土温控防裂关键施工工艺

### 2.1 配合比-冷却协同优化与分层分块浇筑方案

鉴于赣江河谷昼夜温差与风速共同放大的温度梯度, 本研究把水化放热与对流散热的耦合作为约束核心, 选用 42.5 低热硅酸盐水泥叠加 I 级粉煤灰 30% 与 S95 矿粉 10% 的三元胶凝体系, 稳定 7 d 累计水化热至 230 kJ/kg, 并把胶凝材料总量控制为 460 kg/m<sup>3</sup>, 以削弱热峰叠加效应与长期收缩源项的同步放大。结合拌和站 90 m<sup>3</sup>/h 的连续供料能力, 开展水胶比 0.30 至 0.34 的梯度拌合与流动性保持评估, 在减水剂掺量 1.2% 条件下, 坍落度维持在 180 mm, 满足 ≤0.75 m 分层入仓时的泵送与二次振捣要求<sup>[2]</sup>。

冷却系统把内源热峰的形成期与强散热窗口进行对齐, 布置 φ32 mm HDPE 冷却水管, 按水平 1.0 m 与垂直 0.8 m 的矩形网格均匀排布, 单回路通水流量 18 L/min, 进口水温控制 18 °C, 干管沿 28.4 m 长边布置并与回水集管闭合, 从而在热中心区域形成等温带的有序展开。因此, 现场浇筑把仓面温度控制在 12~16 °C 之间, 层间间歇 6~8 h, 通过时间错峰降低热峰重合概率并把里表温差维持在可控区间。见表 1, 水胶比 0.32 方案对应的绝热温升峰值为 34.2 °C, 据此选定为 0#块目标配合比, 同时把冷却管网的网格尺度与分层厚度进行协同, 使后续温控计算与现场管路安装参数保持一致性。

表 1 配合比参数与绝热温升试验结果

水胶比	胶凝材 kg/m <sup>3</sup>	水泥类型	粉煤灰 %	矿粉 %	外加剂 %	坍落度 mm	7 d 水化热 kJ/kg	绝热温升 °C	说明
0.30	460	42.5 低热硅酸盐	30	10	1.2	180	228	33.6	备选
0.32	460	42.5 低热硅酸盐	30	10	1.2	180	230	34.2	推荐用于 0#块
0.34	460	42.5 低热硅酸盐	30	10	1.2	180	231	34.0	备选

### 2.2 智能温控监测预警系统与通水动态调控

为应对赣江河谷昼夜温差大、风速波动明显所导致的传热边界变化，本研究建立混凝土温度智能监测与动态调控体系<sup>[3]</sup>。沿结构厚度方向布置 5 层监测截面，每层设置 3 个 PT100 铂电阻传感器，测温精度±0.1 °C。设备经出厂比对和现场三点校核后投入使用，数据采集周期为 10 min。现场 PLC 完成时钟同步、噪声过滤与数据标记，并通过 5G 网上传至云端平台，构建温度、通水及气象数据统一时间轴，为预警与调控提供基础。

预警机制采用里表温差ΔT<sub>1</sub>与降温速率ΔT<sub>2</sub>双阈值判据，阈值分别为 18 °C和 2 °C/d。任一指标超限即启

动分级干预，PLC 优先调节冷却回路和通水温度，云端结合历史数据修正控制参数，使降温速率控制在 1.0 °C/d 以内。同时建立通水温度自动调节模型，并与回水温度、流量及压差联动，以降低强对流引起的温度波动<sup>[4]</sup>。浇筑后 0~120 h 监测数据统一整理为标准记录，用于动态调控与效果评估。相应指标在表 2 中汇总。

$$T_{out}=18+0.8 \cdot (T_{core}-T_{target}) \quad (1)$$

其中，T<sub>out</sub> 表示冷却回路进口水温，单位为 °C；T<sub>core</sub> 为混凝土热中心温度，单位为 °C；T<sub>target</sub> 为基于龄期与边界条件设定的目标温度轨迹，单位为 °C；系数 0.8 为联控增益的无量纲参数，用于平衡响应速度与温度波动幅度。

表 2 0#块典型时段温控监测数据

时间 h	核心温度 T <sub>core</sub> °C	表面温度 T <sub>surf</sub> °C	里表温差 ΔT <sub>1</sub> °C	降温速率 ΔT <sub>2</sub> °C/d	通水温度 T <sub>out</sub> °C	预警状态
6	26.5	25.4	1.1	0.0	18.5	正常
12	36.8	31.2	5.6	0.0	19.0	正常
24	48.9	35.7	13.2	0.0	19.6	正常
36	52.4	33.3	19.1	0.0	20.2	ΔT <sub>1</sub> 预警
48	51.7	36.0	15.7	1.4	19.8	正常
72	49.5	37.6	11.9	0.9	19.2	正常
96	48.0	36.9	11.1	0.9	18.8	正常
120	46.2	35.9	10.3	0.9	18.5	正常

### 2.3 全龄期养护与二次抹面抗裂技术

为减弱赣江河谷高风速与昼夜温差对早龄期混凝土蒸发与散热的不利影响，建立覆盖初凝至 7 d 的全龄期防风保湿养护体系<sup>[5]</sup>。初凝后约 2 h，在混凝土表面覆盖双层土工布及 0.12 mm PE 薄膜，搭接宽度不小于 30 cm，以减少对流换热并降低蒸发通量；顶部布置微喷头进行间歇喷雾，使表面相对湿度保持≥90%。侧模采用 18 mm 组合木模板，外侧铺设 50 mm 岩棉保温层，以减弱外界换热并降低温度梯度。

当混凝土强度达到拆模要求后，及时拆除覆盖层和侧模，喷涂水基养护剂 0.2 kg/m<sup>2</sup>形成保护膜，并通过滴灌方式持续保湿养护 7 d。为抑制塑性收缩裂缝，在终

凝前实施二次抹面，封闭毛细通道并提高表层密实度。同时设置挡风措施并调节喷雾强度，使表面风速控制在 ≤0.5 m/s，从湿度、风速和温差三方面协同控制，为结构后期抗裂性能提供稳定条件。

## 3 温控防裂效果评估与工程闭环验证

### 3.1 温度-应力场仿真与开裂风险判定

本研究把 0#块置于赣江河段昼夜温差与风速波动叠加的热湿耦合情境中，运用 MIDAS FEA 构建 1/4 对称三维实体模型，单元边长 0.5 m。热源输入为表 1 对应三元胶凝体系的水化热时程，外表面按表 2 的通水温度、回路流量与现场气象序列构成时变对流边界，时间

步长与监测一致为 10 min。力学求解采取顺序耦合策略，温度场求解完成后把体膨胀应变与基础约束映射至结构场，选用线弹性与徐变协同本构表征早龄期变形，弹性模量与抗拉强度按龄期折减规律更新，获得 0 至 120 h 的应力演化轨迹。计算显示，热中心区在 48 h 出现等效拉应力峰值 1.47 MPa，此时特征抗拉强度取 0.9 MPa，代入控制系数 1.8 进行判定，应力强度比为 1.63，表明早期开裂风险处于可控高区，需把降温速率与表面散热持续压低以避免峰值前移与应力集中。

$$\sigma_t = K \cdot f_{ctk}(t) \quad (2)$$

其中， $\sigma_t$  表示计算得到的等效拉应力，单位为 MPa，K 为抗裂安全系数的控制系数，本研究取值 1.8， $f_{ctk}(t)$  为龄期 t 的特征抗拉强度，单位为 MPa，用于与温度应力进行对比以开展安全边界判定。为进一步验证数值分析结果与实际施工效果之间的一致性，对 0#块结构表面开展现场裂缝观测与无损检测统计。

### 3.2 现场开裂观测与无损检测统计

在 7 d 养护结束并撤除覆盖层后，对 0#块开展全面检查。考虑顶面与边缘部位热湿边界条件差异，将顶面、侧面和倒角划分为独立巡检区，并沿构件长向按 5 m 步距布设检查路线。现场检查以目视结合刻度放大镜进行判别，区分线状反光、收面拉痕与真实裂缝；对可疑裂缝用细色笔标注端点，利用钢卷尺测量长度并记录位置坐标。为获取裂缝深度信息，采用手持式超声裂缝测深仪进行抽检，在裂缝两侧布置换能器完成耦合，每条裂缝设置不少于 2 个测点，并在邻近无裂区域布置对照点，以减小材料非均质对测试结果的影响。通过识别、量测与深度检测的结合，实现裂缝位置与深度的同步记录，

并与温控监测数据形成对应分析。

现场统计结果表明，共发现裂缝 3 条，均位于顶板倒角处，承台顶面中央及侧面未发现贯通裂缝。单条裂缝最大长度为 26 cm，超声检测最大深度为 9 mm，声时曲线未表现出贯通特征。按裂缝总长度与检测面积计算，裂缝率为 0.18 m/100 m<sup>2</sup>，明显低于铁路桥涵施工质量验收限值 2 m/100 m<sup>2</sup>。综合分析认为，倒角部位散热条件较强且应力易集中，可能形成裂缝敏感区，后续运维应加强该部位的巡检与记录，以维持温控与养护措施的长期效果。

### 3.3 综合效果量化评估

围绕赣江特大桥 0#块温控与防裂实践，构建涵盖温度、应力、表面质量、施工组织与经济效益的五维度评价体系。评价以结构安全为核心，同时兼顾施工可操作性与投入产出关系。温度分项主要考察温升峰值、里表温差及降温速率是否满足控制指标；应力分项通过抗裂系数 K 与早龄期等效拉应力的匹配程度评估安全储备；表面分项依据倒角微裂、表层致密度及裂缝率进行现场记录；施工分项重点评价管网布置、供料节奏、监测联动及通水调控的协调性；经济分项综合分析冷却与保温投入对返工与工期风险的抵消效果。

综合评分见表 3，总分 92 分，等级为优秀，说明该温控防裂工艺在厚大构件及复杂边界条件下具有良好的稳定性和适用性。对于同类型高铁桥梁 0#块工程，在保持配合比—冷却协同、分层浇筑、智能监测及全龄期养护等核心流程不变的前提下，可进行推广应用。同时，应结合区域温差与主导风向对冷却管间距及通水温差进行参数化修正，形成标准化施工与决策依据。

表 3 温控防裂效果综合评分表

评价维度	权重分值	评分	评分依据简述
温度控制	30	30	温升控制不高于 35，里表温差不高于 20，降温速率受控，温度场演化平稳，未出现越限波动。
应力-安全系数	25	23	抗裂系数 K 满足控制目标，等效拉应力与特征抗拉强度匹配，风险处于可控区间，干预策略与阈值对齐。
表面缺陷	20	19	顶板倒角出现少量浅裂，无贯通迹象，裂缝率显著低于验收限值，表层致密度与完整性记录良好。
施工可操作性	15	14	管网安装与入仓组织衔接顺畅，监测与通水联动稳定，调控指令闭环执行，现场干扰对工序影响较小。
经济效益	10	6	冷却与保温投入增加，但减少修补与延误风险，综合成本可控，具备在同规模工程中的推广性价比。
总分	100	92	工艺等级判定为优秀，满足结构安全与组织实施的双重要求，具备跨项目复制与参数化迁移潜力。

## 4 结语

以赣江特大桥 0#块大体积混凝土施工为研究对象,通过配合比优化、冷却管网布置、智能温度监测及全龄期养护等技术措施,构建了温控防裂协同施工体系,并结合温度监测、数值分析与现场检测对实施效果进行了验证。研究表明,该技术体系能够有效控制混凝土温度场演化,降低温度应力集中并显著减少早龄期裂缝风险,同时兼顾施工组织与经济性要求。工程实践证明,该方法在复杂环境条件下具有良好的稳定性和适用性。未来在类似工程推广应用时,应结合区域气候特征与施工条件,对冷却系统参数与养护策略进行适应性优化,以进一步提升温控防裂效果。

## 参考文献

- [1] 卫雪剑. 大体积混凝土施工期温度裂缝智能控制研究[J]. 陶瓷, 2026, (02): 183-185.
- [2] 何波. 桥梁大体积混凝土施工技术及温控措施[J]. 交通世界, 2026, (Z2): 204-206.
- [3] 张超. 建筑大体积混凝土裂缝成因与控制[J]. 中国建筑装饰装修, 2026, (03): 184-186.
- [4] 万国锋. 高层建筑基础大体积混凝土结构抗裂监测分析[J]. 江西建材, 2024, (12): 113-116.
- [5] 孙佳飞, 李颖. 建筑工程中混凝土裂缝控制与施工技术研究[J]. 建筑与预算, 2024, (12): 67-69.

作者简介: 刘春晓(1998.10.11-), 男, 汉族, 籍贯: 山东省滨州市博兴县, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 交通工程。