

# 水利工程冬季施工混凝土防冻技术与质量控制研究

石洪胜

天津市金帆工程建设监理有限公司 天津 300000

**摘要:** 冬季低温环境对水利工程施工,尤其是混凝土浇筑与养护构成严峻挑战。低温不仅延缓水泥水化反应,降低早期强度发展速率,更易导致新拌混凝土内部水分冻结,引发体积膨胀、结构疏松甚至开裂,严重影响工程耐久性与安全性。本文系统分析了冬季低温对混凝土性能的影响机理,综述了当前主流的混凝土防冻技术,包括原材料预热、掺加防冻剂、保温蓄热法、暖棚法、电热法及综合蓄热法等,并结合水利工程特点,提出了针对性的质量控制策略。研究表明,科学选择防冻技术、严格实施温控措施、强化过程监测与验收标准,是保障水利工程冬季混凝土施工质量的关键路径。

**关键词:** 水利工程; 冬季施工; 混凝土防冻; 防冻剂; 保温蓄热; 质量控制

## 引言

水利工程受项目进度、气候条件及资源调配等因素影响,部分关键部位(如大坝基础、闸墩、隧洞衬砌、渡槽等)常需在冬季低温环境下进行混凝土施工。然而,根据《水工混凝土施工规范》(SL 677—2014)规定,当室外日平均气温连续5天稳定低于 $5^{\circ}\text{C}$ ,或最低气温低于 $-3^{\circ}\text{C}$ 时,即进入冬期施工阶段。在此条件下,混凝土的物理化学反应显著减缓,若防护不当,极易发生冻害,造成不可逆的结构损伤。混凝土冻害的本质在于其内部自由水在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下结冰,体积膨胀约9%,对水泥石骨架产生巨大内应力,破坏胶凝结构,降低密实度与强度。尤其对于水利工程而言,其服役环境多处于水下或高湿状态,对混凝土的抗渗性、抗冻融循环能力及长期耐久性要求极高。一旦因冬季施工不当导致早期冻伤,将大幅缩短工程使用寿命,甚至危及结构安全。因此,深入研究水利工程冬季混凝土施工的防冻技术与质量控制方法,具有重要的理论价值与工程实践意义。

## 1 低温对混凝土性能的影响机理

### 1.1 水泥水化反应受阻

水泥的水化反应是混凝土获得强度的根本途径,而这一化学过程对温度高度敏感。在常温条件下,水泥颗粒与水迅速反应生成水化硅酸钙等胶凝产物,形成致密的微观结构。然而,当环境温度降至 $5^{\circ}\text{C}$ 以下时,水分子的热运动显著减弱,离子扩散速率下降,导致水化反应动力学过程大幅放缓。实验数据表明,温度从 $20^{\circ}\text{C}$ 降至 $5^{\circ}\text{C}$ ,水泥早期水化速率降低近一半;当温度接近 $0^{\circ}\text{C}$ 时,水化反应几乎停滞。这种迟滞效应直接表现为混凝土早期强度增长缓慢,难以在合理工期内达到拆模或承受施工荷载所需的强度阈值,进而影响整体施工进度与结构

安全性。

### 1.2 自由水冻结引发结构破坏

新拌混凝土中含有大量自由水。当温度降至冰点以下,自由水开始结冰。冰晶的形成不仅占据更大体积,挤压周围水泥浆体,还在骨料-浆体界面产生应力集中。反复冻融更会加剧微裂缝扩展,最终导致混凝土表面剥落、内部疏松,强度与弹性模量显著下降。试验表明,若混凝土在强度未达 $5\text{MPa}$ 前受冻,其最终强度损失可达30%以上。

### 1.3 热应力与收缩开裂风险增加

冬季昼夜温差大,混凝土内外温差易超过 $25^{\circ}\text{C}$ ,产生显著温度梯度。同时,低温下混凝土干燥收缩与自收缩叠加,若约束较强(如大体积混凝土或结构转角处),极易诱发温度裂缝与收缩裂缝<sup>[1]</sup>。这些裂缝不仅削弱结构整体性,更为侵蚀性介质(如氯离子、硫酸盐)提供渗透通道,加速钢筋锈蚀与混凝土劣化。

### 1.4 对耐久性的长期负面影响

即使混凝土在冬季施工过程中未出现明显的冻胀破坏或宏观裂缝,低温环境仍可能对其长期耐久性产生不利影响。由于水化不充分,混凝土的微观结构往往不够致密,孔隙连通性较高,界面过渡区较为薄弱。这使得混凝土的抗渗性能下降,在长期接触水体的水利环境中,更容易发生渗透、溶蚀和冻融循环破坏。此外,若防冻措施不当或外加剂选用失误,还可能引入有害离子(如氯离子),诱发钢筋锈蚀,进一步缩短结构使用寿命。因此,冬季施工不仅要关注短期强度达标,更应着眼于全生命周期的耐久性保障。

## 2 水利工程冬季混凝土防冻技术体系

### 2.1 原材料预热与配合比优化

在冬季混凝土施工中，提升混凝土的初始温度是延缓其冷却速率、争取足够水化时间的基础手段。通常做法是将拌合用水加热至40~60℃，必要时对砂石骨料进行预热，使其温度维持在5~10℃左右。需要注意的是，水温不宜超过80℃，以免引起水泥假凝或局部过热导致性能不均。与此同时，配合比设计也需相应调整。例如，可适当提高水泥用量或选用早强型硅酸盐水泥（如P·O 42.5R），以加速早期强度发展；通过掺加高效减水剂降低水胶比，在减少自由水含量的同时保证工作性；在非严寒地区，还可适量掺入优质粉煤灰或矿渣粉，虽会略微延缓早期强度，但有助于改善后期密实度与抗渗性，前提是必须配合早强措施确保抗冻临界强度按时达成。

### 2.2 化学外加剂技术

化学外加剂在冬季混凝土防冻中扮演着不可或缺的角色。防冻剂的核心功能是通过降低混凝土液相的冰点，

使部分水分在负温下仍能保持液态，从而维持水泥的水化反应。其主要成分包括无机盐类（如亚硝酸钠、硝酸钙）和有机醇类化合物。需要强调的是，防冻剂并非万能，它不能替代物理保温措施，仅起到“争取时间”的作用，确保混凝土在冻结前达到抗冻临界强度<sup>[2]</sup>。此外，防冻剂的选用必须严格遵循《混凝土防冻剂》（JC 475）标准，并通过试验确定最佳掺量，避免因过量使用引发碱骨料反应或钢筋锈蚀风险。在实际工程中，防冻剂常与早强剂（如三乙醇胺、硫酸钠）和高效减水剂复配使用，形成协同效应，既降低冰点，又加速强度增长，同时改善拌合物流动性，实现多重目标的统一。

### 2.3 物理保温与加热养护技术

物理保温与加热是保障混凝土在低温环境中持续正温养护的关键手段。不同防冻技术适用于不同的气温条件与工程场景，其优缺点与适用范围如表1所示。

表1：常用冬季混凝土防冻技术对比

防冻方法	适用最低气温	适用结构类型	优点	缺点
蓄热法	≥ -10℃	大体积、厚壁结构	成本低、操作简单	保温效果有限，不适用于严寒
综合蓄热法	≥ -15℃	多数水利结构	技术成熟、经济高效	依赖准确热工计算
暖棚法	≥ -25℃	局部封闭结构（闸室等）	温度可控、环境稳定	搭设成本高、通风管理复杂
电热毯/膜加热	≥ -20℃	平面、薄壁结构	加热均匀、易于控制	能耗较高、需专用设备
电极加热	≥ -25℃	薄板、墙体	升温快	易造成温度不均，安全性要求高

注：适用气温为一般经验值，具体需结合热工验算确定。

蓄热法是最经济实用的方法之一，适用于气温不低于-15℃且结构体积较大的工程部位。其原理是利用混凝土自身的水化热和预热所携带的热量，通过覆盖高效保温材料（如岩棉被、草帘、塑料薄膜等）减少热量散失，使混凝土在缓慢冷却过程中完成必要的强度积累。当环境温度更低或结构暴露面积较大时，可采用暖棚法，在施工区域搭建封闭棚架，内部通过热风机、蒸汽或电暖设备维持5℃以上的环境温度，特别适用于闸室、泵房等局部结构。对于特殊部位，还可采用电热法，如在模板外侧铺设电热毯，或在混凝土内部埋设电极进行电阻加热。然而，电热法能耗高、温控难度大，需谨慎使用。目前，综合蓄热法——即结合原材料预热、掺加防冻早强剂与高效保温覆盖——因其技术成熟、成本可控、效果可靠，已成为水利工程冬季施工的主流技术路线。

## 3 水利工程冬季施工质量控制策略

### 3.1 施工前准备与方案编制

首先，应建立工地气象监测系统，实时掌握气温、风速、湿度等关键参数，并结合中长期天气预报，提前预警寒潮来袭。其次，必须依据《水工混凝土施工规范》

（SL 677）等相关标准，编制专项冬季施工方案，明确防冻技术路线、保温措施、测温制度、应急预案及人员职责。该方案应经过专家论证并报监理审批<sup>[3]</sup>。同时，所有进场材料，尤其是防冻剂、早强剂等化学外加剂，必须进行复检，确保其性能指标符合规范要求；骨料的含水率应每日测定，并据此动态调整施工配合比中的用水量，防止因含水波动导致水胶比失控。

### 3.2 混凝土生产与运输控制

混凝土的生产与运输环节是热量损失的主要阶段，必须采取有效保温措施。搅拌站的骨料仓、水箱及输送带应进行封闭保温处理，搅拌时间宜延长20%~30%，以确保各组分充分混合均匀。运输车辆应加装保温套，尽量缩短运输距离与时间，避免混凝土在途中温度骤降。对于泵送施工，泵管需用保温材料包裹，防止热量通过金属管壁快速散失。尤为重要的是，每车混凝土在入模前必须检测其温度，确保不低于5℃（对于大体积混凝土，可根据热工计算适当调整），这是防止早期冻害的第一道防线。

### 3.3 浇筑与养护过程管理

混凝土浇筑前，必须彻底清除基岩或老混凝土表面的冰雪、霜冻，并可用热风机烘烤至正温，避免冷基面

吸热导致新浇混凝土底部迅速降温。浇筑过程中应控制分层厚度(一般不超过50cm),并尽量缩短层间间隔时间,防止形成冷缝。浇筑完成后,应立即覆盖塑料薄膜以防止水分蒸发,再在其上铺设双层或多层高效保温被,尤其在结构转角、边缘等易散热部位应加厚覆盖<sup>[4]</sup>。同时,必须建立全过程、多层次的温度监测体系。除在结构的关键部位(表面、中心、底部)按规范要求布置测温孔外,还应采用自动化温度采集设备(如无线温度传感器或智能测温仪),实现对混凝土内部温度的实时、连续监测。初期每2小时记录一次温度数据,后期可逐步延长至每日2次,并同步绘制温度-时间变化曲线。对于重要结构或严寒地区工程,宜接入物联网平台,实现远程监控与异常预警,确保混凝土在达到抗冻临界强度前始终处于正温养护状态。

### 3.4 强度监测与拆模控制

混凝土是否达到抗冻临界强度,是决定能否停止保温的关键依据。为此,必须制作与结构同条件养护的试块,并定期进行强度测试。在不具备试块条件时,可辅以回弹仪、超声波等非破损检测方法进行现场强度评估。拆模作业同样需谨慎,只有当混凝土表面温度与环境温差不超过20°C时方可进行,以防因骤冷产生温度裂缝。拆模后,若环境温度仍较低,应立即喷涂养护剂或继续采取保温措施,确保混凝土在达到设计强度前始终处于受控状态。

### 3.5 质量验收与缺陷处理

冬季施工结束后,应组织专项质量验收。重点检查混凝土外观是否存在冻胀痕迹、蜂窝麻面、裂缝等缺陷,裂缝宽度应控制在规范允许范围内(通常 $\leq 0.2\text{mm}$ )。同时,核查28天标准养护强度及同条件养护强度报告,确保双控指标均满足设计要求。对于发现的轻微冻伤区域,可采用凿除疏松层后用环氧砂浆修补的方式处理;若冻害严重,影响结构承载能力,则需进行结构复核,必要时采取加固或局部返工措施,绝不允许带病运行。

## 4 存在问题与发展趋势

### 4.1 当前挑战

尽管现有防冻技术已取得显著成效,但仍面临若干挑战。部分传统防冻剂含有氯盐或亚硝酸盐,存在环境污染和钢筋锈蚀隐患,不符合绿色施工理念;大体积混凝土在冬季虽需外部保温防冻,但内部水化热仍可能导致内外温差过大,引发温度裂缝,温控矛盾突出;当前多数

工程仍依赖人工测温,效率低、数据滞后,难以实现动态调控;对于-20°C以下的超低温环境,尚缺乏经济、高效、成熟的成套施工技术,应急能力不足。

### 4.2 未来发展方向

面向未来,水利工程冬季施工技术将朝着绿色化、智能化、精准化方向发展。一方面,研发无氯、低碱、可生物降解的新型环保防冻剂成为迫切需求;另一方面,相变材料(PCM)的应用前景广阔,通过在混凝土中掺入微胶囊化PCM,可在水化放热阶段吸收多余热量,在降温阶段释放热量,有效平抑温度波动。此外,融合物联网、大数据与人工智能的智能温控系统将逐步普及,实现温度实时感知、风险自动预警与保温措施联动调控。BIM技术也将深度介入,通过数字孪生模型模拟冬季施工全过程热工行为,优化保温方案与施工组织,推动水利工程冬季施工迈向高质量发展新阶段。

## 5 结语

水利工程冬季混凝土施工是一项系统性、技术性极强的工作。低温环境对混凝土的强度发展、结构完整性及长期耐久性构成多重威胁。通过深入理解冻害机理,科学选用原材料预热、化学外加剂、物理保温等防冻技术,并构建覆盖施工全周期的质量控制体系,可有效规避冻害风险,确保工程质量。实践表明,“以综合蓄热法为主,辅以高效防冻早强剂,强化全过程温控与监测”是当前最适用于水利工程的冬季施工模式。未来,随着绿色建材、智能监测与数字建造技术的发展,水利工程冬季施工将朝着更安全、更高效、更可持续的方向迈进。工程技术人员应持续关注新技术、新规范,不断提升冬季施工管理水平,为国家水安全保障提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1]王世亮,苏永军,陈警,等.基于正交试验的冬季施工大体积混凝土性能研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(5):1-4,18.
- [2]许占发,张佳.寒区水利工程冬季施工关键技术及安全防护体系构建——以第八师某输水渠工程为例[J].城镇建设,2025(21):199-201.
- [3]龚建华.水利工程混凝土冬季施工浇筑及养护技术研究[J].城市建筑与发展,2024,5(21).DOI:10.37155/2717-557X-0521-74.
- [4]田海波.水利工程混凝土冬季施工研究[J].科学与财富,2021,13(8):338.