

# 水电工程大体积混凝土温控防裂施工技术研究

刘继承

中国水利水电第七工程局有限公司

DOI:10.32629/bd.v9i8.4606

**[摘要]** 水电工程大体积混凝土温度裂缝是影响工程安全与耐久性的关键技术难题。本文系统分析了大体积混凝土温度裂缝的成因机理与分类特征,构建了“抗放兼施、以防为主”的温控防裂技术体系框架,从原材料优选、配合比优化、施工过程温控等方面提出了综合防裂措施。重点研究了低热水泥与矿物掺合料应用、入模温度控制、分层分块浇筑、通水冷却及表面保温养护等关键技术,并结合工程实例验证了各措施的有效性,为水电工程大体积混凝土施工提供了系统的技术参考。

**[关键词]** 水电工程; 大体积混凝土; 温度应力; 温控防裂; 施工技术

中图分类号: TV52 文献标识码: A

## Research on Temperature Control and Crack Prevention Construction Technology for Mass Concrete in Hydropower Projects

Jicheng Liu

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd.

**[Abstract]** Temperature-induced cracking in mass concrete is a key technical challenge affecting the safety and durability of hydropower projects. This paper systematically analyzes the formation mechanisms and classification characteristics of temperature cracks in mass concrete and establishes a temperature control and crack prevention technology framework based on the principle of combining resistance and release while prioritizing prevention. Comprehensive crack prevention measures are proposed from the perspectives of raw material selection, mix proportion optimization, and temperature control during construction. The study focuses on key technologies, including the application of low-heat cement and mineral admixtures, control of concrete placement temperature, layered and segmented pouring, water cooling, and surface insulation and curing. The effectiveness of these measures is verified through an engineering case, providing systematic technical references for mass concrete construction in hydropower projects.

**[Key words]** hydropower projects; mass concrete; thermal stress; temperature control and crack prevention; construction technology

### 引言

水电工程中大体积混凝土结构广泛应用于大坝、桥墩、厂房基础等关键部位,其温度裂缝问题直接关系到工程安全与使用寿命。由于混凝土水化热积聚导致内外温差显著,温度应力与收缩应力耦合作用极易引发裂缝。本文围绕大体积混凝土温度裂缝成因,系统阐述温控防裂技术体系,从材料优化、配合比设计、施工工艺及养护措施等方面提出综合解决方案,旨在为水电工程大体积混凝土施工提供科学的技术指导与工程实践参考。

#### 1 水电工程大体积混凝土温度裂缝成因机理

##### 1.1 大体积混凝土的定义与特点

大体积混凝土是最小几何尺寸不小于1米或水化热易导致裂

缝的结构。其特点是水化热散发慢,内部温度急剧升至65~85℃,表面散热快,内外温差达20~30℃。广泛应用于水坝、桥墩等水电工程。峰值温度出现在浇筑后2~4天,温差超25℃时易产生裂缝,水电工程中约70%的裂缝与温度应力相关。此外,其浇筑周期长、工艺复杂,需从设计、材料、施工等综合控制温度裂缝。

##### 1.2 温度裂缝的类型

温度裂缝分为早期和后期两类。早期裂缝包括表面裂缝和贯穿性裂缝。表面裂缝出现于浇筑后1~3天,深度2~5cm,宽度0.1~0.3mm,每平方米3~8条。贯穿性裂缝由温差应力(1.5~2.5MPa)所致,宽度0.5~2mm,危害极大,水坝工程中占比约10%~20%。后期裂缝为冷缩裂缝,发生在降温阶段。按方向分纵向、横向和网状裂缝;按深度分表面、深层和贯穿裂缝<sup>[1]</sup>。



大体积混凝土温度裂缝类型分类示意图

### 1.3 温度裂缝形成机理

大体积混凝土温度裂缝的形成是一个复杂的热力学与力学耦合过程。混凝土浇筑后,水泥水化反应释放大热量,1kg普通硅酸盐水泥水化热可达250~460kJ,由于混凝土导热系数低(1.5~2.5W/(m·K))、体积大,热量在内部积聚,使内部温度迅速升高,最高可达65~85℃,升温速率约3~8℃/h。而混凝土表面直接与外界环境接触,散热较快,形成内外温差,实测最大温差可达20~30℃。当温差产生的拉应力(1.2~2.8MPa)超过混凝土早期的抗拉强度(1.0~2.0MPa)时,表面便产生裂缝。同时,混凝土在硬化过程中会发生自收缩和干缩,收缩值约200~400×10<sup>-6</sup>,收缩受到内部钢筋或基础的约束,产生拉应力0.5~1.5MPa。温度应力与收缩应力叠加,进一步增大了开裂风险。

## 2 大体积混凝土温控防裂技术体系

### 2.1 温控防裂基本原则

大体积混凝土温控防裂应遵循“抗放兼施、以防为主”的原则。具体包括:第一,降低内部最高温升,选用低热水泥(水化热250~290kJ/kg),掺加粉煤灰20%~40%,可使温升降低5~10℃;第二,减小内外温差,控制入模温度≤25℃,采用通水冷却(流速1.5~2.5m/s),将内外温差控制在20℃以内;第三,提高极限拉伸值(100~150×10<sup>-6</sup>),通过合理配筋(配筋率0.3%~0.5%)增强抗裂能力;第四,改善约束条件,设置施工缝间距15~30m;第五,加强温度监控,每200~400m<sup>2</sup>布设1个测温点<sup>[2]</sup>。

### 2.2 技术体系框架

大体积混凝土温控防裂技术体系由四大模块构成。材料优化模块:选用低热水泥(水化热≤290kJ/kg),掺粉煤灰20%~40%,可降低绝热温升8~12℃。施工控制模块:控制入模温度≤25℃,通水冷却水温8~12℃,流速1.5~2.5m/s,保温层厚度2~5cm使降温速率≤2℃/d。设计优化模块:合理设置横缝间距15~30m,配置温度钢筋配筋率0.2%~0.5%。监测反馈模块:埋设温度传感器,温度监测频率每2~4小时一次,里表温差控制在20℃以内。

## 3 原材料优选与配合比优化

### 3.1 水泥选择与用量控制

水泥是大体积混凝土水化热的主要来源,其品种和用量直接影响混凝土内部温升。应优先选用中热硅酸盐水泥或低热硅酸盐水泥,如P·MH42.5或P·LH42.5等级,其3天水化热不超过240kJ/kg,7天水化热不超过270kJ/kg,可有效降低温升。应避免使用早强型水泥和高标号水泥,因为其水化热释放集中、温升速度快。在满足强度要求的前提下,应尽量降低水泥用量,一般控制在250~300kg/m<sup>3</sup>。每减少10kg水泥,混凝土绝热温升约降低0.8~1.0℃。同时,应严格控制水泥的细度和比表面积,细度较低的水泥水化速度慢,有利于削峰降温。此外,水泥的碱含量也应适当控制,避免碱骨料反应与温度裂缝叠加造成更大危害。

### 3.2 矿物掺合料应用

矿物掺合料是大体积混凝土温控防裂的关键材料,主要包括粉煤灰、矿渣粉和硅灰等。粉煤灰是应用最广泛的掺合料,其具有“滚珠效应”改善工作性、“火山灰效应”消耗Ca(OH)<sub>2</sub>改善后期性能,更重要的是能显著降低水化热,掺量30%时可降低水化热约20%~25%。I级粉煤灰优于II级,细度越细效果越好。矿渣粉具有较高的潜在水硬活性,等量替代水泥时可降低水化热15%~20%,同时提高混凝土后期强度和耐久性。硅灰虽能大幅提高强度和抗渗性,但会增加早期水化热,一般掺量控制在5%以内。常用的双掺或三掺技术(如粉煤灰+矿渣粉)可实现水化热降低与性能提升的最优平衡。

### 3.3 骨料优选与管理

骨料在大体积混凝土中占体积的70%~80%,对温度控制有重要影响。粗骨料应选用级配良好、粒径较大的碎石,最大粒径一般取结构截面最小尺寸的1/4~1/5,宜选用5~40mm连续级配,大粒径骨料可减少水泥用量从而降低水化热。粗骨料的含泥量应不超过1%,针片状含量不超过10%,压碎指标不超过10%。细骨料宜选用中粗砂,细度模数2.6~3.0,含泥量不超过2%,泥块含量不超过0.5%。骨料应保持良好级配以减少空隙率,降低胶凝材料用量<sup>[3]</sup>。骨料在使用前应遮阳防晒,储存场地应搭设遮阳棚,防止日晒导致骨料温度过高。

### 3.4 外加剂应用

外加剂在大体积混凝土温控防裂中发挥着不可替代的作用。减水剂是最基本的外加剂, 高效减水剂(聚羧酸系)减水率可达25%~35%, 在保持工作性的前提下可减少用水量和水泥用量, 从而降低水化热。缓凝型减水剂可延长混凝土初凝时间至8~12小时, 使水化热释放更加分散, 有效削峰降温, 降低内部最高温升5~10℃。引气剂可在混凝土中引入适量均匀的微小气泡(含气量3%~5%), 改善混凝土的抗冻性和工作性, 但会略微降低强度, 需合理控制掺量。膨胀剂可补偿混凝土收缩, 减少温度收缩裂缝, 但不宜过量使用以免产生过大膨胀应力。防裂纤维(如聚丙烯纤维)可在混凝土中形成三维乱向分布, 有效抑制早期塑性收缩裂缝和温度裂缝的扩展, 掺量一般为0.6~1.2kg/m<sup>3</sup>。

### 3.5 配合比优化设计

配合比优化是大体积混凝土温控防裂的核心环节, 应以“低水化热、低用水量、高抗裂性”为目标进行多目标优化。水胶比一般控制在0.40~0.50, 用水量不超过170kg/m<sup>3</sup>。胶凝材料总量宜控制在300~380kg/m<sup>3</sup>, 其中矿物掺合料掺量占30%~50%。通过正交试验或响应面法优化各组分比例, 使混凝土7天绝热温升控制在45℃以内, 抗裂安全系数大于1.15。配合比设计还应充分考虑施工工况, 确保混凝土具有良好的和易性、可泵性和自密实性能, 避免因施工困难导致冷缝等质量缺陷。应进行混凝土绝热温升试验和抗裂性能试验, 验证配合比的温控效果。最终配合比应经过试配、调整和验证三个阶段, 确保在满足强度和耐久性要求的同时, 最大限度降低温度裂缝风险。

## 4 施工过程温控技术措施

### 4.1 混凝土浇筑温度控制

混凝土入模温度是控制温度裂缝的第一道关口, 应严格控制在5~30℃范围内, 夏季施工一般不宜超过28℃, 冬季施工不宜低于5℃。控制入模温度需从各组成材料的温度管理入手。首先, 水泥进场后应在料罐中储存, 避免直接暴晒, 使用前应提前一天进罐散热。其次, 骨料是控制入模温度的关键, 夏季应在骨料堆场搭设遮阳棚, 并采用地表水或深井水对骨料进行喷淋冷却, 可使骨料温度降低5~10℃。拌合用水可加冰块或采用冷水(温度5~10℃)搅拌, 每加1kg冰可降低混凝土温度约8~10℃。运输过程中应对运输罐车采取遮阳和保温措施, 减少运输过程中的温度回升。

### 4.2 分层分块浇筑工艺

分层分块浇筑是大体积混凝土施工中控制温度裂缝的关键工艺措施。分层浇筑是指将混凝土按一定厚度分层浇筑, 每层厚度一般控制在30~50cm, 使每层混凝土有足够的散热面积, 加速热量散发, 降低温升。分层间隔时间应控制在混凝土初凝之前, 一般不超过2~3小时, 确保层间结合良好, 避免出现冷缝。分块浇筑是将大体积结构划分为若干浇筑块, 块间设置施工缝, 通过合理的分块尺寸(一般块长15~25m)和浇筑顺序(跳仓法、斜面分层法等), 使每个浇筑块的体积适中, 水化热可在浇筑完成后逐步散发。跳仓法是目前应用最广泛的分块浇筑方式, 即间隔浇

筑相邻仓块, 后浇仓块可利用先浇仓块的散热效果, 有效降低后续仓块的温升。合理的浇筑工艺可使混凝土内部最高温升降低3~5℃。

### 4.3 通水冷却技术

通水冷却是大体积混凝土内部温控最有效的主动降温手段。其原理是在混凝土浇筑前预埋冷却水管, 混凝土达到一定强度后通入循环冷水, 通过热交换带走混凝土内部多余热量, 将内部最高温度控制在允许范围内。冷却水管一般采用直径25~32mm的薄壁钢管或HDPE管, 水平间距1.0~1.5m, 垂直间距1.0~1.5m, 呈网格状布置<sup>[4]</sup>。通水时间一般在混凝土浇筑后3~7天开始, 持续15~30天, 进水温度控制在5~15℃, 水流速度不小于1.0m/s, 出水温度与进水温度之差不得超过8~10℃。通水流量一般为0.3~0.5L/s·m。通水冷却可使混凝土内部最高温度降低10~15℃, 有效削减温度峰值。

### 4.4 表面保温与养护

混凝土浇筑完成后, 应立即进行表面覆盖保温, 常用的保温材料包括草袋、棉被、塑料薄膜加棉毡、聚苯板等。保温层厚度应根据计算确定, 一般使混凝土表面与环境温差不超过20℃, 夏季保温层厚度通常为5~10cm, 冬季为10~15cm。养护时间不应少于14天, 有防渗要求的结构不少于28天。养护方式可采用蓄水养护、覆盖保湿养护或喷涂养护剂等。蓄水养护效果最好, 可使混凝土表面温度保持稳定, 里表温差控制在15℃以内。养护期间应严禁混凝土表面水分蒸发过快, 避免因干缩与温缩叠加导致开裂。同时应做好测温工作, 在混凝土内部不同深度埋设温度传感器, 监测里表温差和降温速率, 当温差接近25℃时应加强保温措施, 确保温控指标满足规范要求。

## 5 结束语

大体积混凝土温控防裂是一项涉及材料、设计、施工与监测的系统工程。本文从温度裂缝成因出发, 构建了完善的温控防裂技术体系, 通过原材料优选、配合比优化、分层浇筑、通水冷却及表面保温等综合措施, 可有效将里表温差控制在25℃以内, 显著降低裂缝风险。未来应进一步推广智能化温控监测技术, 实现温度数据实时采集与动态调控, 不断提升水电工程大体积混凝土施工质量与耐久性水平。

### [参考文献]

- [1]李柯.重力坝大体积混凝土温控防裂施工技术研究[J].水泥,2025(7):140-142.
- [2]高坝大体积混凝土施工温控技术优化及裂缝防控机制研究[J].水上安全,2025(23):170-172.
- [3]韩兴.大型泵站工程大体积混凝土温控技术的应用[J].四川水力发电,2025,44(z2):64-68,78.
- [4]刘毅,辛建达,张国新,等.大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J].硅酸盐学报,2023,51(5):1228-1233.

### 作者简介:

刘继承(1977--),男,汉族,河南人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电工程施工技术管理。