

# 高寒地区公路桥梁冬季施工混凝土防冻害技术研究

邓建德

新疆生产建设兵团建筑科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 随着我国西部大开发战略的深入推进和“一带一路”倡议的实施,大量交通基础设施工程向高海拔、高纬度等高寒地区延伸。在这些区域,冬季漫长严寒,极端低温可达 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下,对公路桥梁混凝土结构的施工质量与耐久性构成严峻挑战。混凝土在初凝及硬化初期若遭受冻结,将导致内部结构损伤、强度损失、耐久性劣化,严重威胁工程安全。本文系统分析了高寒地区冬季混凝土冻害的机理与影响因素,综述并评估了当前主流的防冻害技术措施,包括原材料优化、配合比设计、热工计算、保温养护及外加剂应用等。最后,针对现有技术体系的不足,提出了集成化、智能化的发展方向,旨在为高寒地区公路桥梁冬季施工提供理论支撑与实践指导。

**关键词:** 高寒地区;公路桥梁;冬季施工;混凝土;冻害;防冻技术;保温养护

## 引言

我国幅员辽阔,高寒地区主要分布于青藏高原、内蒙古高原、东北三省及新疆北部等地,总面积约占国土面积的三分之一。这些地区具有“高海拔、低气压、强辐射、昼夜温差大、冬季漫长且极端低温”的典型气候特征。近年来,川藏铁路配套公路等国家重大交通工程相继规划建设,高寒地区公路桥梁建设迎来高峰。但混凝土作为桥梁主要结构材料,水化反应对温度敏感,环境温度低于 $5^{\circ}\text{C}$ 时水泥水化速率减缓,新拌混凝土内部温度降至 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,自由水结冰膨胀,破坏水泥石结构,造成不可逆微裂缝。早期冻害会使混凝土28天强度大幅降低,增加渗透性,加速后期劣化,缩短桥梁服役寿命。所以,深入研究该地区冬季施工中混凝土防冻害技术,对保障工程质量安全、推进国家重大战略工程意义重大,具有重要工程价值与社会意义。

## 1 高寒地区混凝土冻害机理与影响因素

### 1.1 冻害形成机理

混凝土的冻害过程可分为两个阶段:一是塑性阶段冻害:指混凝土浇筑后至初凝前遭受冻结。此时,水泥水化尚未形成有效骨架,冰晶的生长直接挤压骨料与水泥浆体,造成严重的离析、泌水和结构疏松。二是硬化初期冻害:指混凝土初凝后至获得临界抗冻强度前遭受冻结。此阶段,水泥石已初步形成,但强度较低。内部孔隙水结冰产生的膨胀应力超过混凝土的抗拉强度,导致微裂缝的产生与扩展<sup>[1]</sup>。无论是哪个阶段,冻害的本质都是水相变引起的体积膨胀应力超过了混凝土当时的力学强度。

### 1.2 主要影响因素

(1) 环境温度与降温速率:环境温度越低,混凝土

内部热量散失越快,达到冻结温度的时间越短。急剧降温比缓慢降温造成的冻害更严重。(2) 混凝土入模温度:这是决定混凝土能否在冻结前获得足够强度的关键初始条件。入模温度越高,可供水化反应的时间窗口越长。(3) 混凝土组成与配合比:水胶比越大,自由水含量越多,冻害风险越高。低水胶比是提高抗冻性的根本。高活性、早强型水泥(如硅酸盐水泥、快硬硫铝酸盐水泥)能加速早期强度发展。掺合料(粉煤灰、矿粉)虽能改善长期性能,但会延缓早期水化,需谨慎使用。洁净、级配良好的骨料有助于减少用水量,降低孔隙率。(4) 结构尺寸与形状:大体积混凝土中心散热慢,表面散热快,易形成内外温差裂缝。薄壁结构(如桥面板、防撞护栏)散热极快,防冻难度大。(5) 高寒地区特殊环境:高海拔地区气压低,水的沸点降低,蒸发加快,加剧混凝土表面塑性收缩开裂风险,同时可能影响外加剂效能。强风加速对流换热,使混凝土表面温度骤降。干燥低湿度环境加速水分蒸发,不利于保湿养护。

## 2 高寒地区混凝土防冻害关键技术体系

为有效防止冻害,必须确保混凝土在达到“临界抗冻强度”(通常为设计强度的30%或5MPa)之前,其内部温度不低于防冻剂规定的最低允许温度(一般为 $-5^{\circ}\text{C}$ 至 $-15^{\circ}\text{C}$ )。为此,需构建一套涵盖“源头控制-过程保障-末端防护”的全链条技术体系。

### 2.1 原材料优选与配合比优化

#### 2.1.1 胶凝材料与骨料的选择

优先选用早强型硅酸盐水泥(P·I或P·II型),其硅酸三钙(C3S)含量高,低温下能快速水化反应,释放热量建立早期强度。极端低温时,快硬硫铝酸盐水泥可在负温快速硬化,是特殊工况备选。矿物掺合料虽能改善

混凝土长期性能, 但会延缓早期水化, 冬季施工应严格限制掺量, 一般不超过胶凝材料总量15%, 或用早强型复合掺合料。骨料是混凝土骨架, 其初始温度影响拌合物热状态<sup>[2]</sup>。施工前, 骨料应集中堆放在封闭暖棚, 或用蒸汽管道、热风机预热, 使其温度稳定在5至10摄氏度, 避免吸收拌合水热量, 保证混凝土入模温度。

### 2.1.2 拌合水加热与外加剂应用

用锅炉或电加热器将水加热至40至60摄氏度, 可增加混凝土初始热能储备, 但水温一般不应超过80摄氏度, 防止引发局部假凝破坏匀质性。外加剂方面, 高效复合型防冻剂与早强剂协同作用是抵御冻害核心。防冻剂含亚硝酸盐等组分, 可降低拌合水冰点, 负温下维持液态水, 保障水泥持续水化; 早强剂加速水泥水化结构形成, 使混凝土快速获得抗冻胀应力强度。使用外加剂要严格规范, 严禁在钢筋混凝土结构中使用含氯盐早强剂, 防止钢筋锈蚀, 应选无氯、无碱有机早强体系, 确保结构长期安全。

### 2.1.3 低水胶比配合比设计

采用高性能聚羧酸系高效减水剂, 在保证混凝土工作性前提下, 将水胶比控制在0.35至0.40。此策略有双重功效: 一是大幅减少混凝土体系内可自由冻结水量, 削弱冻胀力产生源; 二是降低硬化后混凝土孔隙率, 提高密实度, 增强力学强度和抵抗水分及侵蚀性离子渗透能力, 为混凝土长期耐久性奠定基础。低水胶比既是防冻害关键, 也是提升高寒地区桥梁结构全寿命周期性能的核心技术路径。

## 2.2 热工计算与温度控制

### 2.2.1 入模温度计算与预测

科学严谨的热工计算是连接材料准备与现场施工的桥梁, 它使冬季施工从经验主义走向精准控制。整个计算过程始于对混凝土入模温度( $T_0$ )的精确求解。该温度并非简单平均, 而是需要综合考虑水泥、砂、石、水等各组分的质量及其各自的初始温度, 通过热平衡原理建立数学模型进行计算。准确的入模温度是后续所有温度场预测的初始边界条件, 其数值的高低直接决定了混凝土在冻结前可用于强度发展的有效时间窗口。

$$T_0 = \frac{0.92(m_{cc}T_{cc} + m_{sa}T_{sa} + m_gT_g) + 4.2m_w(T_w - 0.1T_{sa} - 0.2T_g)}{4.2m_w + 0.92(m_{cc} + m_{sa} + m_g)}$$

其中,  $m$ 和 $T$ 分别为各材料的质量和温度。

### 2.2.2 混凝土内部温度场模拟

在获得准确的入模温度后, 下一步是利用成熟的工程方法对混凝土内部的温度演变进行动态模拟。目前, 基于有限元理论的数值分析软件(如MIDASCIVIL、ABAQUS等)已成为主流工具。通过输入详细的环境参数

(如未来几天的气温、风速)、结构几何信息(尺寸、形状)以及保温材料的热物理性能(导热系数、厚度), 软件能够构建一个虚拟的温度场模型, 精确预测从浇筑开始到关键龄期(如7天、14天)内, 混凝土内部任意位置的温度变化历史。这种模拟可以清晰地揭示最高温升、最低表面温度、降温速率以及内外温差等关键指标, 为制定保温或加热方案提供无可辩驳的数据支撑。

### 2.2.3 保温与加热方案确定

热工模拟的最终目的是指导现场实践。根据模拟结果, 工程师可以科学地反算出所需的保温措施。例如, 若模拟显示仅靠覆盖双层土工布无法阻止表面温度降至危险区间, 则需增加棉被厚度或增设塑料薄膜以增强保温和隔热效果。对于大体积或关键受力构件, 当蓄热法(即仅依靠混凝土自身水化热)的模拟结果不满足要求时, 就必须果断采用外部加热法。此时, 模拟数据还能帮助确定加热设备的功率、数量及布置方式, 例如计算出需要在暖棚内布置几台多大功率的暖风机, 才能将环境温度稳定维持在5℃以上。这种基于计算的决策模式, 彻底摒弃了“拍脑袋”式的粗放管理, 实现了资源的最优配置与工程质量的可靠保障。

## 2.3 施工过程精细化管理

### 2.3.1 运输、浇筑与振捣控制

从混凝土离开搅拌站到最终在模板内成型, 每一个环节都伴随着热量的流失, 因此必须实施全过程的精细化管理。在运输阶段, 应对混凝土搅拌车的罐体进行严密的保温包裹, 并优化运输路线, 尽可能缩短在途时间。抵达现场后, 浇筑作业应迅速展开。浇筑前, 必须彻底清理模板和钢筋表面的冰雪霜冻, 防止其融化后稀释混凝土或形成薄弱界面<sup>[3]</sup>。浇筑过程宜采用分层连续的方式推进, 每层的厚度需根据振捣设备的有效作用范围来确定, 既要保证振捣密实, 又要避免因分层过厚导致下层热量被上层新拌混凝土过度吸收, 从而造成温度分布不均。

### 2.3.2 养护与保温措施实施

混凝土浇筑成型后的最初几小时至几天, 是其最为脆弱的时期, 也是养护与保温措施必须立即、无缝衔接的关键窗口。覆盖保温法因其经济性和有效性而被广泛应用。具体操作上, 应在收面完成后立即覆盖一层不透水的塑料薄膜, 此举旨在锁住混凝土内部的水分, 防止在干燥、大风的高寒环境中发生严重的塑性收缩开裂。在此基础上, 再覆盖多层具有良好隔热性能的保温材料, 如阻燃草帘、岩棉被或专用的复合保温被。对于墩柱、承台等大体积结构或处于风口的薄壁构件, 搭设全封闭的保温棚是更为可靠的方案, 它能有效隔绝外部恶劣气候,

在结构周围营造一个相对温和、稳定的微环境。

### 2.3.3 拆模时机与温控要求

拆模是冬季施工中的一个高风险节点，必须遵循严格的“强度与温度”双重控制原则。只有当同条件养护的试块抗压强度达到规范规定的受冻临界强度（通常为设计强度的30%或不低于5MPa），并且混凝土内部已自然冷却至5℃以上时，方可考虑拆除模板。此外，拆模时还需特别关注温度梯度问题。如果混凝土表面温度与外界环境温度的差值超过20℃，骤然暴露在冷空气中极易因剧烈的温度收缩而在表面产生裂缝。因此，在这种情况下，即使强度达标，也应采取临时性的覆盖保温措施，让混凝土结构缓慢适应外界环境，平稳度过拆模这一敏感期。

## 2.4 质量监控与智能预警

### 2.4.1 温度实时监测系统构建

为了摆脱传统人工测温的滞后性与片面性，构建一套自动化、网络化的温度实时监测系统已成为现代高寒工程的标配。该系统的核心是在混凝土结构内部的关键部位——如几何中心（散热最慢处）、近表面区域（散热最快处）以及靠近主筋的位置——预埋高精度的无线温度传感器。这些传感器如同嵌入结构内部的“神经末梢”，能够不间断地感知并记录温度的细微变化。

### 2.4.2 数据传输与智能预警机制

传感器采集到的海量温度数据，通过低功耗广域网（LPWAN）等物联网通信技术，被实时、稳定地传输至云端服务器或现场的监控中心。在数据平台上，管理人员可以直观地查看所有测点的温度曲线。更重要的是，系统内置了智能预警算法，能够根据预设的安全阈值（如内部温度5℃、内外温差>25℃等）进行自动判别<sup>[4]</sup>。一旦任何一项指标触及警戒线，系统便会立即通过声光报警、手机短信或移动应用推送等方式，向相关责任人发出明确的预警信息，确保问题能在萌芽状态得到及时干预。

### 2.4.3 基于成熟度法的强度推定

现代监控系统的价值不仅在于“发现问题”，更在于“预测未来”。通过将实测的完整温度历史数据输入到成熟度模型中，系统可以实时计算出混凝土的等效龄期，并据此推定其当前的实际强度。这一功能彻底改变了以往依赖28天标准养护试块的滞后管理模式。现场工程师可以随时获知“此刻混凝土的强度是多少”，从而科学、精准地决策诸如“是否可以进行预应力张拉”、“侧模能否拆除”等关键工序，极大地提升了施工效率与安全性，实现了从被动响应到主动预防的根本性转变。

## 3 结语

高寒地区公路桥梁冬季施工混凝土冻害防治，核心在于“防冻”与“促强”结合，构建“优选材料—精准热工—精细施工—智能监控”四位一体技术体系，低水胶比、高效防冻早强剂、科学保温设计是关键，且要针对特殊环境对常规技术适应性调整。系统化技术集成与严格全过程管理可在极端严寒下实现高质量施工。展望未来，该技术将朝多方向发展：材料上，研发适用于超低温、低气压的新型生态防冻剂等；技术集成化方面，将相变储能材料嵌入保温模板，发展多功能智能模板系统；管理智能化上，融合多种技术构建“数字孪生”工地，实现全流程智能决策与闭环控制；同时，推广清洁能源加热养护，响应“双碳”战略，实现绿色低碳化。

## 参考文献

- [1]纪伟.公路桥梁混凝土冬季施工技术研究[J].工程机械与维修,2024,(05):73-75.
- [2]邢金剑.公路桥梁冬季施工中混凝土浇筑的施工技术分析[J].四川水泥,2021,(06):63-64.
- [3]赵克凡,钟宪磊,罗争.沁伊高速公路桥梁工程冬季施工技术[J].中华建设,2025,(12):168-170.
- [4]周飞霞,邢桢昊,钱东来.混凝土冻害作用机理和防治措施研究[C]//《建筑科技与管理》组委会.2021年7月建筑科技与管理学术交流会论文集.浙江亿厦建设股份有限公司,; 2021:74-76.