

水利工程建设中混凝土施工温度裂缝控制技术研究

刘跃辉

新疆伊宁市水利局

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6391

[摘要] 与普通建筑工程相比,水利工程混凝土具有结构体积庞大、服役环境复杂、荷载条件特殊等特点。大坝、闸墩、输水隧洞等典型水利建筑物在施工期面临剧烈温度变化引发的裂缝风险,这种因温度应力导致的非结构裂缝往往成为影响工程质量的关键因素。本文针对水利工程特有的技术特征,系统阐述温度裂缝形成机理与控制技术体系,构建适应水利工程需求的裂缝防控策略。

[关键词] 混凝土结构; 水利工程; 裂缝控制

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Research on Temperature Crack Control Technology in Concrete Construction of Hydraulic Engineering

Yuehui Liu

Yuehui Liu

Water Resources Bureau of Yining City

[Abstract] Compared with ordinary construction projects, concrete in hydraulic engineering is characterized by large structural volumes, complex service environments, and special load conditions. Typical hydraulic structures such as dams, gate piers, and water conveyance tunnels face the risk of cracking caused by significant temperature variations during the construction period. These non-structural cracks resulting from thermal stress often become a critical factor affecting project quality. In response to the unique technical characteristics of hydraulic engineering, this paper systematically elaborates on the formation mechanism of temperature cracks and the control technology system, constructing a crack prevention and control strategy tailored to the needs of hydraulic engineering.

[Key words] Concrete structures; Hydraulic engineering; Crack control

前言

在水利工程建设领域,混凝土结构作为工程主体的核心组成部分,其质量直接关系到工程安全与运行寿命。与普通建筑工程相比,水利工程混凝土具有结构体积庞大、服役环境复杂、荷载条件特殊等特点。大坝、闸墩、输水隧洞等典型水利建筑物在施工期面临剧烈温度变化引发的裂缝风险,这种因温度应力导致的非结构裂缝往往成为影响工程质量的关键因素。

1 水利工程混凝土结构特征

水利工程中的混凝土结构因其特殊的工程特性和服役环境,呈现出显著的技术特征与耐久性挑战。首先,大体积结构(如重力坝、闸墩等)截面尺寸常达数米至数十米,水泥水化累积热效应导致内部温升超40℃,形成20-30℃的内外温差梯度,易引发深层温度裂缝。其次,复杂环境作用加剧耐久性风险:水位变动区的干湿交替诱发裂缝内毛细吸附-结晶膨胀;冻融循环使裂缝尖端水分相变产生9%体积膨胀;高速水流冲刷通过空蚀-磨蚀协同作用导致材料剥离。此外,强约束条件下,混凝土收缩受基础

岩体(弹性模量10-30GPa)或相邻浇筑块约束(约束系数 ≥ 0.7 时收缩应力达2-4MPa),易形成贯穿性裂缝,其扩展受主应力方向与骨料界面过渡区薄弱环节共同控制。为保障50-100年设计寿命,需综合裂缝自愈(矿物掺合料二次水化)、高抗渗防护层($\geq W8$)及结构性修复等措施,确保裂缝控制体系的长期有效性。

2 温度裂缝形成机理

2.1 形成机理

温度裂缝的形成机理可解析为热力学-力学-环境多场耦合作用下的材料失效过程,其演化遵循非线性断裂动力学规律。

在水化热与温度场分布层面,大体积混凝土内部热传导遵循傅里叶定律($\partial T/\partial t = \alpha \nabla^2 T + Q_v/\rho c$),其中水化放热率 $Q_v(t) = \Sigma k_i \exp(-t/\tau_i)$ 呈现多指数衰减特性。早期阶段($t=3-7d$)绝热温升 ΔT_{max} 可达45-60℃,形成径向温度梯度($\nabla T \geq 4^\circ C/m$),此时基于弹性-徐变理论的温度应力场计算表明,表面拉应力 $\sigma_{therm} = \alpha_c E_c \Delta T / (1 - \nu_c)$ 可达3.5-5.2MPa,超过C30混凝土早

期抗拉强度 ($f_{ct}=1.8-2.5\text{MPa}$) 的1.4-2.1倍, 导致表层产生 I 型主导的龟裂网络。

收缩与约束效应方面, 混凝土降温阶段 ($t>28\text{d}$) 的体积收缩应变 $\epsilon_{sh}(t)=\epsilon_{sh\infty}[1-\exp(-kt)]$ 受基础强约束时 (约束度 $\beta\geq 0.7$), 根据弹性地基梁理论, 约束应力 $\sigma_{restraint}=\beta E_c \epsilon_{sh}$ 可达2.8-4.3MPa。当 $\sigma_{restraint}/f_{ct}\geq 1.2$ 时, 裂缝沿最大主应力方向扩展形成贯穿性裂缝, 其扩展路径受骨料界面过渡区 (ITZ) 断裂韧度 $K_{IC}(0.3-0.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ 控制。

环境交互作用通过湿-热-力耦合机制加速裂缝演化。库区水位变动引发干湿循环, 依据 Kelvin-Laplace 方程, 裂缝内毛细压力 $P_c=2\gamma\cos\theta/r$ (r 为裂缝等效半径) 在干燥阶段可达 -10MPa 量级, 导致裂缝尖端产生 II 型剪切分量 ($K_{II}/K_I\geq 0.3$): 低温施工时 ($T<5^\circ\text{C}$), 表层混凝土热收缩系数 α_s 与内部 α_i 存在差异 ($\Delta\alpha=\alpha_s-\alpha_i\geq 5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), 形成附加温度梯度 $\Delta T_{env}=15-20^\circ\text{C}$, 叠加水化热梯度后总拉应力增幅达20%-30%。冻融循环环境下, 基于 Clapeyron 方程的相变压理论表明, 当裂缝内饱水度 $S\geq 0.91$ 时, 冰晶生长产生的膨胀压 $\Delta P_{ice}\approx 207\text{MPa}$, 使裂缝宽度扩展速率提升至1.2-1.8 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ 。

2.2 案例分析

以新疆为例, 该地区极端温差特征显著, 以吐鲁番盆地为代表的区域昼夜温差达20-30 $^\circ\text{C}$, 致使混凝土表面单日内经历3-5次热胀冷缩循环, 这种周期性温度应力直接加速了材料内部微裂缝的萌生与发展。强蒸发干燥环境构成另一关键因素, 塔里木盆地等区域年均湿度低于40%, 新浇筑混凝土水分蒸发速率高达1.5-2.0 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 显著增大了塑性收缩开裂风险。此外, 北疆地区年冻融循环次数超过100次, 冬季极端低温达-40 $^\circ\text{C}$, 温度裂缝在冻融过程中演变为水分渗透的优先通道, 进一步加剧结构损伤。地质条件方面, 阿尔泰山区砾石层等强透水基础加速混凝土内部水分迁移, 引发非均匀收缩应力; 南疆灌区盐渍土中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等腐蚀性离子则通过温度裂缝侵入, 诱发钢筋锈胀及混凝土保护层开裂。由此可见, 新疆水利工程建设中混凝土施工温度裂缝形成原因可归结为三方面: 水泥水化反应释放的热量导致内部温度梯度骤增, 形成核心温升区; 环境温度剧烈波动 (包括昼夜温差、季节温差及库区水温变化) 促使表面收缩应力集中; 施工过程中浇筑速度控制不当、分层厚度超标等工艺缺陷, 则导致热量积聚与散热不均。这些因素共同构成新疆地区混凝土温度场变异的典型特征, 最终表现为温度裂缝的多发性和扩展性, 对工程耐久性构成严峻挑战。

3 温度裂缝控制关键技术

3.1 材料优化

材料体系的科学选择是温度控制的基础环节。低热硅酸盐水泥的应用可降低30%以上的水化热峰值, 配合矿物掺合料的协同作用, 显著改善混凝土热学特性; 粉煤灰、矿粉等活性掺合料的掺入比例需根据结构部位差异进行优化, 大体积内部混凝土可采用40%以上的高掺量方案, 表层抗冲磨部位则控制在20%以内; 骨料级配优化着重提高堆积密度, 采用三级配或四级配骨料

体系, 减少水泥用量同时提升体积稳定性; 减水剂的选择应兼顾工作性保持与放热曲线调节功能, 新型聚羧酸系外加剂可实现坍落度损失控制与缓凝效果的协同作用; 当前材料研究的前沿领域聚焦于相变材料的工程化应用, 通过微胶囊技术将石蜡类相变物质掺入混凝土, 在温度升高时吸收热量, 降低温升幅度。同时, 纳米材料的引入改变了水泥水化进程, 纳米二氧化硅的成核效应可细化水化产物结构, 在降低总放热量的同时提升早期强度发展速率。

以新疆为例, 新疆气候干燥昼夜温差大, 混凝土易因早期水化热集中和后期干缩而产生裂缝。因此, 胶凝材料的选择和配比尤为关键。采用中热水泥 (P·MH42.42.5) 替代普通硅酸盐水泥, 可降低7天水化热至230 kJ/kg 以下, 减少温升峰值。同时, 复掺30%粉煤灰和10%矿渣微粉, 利用矿物掺合料的二次水化反应延迟放热, 使混凝土内部温升降低12~15 $^\circ\text{C}$, 并改善后期强度发展。为减少塑性阶段水分蒸发, 在拌合物中掺入木质素磺酸钙 (0.25%) 和羟丙基甲基纤维素 (0.1%), 形成保水膜结构, 使新拌混凝土泌水率控制在0.8%以下, 有效减少表面塑性裂缝。骨料级配优化同样重要。采用天山北麓花岗岩机制砂 (细度模数2.8~3.1) 和三级配碎石 (5~20mm占比60%), 可降低空隙率至16%以下, 减少胶凝材料用量, 进而降低水化热。在夏季施工时, 通过骨料喷雾预冷将温度控制在10~15 $^\circ\text{C}$; 冬季则采用地坑蓄热法, 使骨料温度维持在5 $^\circ\text{C}$ 以上, 避免因温差过大导致混凝土内部应力集中。

3.2 施工工艺优化

施工工艺的温度控制体系包含三个关键维度。分层浇筑技术通过合理划分浇筑层厚, 创造散热条件, 对于基础约束区采用1.5-2.0米薄层浇筑, 上部非约束区可增至3-4米。冷却水管布置需根据结构特征进行立体化设计, 在高温区实施加密布管, 管间距控制在0.8-1.2米范围, 形成有效的热交换网络; 温度监测系统应实现全断面覆盖, 在典型断面布置五层以上测温点, 实时监测芯部与表层温差变化; 振捣工艺的精细化控制对温度场均匀性具有重要影响, 采用变频振捣设备实现不同部位的差异振捣, 避免过振导致骨料下沉引发的热学参数变异。现代施工技术正在向智能化方向发展, 基于 BIM 的施工模拟系统可预演温度场发展过程, 优化浇筑方案; 自动温控系统通过实时调节冷却水流量与温度, 将混凝土内部温差控制在设计阈值内; 层间间歇期的科学控制对温度应力消减具有显著作用, 通过延长下层混凝土的散热时间, 使上下层混凝土弹性模量发展趋于同步, 有效降低层间约束应力。

针对新疆大体积混凝土施工的温度控制难题, 可以建立系统的温控技术体系。在浇筑时段选择上, 为避免夏季高温影响, 采用“昼避夜浇”的施工策略, 将主要浇筑作业安排在夜间20:00至次日10:00进行, 确保入模温度控制在22 $^\circ\text{C}$ 以下。在浇筑工艺方面, 实施差异化分层浇筑方案: 对于应力集中的基础约束区采用1.0-1.2m的薄层浇筑, 自由区则采用2.0-2.5m的较厚分层, 并将层间间歇期优化为4-5天, 有效控制新旧混凝土的温差。温度

调控采用科学的三阶段通水冷却技术: 浇筑前6小时通过10℃冷水进行预冷处理; 浇筑后24-72小时的关键期采用14℃冷水以18L/min的流量控制温升速率; 72小时后转入缓释期, 改用20℃循环水进行缓慢降温。同时, 在混凝土表面布置可移动轴流风机配合雾化喷淋系统, 通过3-5m/s的风速和均匀的水雾覆盖, 将表面散热系数提升至25W/(m²·K), 实现内外温差的精准控制。

3.3 养护技术

养护环节的温度调控需要建立动态管理体系。初期养护重点在于抑制表面水分蒸发, 采用喷涂成膜养护剂与覆盖保湿材料的复合工艺, 使混凝土表面湿度持续保持在85%以上。中期养护着重控制降温速率, 通过循环冷却水系统将日降温幅度控制在1.5℃以内。保温材料的选用需考虑水利工程露天环境特点, 使用防水型复合保温被替代传统草帘, 既保证保温效果又避免吸水增重带来的施工困扰。拆模时间的确定应基于温度监测数据, 当芯部与表面温差小于15℃且日气温波动小于8℃时方可进行模板拆除作业。新型养护技术的发展为温度控制提供了更多选择, 例如电热养护技术通过植入导电混凝土实现均匀加热, 适用于寒冷地区施工; 自修复养护剂可在混凝土表面形成具有形状记忆功能的保护膜, 根据温度变化自动调节透气性。这些创新技术正在改变传统养护模式, 推动养护过程向主动调控方向发展。

针对新疆地区干燥多风的气候特点, 混凝土养护需采取多层次的防护措施。首先构建三层立体养护体系: 底层铺设透湿率 $\leq 0.35\text{g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$ 的高分子养护膜阻隔水分蒸发; 中层覆盖含水率 $\geq 90\%$ 的湿麻袋提供持续保湿; 外层设置防风帆布抵御风蚀影响。同时, 在混凝土内部掺入10%的预饱水陶粒(4-8mm粒径), 利用其缓释特性将内部相对湿度长期稳定在85%以上, 有效抑制自干燥收缩。针对盐渍土区域的特殊要求, 通过掺加8%硅灰和2%纳米CaCO₃的复合技术, 不仅使Cl⁻扩散系数降至 $0.8\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$, 还显著提升了混凝土的微裂缝自愈合能力。这套养护体系通过内外协同作用, 全面解决了新疆特殊环境下混凝土的干缩和盐蚀问题。

3.4 智能监控

智能化监测技术的应用为温度控制提供了新的技术路径。分布式光纤测温系统可实现全断面温度场的连续监测, 测量精度达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 空间分辨率优于0.5米。基于物联网技术的无线传输网络, 可将温度数据实时反馈至控制中心, 结合BIM模型进行三维温度场可视化分析。自适应调控系统通过机器学习算法预测温度发展趋势, 自动调节冷却水流量与养护措施, 形成“监测-预警-调控”的闭环控制机制。这种智能化的温度控制模式特别适用于大型水利枢纽工程, 可显著提高温度控制的精准性和时效性。当前技术发展的重点在于多源数据融合分析, 将温度数据与应变、湿度等参数进行关联分析, 建立混凝土早期性能演化预测模型。数字孪生技术的引入实现了物理实体与虚拟模型的实时交互, 通过在虚拟空间模拟不同温控方案的效果, 为工程决策

提供科学依据。

针对新疆复杂气候条件下传统温控手段的局限性, 现代工程采用智能化监测与预警系统实现精准控制。通过沿混凝土结构纵深每0.5m布设分布式光纤测温网络, 可实时监测温度梯度分布, 对温差超过20℃的高风险区域进行预警。同时配合LoRa无线湿度传感器网络, 实现每30分钟自动采集表面湿度数据, 并智能调控喷雾系统维持最佳养护湿度。基于大数据分析构建的热力学预测模型, 整合气象参数(风速、日照强度)和材料特性数据, 可提前12小时预测混凝土温度应力演变趋势。系统实施分级响应机制: 当监测到拉应变达 $80\mu\epsilon$ (黄色预警)时自动增加保温层厚度; 当应变超过 $120\mu\epsilon$ (红色预警)时立即注入低粘度环氧树脂浆液进行裂缝修复。这套智能化监控体系实现了从实时监测、精准预警到自动处置的全流程闭环管理, 显著提升了温控的可靠性和时效性。

3.5 效果验证

温度控制技术的实施效果需要通过系统的质量评价体系进行验证。除常规的抗压强度检测外, 应重点开展绝热温升试验、线膨胀系数测定等专项检测, 建立材料热学参数数据库。现场采用红外热成像技术进行表面温度场检测, 结合钻孔取芯法验证内部温度分布规律。长期性能监测应关注温度裂缝的发展趋势, 在结构易裂部位安装裂缝计进行持续观测, 积累温度应力松弛效应的实证数据。通过建立温度控制效果与裂缝指数的相关性模型, 可不断优化温度控制参数, 形成适应特定工程条件的个性化控制方案。现代检测技术正在向无损化、智能化方向发展, 超声波层析成像技术可非破坏性检测混凝土内部温度梯度, 微波湿度检测仪能实时监控养护期间的表面湿度变化。这些先进检测手段为温度控制效果评估提供了更精确的技术支持。

4 结束语

水利工程混凝土温度裂缝控制是项系统工程, 需要设计、材料、施工、监测等多专业的协同创新。当前技术发展呈现出明显的学科交叉特征, 材料科学、信息技术、人工智能等领域的突破正在重塑传统温控技术体系, 这种跨学科融合为破解复杂环境下的温度裂缝难题开辟了新路径。通过持续的技术创新与工程实践, 必将有效提升水工混凝土结构的耐久性和安全性, 为水利工程建设质量提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]张霄龙. 水利工程混凝土结构施工裂缝控制技术[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(3): 145-148.
- [2]张东峰. 水利工程施工中如何对混凝土裂缝进行有效控制[J]. 建筑与预算, 2022, (2): 016.
- [3]范洪浩, 邓春林, 余春辉, 等. 小溪滩船闸混凝土结构裂缝控制技术[J]. 水运工程, 2017, (2): 13-15.

作者简介:

刘跃辉(1975--), 女, 汉族, 新疆伊宁市人, 大专, 中级工程师, 研究方向: 水政水资源、水利工程建设管理。