

# 水利工程大体积混凝土冬季施工温控技术

刘 强<sup>1</sup> 王 权<sup>2</sup>

1. 江苏治浚生态科技有限公司 江苏扬州 225100

2. 射阳水建水利建设有限公司 江苏盐城 224300

**摘 要:** 水利工程大体积混凝土结构具有体积大、强度高、耐久性强等特点, 冬季施工时, 低温环境易导致混凝土出现冻胀、裂缝等质量问题, 严重影响工程结构安全和使用寿命。本文结合水利工程大体积混凝土冬季施工的特点, 分析了冬季施工温控的核心难点, 系统阐述了原材料优化、配合比调整、浇筑过程温控、养护阶段保温保湿等关键温控技术, 并结合工程实例验证技术应用效果, 最后提出温控质量控制要点, 为水利工程大体积混凝土冬季施工提供技术参考。

**关键词:** 水利工程; 大体积混凝土; 冬季施工; 温控技术; 裂缝控制

## 引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施, 其建设质量直接关系到防洪、灌溉、发电等综合效益的发挥。大体积混凝土是水利工程的核心结构材料, 广泛应用于大坝、水闸、泵站等关键部位。冬季施工时, 我国北方及高海拔地区气温普遍低于0℃, 大体积混凝土在水化热释放与低温环境散热的双重作用下, 内部温度梯度显著增大, 易产生温度应力, 进而引发裂缝; 同时, 低温会延缓混凝土凝结硬化进程, 降低早期强度, 若防护不当, 还可能出现冻胀破坏, 严重威胁工程结构安全。

近年来, 随着水利工程建设向高海拔、严寒地区延伸, 冬季施工的频次和难度不断增加, 温控技术已成为保障冬季施工质量的核心关键。因此, 深入研究水利工程大体积混凝土冬季施工温控技术, 优化温控方案, 对提升工程质量、降低施工风险、确保工程长期稳定运行具有重要的现实意义。

## 一、水利工程大体积混凝土冬季施工温控难点

### (一) 温度梯度大, 温度应力集中

大体积混凝土浇筑后, 水泥水化反应会释放大量热量, 使混凝土内部温度快速升高, 形成高温核心区; 而冬季低温环境下, 混凝土表面散热速度快, 易形成“内高外低”的显著温度梯度。当温度梯度超过混凝土抗拉强度承受范围时, 会产生温度应力, 若应力集中无法有效释放, 就会引发表面裂缝或深层裂缝。对于水利工程而言, 裂缝不仅会降低混凝土的抗渗性和耐久性, 还可

能导致钢筋锈蚀, 进一步加剧结构损坏。

### (二) 低温延缓水化进程, 早期强度不足

混凝土的凝结硬化速度与环境温度密切相关, 当温度低于5℃时, 水泥水化反应会显著减缓; 温度低于0℃时, 水化反应基本停滞, 混凝土强度增长缓慢甚至停止。冬季施工中, 若混凝土早期强度无法及时达到抗冻临界强度(通常为设计强度的30%~50%), 当环境温度降至冰点以下时, 混凝土内部未水化的游离水会结冰膨胀, 产生冻胀应力, 导致混凝土内部结构破坏, 出现疏松、剥落等冻害现象。

### (三) 施工环境复杂, 温控措施实施难度大

水利工程多位于偏远地区, 冬季施工时易遭遇大风、降雪、寒潮等极端天气, 给温控措施的实施带来诸多不便。例如, 大风天气会加速混凝土表面散热, 降低保温效果; 降雪会覆盖混凝土表面, 影响养护作业; 寒潮来袭时, 气温骤降会加剧温度应力的产生。此外, 大体积混凝土结构体型庞大, 不同部位的散热条件差异较大, 难以实现均匀温控, 进一步增加了温控难度。

## 二、水利工程大体积混凝土冬季施工关键温控技术

### (一) 原材料优化与配合比调整

原材料的性能直接影响混凝土的水化热释放和抗冻性能, 冬季施工需重点优化原材料选择, 并调整混凝土配合比, 从源头控制温度裂缝和冻害风险。在水泥选择方面, 应优先选用水化热低、凝结硬化性能稳定的低热矿渣硅酸盐水泥或粉煤灰硅酸盐水泥, 减少水泥用量, 降低水化热峰值。试验表明, 采用低热水泥可使混凝土

内部最高温度降低5~10℃,有效减小温度梯度。同时,严禁使用过期水泥或受潮水泥,避免影响混凝土强度和耐久性。

骨料选择需满足级配良好、杂质含量低的要求。粗骨料宜选用粒径较大、级配连续的碎石,提高混凝土密实度,减少孔隙率;细骨料优先选用中砂,含泥量应控制在3%以内。冬季施工时,骨料需提前存放于保温棚内,避免受冻结块;若骨料温度过低,可采用蒸汽加热或热水冲洗的方式预热,确保骨料入仓温度不低于5℃。

外加剂的合理使用是冬季施工温控的重要手段。应掺入高效缓凝减水剂,在减少水泥用量、降低水化热的同时,延缓混凝土凝结时间,避免因低温导致的凝结硬化不良;同时,掺入引气剂,在混凝土内部形成均匀分布的微小气泡,提高混凝土的抗冻性和抗渗性,气泡含量宜控制在4%~6%。此外,可根据施工需求掺入适量粉煤灰、矿渣粉等掺合料,替代部分水泥,进一步降低水化热,改善混凝土工作性能。

## (二) 浇筑过程温控技术

浇筑过程是控制混凝土温度的关键环节,需从拌合、运输、浇筑三个阶段采取针对性的温控措施,确保混凝土入仓温度和浇筑温度满足设计要求。

混凝土拌合阶段的温控核心是提高拌合料温度。首先,对拌合用水进行加热,这是提升拌合料温度最直接有效的方法,加热方式可采用蒸汽加热或电加热,水温控制在60~80℃之间,避免水温过高导致水泥假凝;其次,对骨料进行预热,如前所述,确保骨料入机温度不低于5℃;最后,合理控制拌合时间,比常温施工延长50%左右,保证拌合料均匀受热,温度一致。拌合料出机温度应控制在10~15℃,若环境温度过低,可在拌合机周围搭建保温棚,减少热量散失。

运输阶段需减少混凝土热量损失,避免受冻。运输车辆应加盖保温罩,车厢内壁铺设保温层;选择最短运输路线,缩短运输时间,确保混凝土从出机到入仓的时间不超过1小时;若运输距离较远,可在运输过程中对混凝土进行二次搅拌,防止离析和温度不均。冬季施工时,应尽量避免在夜间或寒潮天气浇筑,选择白天气温较高的时段施工。

浇筑阶段的温控重点是控制浇筑温度和浇筑速度。混凝土入仓温度应不低于5℃,浇筑前需清理模板和钢筋上的冰雪,模板外侧铺设保温层,防止混凝土与低温模板接触后快速散热。浇筑过程中应采用分层浇筑、分

层振捣的方式,分层厚度控制在30~50cm,振捣要密实,避免出现蜂窝、麻面等缺陷,同时减少混凝土内部空隙,降低散热速度。相邻两层混凝土的浇筑间隔时间应控制在混凝土初凝时间以内,避免出现施工冷缝;若间隔时间过长,需在浇筑上层混凝土前,对下层混凝土表面进行加热处理,确保结合面温度不低于5℃。

## (三) 养护阶段温控技术

养护阶段的核心是保温保湿,减少混凝土表面散热,延缓降温速度,降低温度梯度,同时为混凝土水化反应提供充足水分,确保强度正常增长。冬季施工养护方式主要分为保温养护和加热养护两类,需根据环境温度和工程实际情况选择合适的养护方案。

保温养护适用于环境温度在-5℃~5℃的地区,其原理是通过铺设保温材料减少混凝土表面热量散失,利用混凝土自身水化热维持内部温度。常用的保温材料包括棉被、土工布、岩棉板、聚氨酯泡沫板等,铺设时应覆盖全面、压实密封,避免出现缝隙导致热量流失。对于大坝、水闸等大型结构,可在混凝土表面搭建保温棚,棚内放置保温材料,形成封闭的保温空间;对于墙体、柱等构件,可采用模板外包裹保温层的方式养护,养护时间不少于14天,确保混凝土强度达到设计强度的75%以上。

加热养护适用于环境温度低于-5℃的严寒地区,当保温养护无法满足温控要求时,需采用主动加热的方式维持混凝土温度。常用的加热方式包括蒸汽加热、电加热和热风加热。蒸汽加热分为通汽养护和蒸汽套养护,通汽养护是将蒸汽直接通入保温棚内,提高棚内温度,温度控制在10~20℃,相对湿度不低于90%;蒸汽套养护是在模板外侧设置蒸汽套,通入蒸汽加热模板,间接提升混凝土温度,这种方式加热均匀,热量损失小,但施工成本较高。电加热是在混凝土内部预埋电加热丝,通过通电加热维持混凝土温度,适用于体积较小的构件,加热过程中需严格控制温度,避免局部过热。热风加热是利用热风炉产生热风,通过风管送入保温棚内,实现温度提升,这种方式设备简单、操作方便,适用于大面积养护。

为更清晰对比不同养护方式的核心特性与适用场景,构建如下对比表:

## 三、工程应用实例

### (一) 工程概况

某水利枢纽工程大坝为混凝土重力坝,最大坝

养护方式	核心原理	常用形式/材料	适用环境温度	核心优势	局限性	适用构件类型
保温养护	铺设保温材料减少热量散失, 利用混凝土自身水化热保温	棉被、土工布、岩棉板、聚氨酯泡沫板、保温棚	-5℃ ~5℃	成本低、操作简单、环保无污染	保温效果有限, 无法应对严寒环境	大坝、水闸、墙体、柱等各类构件
蒸汽加热养护	通过蒸汽提升环境或模板温度, 主动维持混凝土温度	通汽养护、蒸汽套养护、蒸汽管道、保温棚	<-5℃ (严寒地区)	加热均匀、保温保湿效果好、温控稳定	施工成本高、需专业设备与操作	大坝、水闸等大型核心构件
电加热养护	预埋电加热丝通电加热, 直接提升混凝土内部温度	电加热丝、温度控制器	<-5℃ (严寒地区)	温控精度高、响应速度快	能耗高、仅适用于小体积构件、存在局部过热风险	小型墙体、柱、基础等小体积构件
热风加热养护	热风炉产生热风, 通过风管送入保温棚提升环境温度	热风炉、风管、保温棚	<-5℃ (严寒地区)	设备简单、操作方便、适用于大面积养护	温度均匀性较差、热量损失相对较大	大坝、厂房等大面积构件

高80m, 坝体混凝土总量为120万m<sup>3</sup>, 工程位于北方严寒地区, 冬季施工期为11月至次年3月, 平均气温为-10℃~-5℃, 最低气温可达-25℃。大坝基础约束区混凝土设计强度等级为C30, 抗冻等级为F200, 抗渗等级为W10。为确保冬季施工质量, 该工程采用了上述温控技术, 制定了针对性的温控方案。

### (二) 温控方案实施

原材料优化方面, 选用低热矿渣硅酸盐水泥, 掺入30%的粉煤灰和10%的矿渣粉替代水泥, 采用高效缓凝减水剂和引气剂, 水胶比控制在0.42。骨料提前存放于保温棚内, 采用蒸汽预热, 拌合用水加热至70℃, 拌合料出机温度控制在12℃左右。浇筑过程中, 运输车辆加盖保温罩, 运输时间控制在40分钟以内, 混凝土入仓温度为8℃。采用分层浇筑方式, 分层厚度为40cm, 相邻两层浇筑间隔时间为6小时, 浇筑时间选择在每天9:00~16:00的高温时段。养护阶段采用“保温棚+蒸汽加热”的综合养护方式, 在大坝表面搭建钢结构保温棚, 棚内铺设岩棉板保温层, 设置蒸汽管道通入棚内加热, 棚内温度控制在15℃左右, 相对湿度保持在95%以上。在混凝土内部不同深度、表面及棚内设置了50个测温点, 实时监测温度变化。

### (三) 应用效果

通过实施上述温控技术, 该工程大坝冬季施工期间混凝土未出现冻胀、裂缝等质量问题。温度监测结果显示, 混凝土内部最高温度为65℃, 内部与表面的最大温度差为22℃, 低于25℃的允许值, 温度梯度控制良好。

混凝土28天强度达到35MPa, 满足设计要求, 抗冻性能和抗渗性能经检测均符合规范标准。工程竣工后运行5年, 大坝结构稳定, 未出现任何质量隐患, 证明了所采用的冬季施工温控技术的有效性和可靠性。

### 四、结论与展望

水利工程大体积混凝土冬季施工温控是一项系统工程, 其核心是控制温度梯度, 防止温度裂缝和冻胀破坏。本文通过分析冬季施工温控难点, 提出了原材料优化与配合比调整、浇筑过程温控、养护阶段温控等关键技术, 结合工程实例验证了技术的有效性。实践表明, 只有从原材料、拌合、运输、浇筑、养护等全流程采取针对性的温控措施, 加强质量控制和温度监测, 才能确保冬季施工混凝土质量。

### 参考文献

- [1] 赵凯丽, 李敏, 王珏. 大体积混凝土冬季施工温控控制与数值模拟研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2025, 11(3): 19-26.
- [2] 黄欢. 冬季施工背景下大体积混凝土“跳仓法”施工及质量控制策略研究[J]. 散装水泥, 2023(4): 159-161.
- [3] 王龙, 刘志山, 吴寒, 等. 大体积防辐射混凝土冬季施工温差控制[J]. 市政技术, 2024, 42(1): 182-191.
- [4] 李敏方, 王伟, 崔之靖, 等. 大体积明挖隧道混凝土冬季施工保温技术研究[J]. 铁道勘察, 2024, 50(3): 156-161.