

高寒地区桥梁冬季混凝土施工温控技术与裂缝防控措施优化

马晓鹏

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 高寒地区冬季气候严酷,低温、大风、干燥等恶劣环境对桥梁混凝土施工构成严峻挑战。混凝土在低温条件下水化反应速率显著降低,早期强度发展缓慢,易受冻害;同时,内外温差引起的温度应力极易导致早期裂缝的产生,严重影响结构耐久性与服役寿命。本文系统分析了高寒地区冬季混凝土施工中裂缝产生的机理,重点探讨了原材料优选、配合比优化、热工计算、保温蓄热法、综合蓄热法、电热养护及智能温控系统等关键技术。在此基础上,从材料、施工工艺、监测预警与管理机制四个维度提出裂缝防控措施优化路径,旨在为高寒地区桥梁工程提供科学、高效、经济的冬季施工技术支撑,保障工程质量与安全。

关键词: 高寒地区;桥梁工程;冬季施工;混凝土;温控技术;裂缝防控

引言

随着我国西部大开发和“一带一路”倡议的深入推进,大量交通基础设施工程向青藏高原、东北、西北等高寒地区延伸。这些地区年平均气温低,冬季漫长且极端最低气温可达 -40°C 以下,昼夜温差大,风力强劲,空气干燥。在此类环境下进行桥梁混凝土施工,面临着前所未有的技术难题。混凝土作为一种对温度高度敏感的复合材料,其水化反应、强度发展、体积稳定性均受环境温度显著影响。当环境温度低于 5°C 时,水泥水化速率急剧下降;若新拌混凝土在初凝前遭受冻结,其中自由水结冰膨胀将破坏水泥石结构,造成不可逆的强度损失;即使未冻结,低温也会延缓强度增长,延长拆模与张拉时间,影响工期。更为严重的是,混凝土在硬化过程中因水泥水化放热而内部升温,而外部受冷空气影响迅速降温,形成显著的内外温差,由此产生的拉应力若超过混凝土当时的抗拉强度,便会在表面或内部产生温度裂缝。此类裂缝不仅影响结构外观,更会成为水分、氯离子、二氧化碳等侵蚀性介质侵入的通道,加速钢筋锈蚀与混凝土劣化,严重威胁桥梁结构的长期安全性与耐久性。因此,如何在高寒地区冬季有效控制混凝土温度场演变,抑制温度应力发展,防止早期裂缝产生,是确保桥梁工程质量的关键技术瓶颈。

1 高寒地区冬季混凝土裂缝成因机理分析

1.1 温度应力裂缝

温度应力裂缝是高寒地区冬季最典型、危害最大的裂缝类型。其形成过程始于水泥水化反应释放大热量,尤其在浇筑后的1至3天内,混凝土内部温度可迅速攀升至 $40\sim 70^{\circ}\text{C}$ 甚至更高。与此同时,在高寒、大风的外部环

境中,混凝土表面通过热传导、对流和辐射等方式快速散热,导致表面温度远低于内部。这种显著的内外温差使得混凝土内部处于膨胀状态而外部趋于收缩,但由于结构自身(如基础约束、相邻已浇筑节段)或模板系统的限制,这种不均匀变形无法自由发生,从而在混凝土内部特别是表面区域产生拉应力。当该拉应力超过混凝土在相应龄期的极限抗拉强度时,裂缝便随之产生。这类裂缝通常呈现规则分布特征,如桥面板表面的龟裂状裂缝或墩身侧面的竖向裂缝,其深度可能从表层延伸至结构内部,对结构整体性和耐久性构成实质性威胁。

1.2 塑性收缩裂缝

塑性收缩裂缝主要发生在混凝土初凝前的塑性阶段。尽管高寒地区气温较低,但常伴随强风和极低的相对湿度,这使得混凝土表面水分蒸发速率极高。当表面水分蒸发速度远大于内部泌水向上迁移的速度时,表层混凝土因失水而发生体积收缩。此时混凝土尚未形成足够的结构强度以抵抗这种收缩变形,因而极易在表面形成不规则、无规律走向的浅表微裂缝。这类裂缝虽深度较浅,但数量众多,不仅影响外观,还为后续环境侵蚀提供了初始通道,间接加剧了结构劣化进程。

1.3 冻融循环损伤

若混凝土在达到临界强度(通常为设计强度的30%或不低于 5MPa)之前遭遇冻结,其内部孔隙中的自由水将结冰并产生约9%的体积膨胀。这种膨胀对尚未完全形成的水泥石骨架施加巨大内压,导致微观结构出现微裂纹甚至局部崩解。即便后续温度回升解冻,混凝土也无法完全恢复原有强度,且内部孔隙率显著增加,密实度下降^[1]。这种早期冻害不仅直接削弱结构承载能力,更为后

续服役期间反复的冻融循环破坏埋下隐患，显著缩短桥梁使用寿命。

1.4 其他影响因素

除上述主要机理外，裂缝的产生还受到多种辅助因素的影响。例如，骨料含泥量过高或级配不良会削弱界面过渡区性能，增加开裂敏感性；外加剂与水泥适应性不佳可能导致异常凝结或泌水，诱发不均匀收缩；施工过程中若浇筑分层过厚、振捣不充分或养护覆盖不严密，亦会加剧温度梯度或水分损失；此外，结构设计中截面突变、配筋不足或应力集中区域未采取加强措施，同样会成为裂缝萌生的薄弱环节。因此，裂缝防控必须立足于全链条、多维度的系统性思维。

2 高寒地区桥梁冬季混凝土施工温控关键技术

针对上述裂缝成因，必须采取系统性的温控技术，核心目标是保证混凝土在达到临界强度前不受冻，并将内外温差控制在安全阈值内（通常建议不超过 25°C ）。

2.1 原材料优选与预处理

原材料的选择与预处理是冬季施工温控的第一道防线。水泥应优先选用早期强度发展较快、水化热适中的普通硅酸盐水泥，避免使用高铝水泥等水化热过高的品种，以平衡早期强度与温升控制的需求。骨料需严格清除冰雪和冻结团块，并根据环境温度适当加热，一般控制在 40°C 以下，以防影响混凝土工作性或引发假凝。拌合水是主要的热量来源，通常通过蒸汽或电加热至 $40\text{--}60^{\circ}\text{C}$ ，但严禁使用沸水，以免造成水泥颗粒表面瞬间脱水而发生假凝现象。此外，必须掺加高效减水剂以降低水胶比，提高密实度和早期强度；同时，早强型防冻剂的使用不可或缺，它不仅能显著降低混凝土液相的冰点，还能促进低温下的水化反应，是保障混凝土在负温环境中安全硬化的关键材料。防冻剂的型号需根据施工期间预期最低气温精准选择，并严格控制掺量，避免因过量导致后期强度倒缩或耐久性下降。

2.2 配合比优化设计

配合比设计是调控混凝土性能的核心环节。在高寒地区冬季施工中，应在保证良好工作性的前提下，尽可能降低水胶比，这是提升混凝土强度、密实度及抗冻性的根本途径。适量掺加粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，有助于改善混凝土的和易性，降低水化热峰值，并提升后期强度与耐久性；然而，在严寒环境下，掺合料掺量不宜过高，以免过度延缓早期强度发展，影响防冻临界强度的及时达成^[2]。此外，砂率的优化也至关重要，合理的砂率能够增强混凝土的保水性和粘聚性，有效减少泌水和离析现象，从而降低塑性收缩开裂的风险。

2.3 热工计算与温度预测

科学的热工计算是制定合理温控方案的前提。施工前需对混凝土从搅拌、运输到浇筑、养护全过程的温度变化进行精确预测。计算内容包括拌合物出机温度、运输过程中的热量损失、入模温度、内部最高温升值及其出现时间，以及冷却至环境温度所需时长。传统方法多采用经验公式进行估算，而现代工程则越来越多地借助有限元数值模拟软件（如MIDAS/Civil、ANSYS等）建立三维瞬态热传导模型，实现对温度场的精细化模拟。通过热工计算，可以反向确定原材料所需的加热温度、保温层的合理厚度，以及是否需要辅以外部加热措施，从而避免盲目施工，提高温控措施的针对性与经济性。

2.4 核心温控技术

在具体实施层面，需根据工程规模、环境条件和结构特点灵活选用温控技术。保温蓄热法适用于日平均气温不低于 -15°C 且结构体形系数较小（如大体积承台、墩柱）的情况，其核心在于利用混凝土自身水化热，通过在模板外侧及顶面覆盖岩棉被、保温毯等高效隔热材料，最大限度减缓热量散失，使混凝土在正温环境中缓慢冷却并顺利达到临界强度。然而，在更严酷的环境中，单一保温往往难以奏效，此时应采用综合蓄热法——即在保温基础上掺加早强防冻剂。该方法通过化学手段降低冰点并加速水化，与物理保温形成双重保障，已成为高寒地区应用最广泛的主流技术。

对于极端低温（低于 -20°C ）、工期紧迫或结构安全性要求极高的关键部位，则需考虑主动加热措施。电热养护法包括电极加热、电热毯加热等形式，前者通过在混凝土内部预埋电极通电发热，后者则将柔性加热元件贴附于模板外侧，两者均能实现可控升温，但需注意防止局部过热^[3]。暖棚法则通过搭建封闭空间并内置热源（如暖风机），营造局部正温环境，适用于小型构件或局部修补，但能耗高、成本大，需谨慎评估经济性。

近年来，智能温控系统代表了温控技术的发展方向。该系统通过在混凝土内部预埋分布式温度传感器（如光纤光栅），实时采集温度数据并无线传输至监控平台。系统依据预设的温控目标（如最大温升 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ 、降温速率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 、内外温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ），自动启停循环冷却水管、电热装置等执行机构，实现对温度场的动态、精准调控。这种由“被动保温”向“主动调控”的转变，极大提升了温控的科学性与可靠性，是预防温度裂缝的有效手段。

3 裂缝防控措施的优化路径

3.1 材料层面的优化

材料是裂缝防控的源头。应大力推广高性能混凝土

(HPC)的应用,通过优化胶凝材料体系、严格控制水胶比和引入优质外加剂,获得高强、高耐久、低水化热、低收缩的混凝土,从根本上提升其抗裂能力。同时,可探索新型功能材料的工程化应用,例如内养护剂能在混凝土内部持续提供水分,有效抑制自干燥引起的自收缩;而钢纤维或聚丙烯纤维的掺入则可通过桥接作用阻止微裂缝扩展,显著提高混凝土的韧性与抗裂性。此外,必须建立严格的原材料进场检验制度,尤其对防冻剂的有效成分含量、匀质性及其与所用水泥的相容性进行专项检测,杜绝不合格材料流入施工现场。

3.2 施工工艺层面的优化

施工过程的精细化管理是确保温控效果落地的关键。应科学组织施工流程,尽量缩短混凝土从搅拌站到浇筑点的运输时间,并选择日间气温相对较高的时段进行浇筑作业,以减少热量损失。在浇筑过程中,宜采用分层、分段的方式,控制每层厚度不超过50厘米,并加强振捣确保密实,避免因振捣不足形成内部缺陷或泌水通道。混凝土终凝后必须立即开始保温保湿养护,养护期不应少于14天,对于重要结构建议延长至28天。保温层的拆除应遵循“先内后外、缓慢降温”的原则,避免因表面温度骤降引发二次温差裂缝。对于超长结构,合理设置后浇带可有效释放早期收缩应力;在应力集中区域预设诱导缝,则能引导裂缝在可控位置发生,避免无序开裂影响结构整体性。

3.3 监测与预警层面的优化

全过程、全方位的温度与应力监测是裂缝防控的“眼睛”。无论是采用智能温控系统,都应在结构关键部位布置足够密度的温度测点,定期记录数据并绘制温度-时间曲线,及时掌握温度场演变规律^[4]。在此基础上,可结合有限元分析建立温度应力计算模型,当预测的拉应力接近混凝土抗拉强度设计值的80%时,系统应自动发出预警,提示现场采取加强保温、局部加热等应急措施。养护后期及拆模后,还可引入超声波、红外热成像等无损检测技术对结构进行全面普查,及时发现潜在的内部缺陷或隐蔽裂缝,做到早发现、早处理。

3.4 管理与协同层面的优化

高效的管理体系是技术措施有效实施的保障。项目

开工前,必须针对具体工程特点编制详细、可操作的冬季施工专项方案,并组织专家进行论证评审,确保技术路线的科学性与可行性。同时,应加强对施工人员、监理单位的技术培训,使其熟练掌握冬季施工要点、温控标准及应急处置流程,切实提升全员质量意识。此外,建设单位、设计单位、施工单位、监理单位及材料供应商之间应建立高效的协同机制,实现信息实时共享、问题快速响应,共同应对施工过程中可能出现的技术难题,形成合力保障工程质量。

4 结语

高寒地区桥梁冬季混凝土施工是一项复杂的系统工程,裂缝防控是其核心挑战。本文研究表明,裂缝的产生主要源于温度应力、塑性收缩及早期冻害等多重机理的耦合作用。有效的温控技术体系应以热工计算为基础,科学组合原材料预处理、配合比优化、综合蓄热、电热养护及智能调控等手段,确保混凝土在安全温度环境中完成早期硬化。在此基础上,裂缝防控措施的优化必须超越单一技术层面,转向材料性能提升、施工工艺精细化、监测预警智能化与管理体系统协同化的系统集成。唯有如此,才能构建起全方位、多层次的裂缝防控屏障,为高寒地区重大桥梁工程的质量与耐久性提供坚实保障。未来,随着新材料、新工艺与人工智能技术的深度融合,冬季施工技术将朝着更智能、更绿色、更高效的方向持续演进。

参考文献

- [1]胡晋华.冬季条件下桥梁混凝土施工技术要点[J].交通科技与管理,2025,6(11):38-40.
- [2]杨添印,唐冲.桥梁施工中的大体积混凝土温控防裂技术[J].中国科技信息,2025,(17):102-104.
- [3]张云乔,刘文.道路桥梁冬季施工中的混凝土浇筑措施分析[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).宜春市畅达公路桥梁工程有限公司,2025:1734-1737.
- [4]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.