

# 高寒水利工程混凝土早期强度发展规律分析

和高升

中国水利水电第十六工程局有限公司, 福建 福州 350003

DOI:10.61369/ERA.20250900365

**摘 要 :** 本研究着重探究高寒水利工程混凝土早期强度发展特性。鉴于高寒区域存在低温侵袭、狂风呼啸、昼夜温差悬殊等独特环境状况,深入剖析各要素对混凝土早期强度增长的作用。运用理论剖析融合实践探索的手段,全面阐释混凝土配比设计方案、原材料固有属性、施工操作工艺等要素与早期强度变化间的潜在关联,归纳不同工况下混凝土早期强度演变规律,针对性提出强化混凝土早期强度性能的技术策略,旨在为高寒地带水利工程混凝土施工质量把控及工程安全保障供给理论支撑与实践指引。

**关 键 词 :** 高寒地区; 水利工程; 混凝土; 早期强度; 发展规律

## Analysis of the Development Patterns of Early Strength of Concrete in High-Altitude Cold-Region Water Conservancy Projects

He Gaosheng

China Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau No. 16 Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350003

**Abstract :** This study focuses on investigating the early strength development characteristics of concrete in high-altitude cold-region water conservancy projects. Given the unique environmental conditions in high-altitude cold regions, such as low temperatures, strong winds, and significant diurnal temperature fluctuations, this study thoroughly analyses the effects of various factors on the early strength development of concrete. By combining theoretical analysis with practical exploration, this study comprehensively explains the potential relationships between concrete mix design schemes, raw material properties, construction techniques, and early strength changes. It summarises the patterns of early strength evolution under different conditions and proposes targeted technical strategies to enhance early strength performance, aiming to provide theoretical support and practical guidance for quality control and safety assurance in concrete construction for water conservancy projects in high-altitude cold regions.

**Keywords :** high-altitude cold regions; water conservancy projects; concrete; early strength; development patterns

## 引言

随着我国水利工程建设向偏远高寒地区不断推进,高寒水利工程建设规模与日俱增。在高原高寒极端环境条件下,混凝土在浇筑后的凝结硬化过程中,由于水化反应在混凝土内部产生的高温与外界环境形成了温度差,当温度差过大时,所产生的温度应力将使得混凝土表面发生开裂,对混凝土工作性能产生巨大的威胁。早期强度增长态势欠佳,混凝土易出现开裂、强度未达标准等状况,对水利工程安全运行构成威胁,现阶段针对高寒区域特殊环境中混凝土早期强度发展规律的系统性探究仍存在欠缺。深入钻研该规律并提出切实可行的应对举措,对于保障高寒水利工程质量、降低工程风险以及推动高寒地区水利事业发展而言,具备重要的现实价值。

## 一、高寒地区环境特性及对混凝土早期强度的影响

### (一) 高寒地区气候环境特点

高寒地区呈现突出的低温特性,年平均气温偏低,施工期内长时间处于低温环境,部分区域极端低温可达零下数十度,风力

表现强劲,会加速混凝土表面水分蒸发与热量散失,昼夜温差幅度较大,白天升温与夜间降温交替频次高,致使混凝土内部产生温度应力<sup>[1]</sup>。冻融循环现象较为频繁,在正负温交替过程里,混凝土内部孔隙中的水分反复出现冻结与融化情况,对混凝土结构造成损害。这些独特的气候环境要素相互影响,给混凝土早期强度

作者简介:和高升(1987.07—),男,汉族,河南济源人,本科,工程师,研究方向:水利工程、混凝土。

发展带来严重阻碍（如图1所示）。



图1 高寒地区气候环境特点

## （二）环境因素对混凝土早期强度的作用机制

低温环境明显延缓水泥水化反应速度，致使混凝土早期强度增长迟缓，水泥水化需要合适的温度条件，低温会抑制水化产物生成，拖延混凝土凝结硬化的进程，强风会加快混凝土表面水分蒸发，造成表面失水干燥，进而产生塑性收缩裂缝，削弱混凝土结构的完整性，对强度发展产生不利影响。昼夜温差所引发的温度应力，在混凝土早期强度较低、抗变形能力较弱的情况下，容易导致内部微裂纹的产生与扩展。冻融循环过程中，水分冻结膨胀产生的压力，会使混凝土内部孔隙结构受到破坏，导致强度下降，这些环境因素共同发挥作用，对混凝土早期强度的形成与发展造成严重影响。

## 二、影响高寒水利工程混凝土早期强度的关键因素

### （一）原材料特性的影响

快硬早强型水泥在低温条件下可更快开启水化反应，较普通水泥能让混凝土早期强度更快提升，该类水泥中铝酸三钙与硅酸三钙含量较高，在较低温度下迅速和水反应并释放热量，推动强度发展，骨料的颗粒级配、强度及含泥量同样关键，级配优良的骨料可形成紧密堆积结构，增强混凝土骨架并提高强度；骨料强度不足会成为混凝土的薄弱环节；含泥量过高影响水泥与骨料粘结，导致强度降低。含泥量较高时吸附水泥浆体中的水分与胶凝材料，削弱界面过渡区强度，外加剂合理运用可改善混凝土性能，早强剂加速水泥水化，防冻剂降低水的冰点，减少冻害对混凝土早期强度的影响，减水剂降低水灰比，提升混凝土密实度与强度。外加剂使用需严格控制剂量，剂量过量可能使混凝土凝结时间异常或耐久性下降，实际工程中，不同品牌与批次的水泥、骨料和外加剂之间可能存在适应性问题，需通过试验进行匹配选择，确保混凝土早期强度稳定发展。

### （二）混凝土配合比设计

较低水灰比能减少混凝土内部孔隙，提升密实度，促进水泥充分水化，进而提升早期强度，但要保证混凝土具备良好和易

性，水灰比过低时，混凝土流动性变差，施工难度增大，易出现蜂窝、孔洞等缺陷。胶凝材料用量直接关系到水泥水化产物数量，适当增加胶凝材料用量可提高早期强度，不过用量过多会增加成本，还可能导致混凝土收缩开裂<sup>[2]</sup>。在高寒地区，为弥补低温对水化的抑制，可适当提高胶凝材料用量，同时需搭配使用粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，以此改善混凝土工作性和耐久性，砂率对混凝土工作性和强度有影响，合理砂率可使混凝土具有良好的流动性、粘聚性和保水性，保障施工质量和强度发展。砂率过高会增加混凝土需水量，降低强度；砂率过低则会使混凝土干涩，难以振捣密实，在高寒地区进行配合比设计时，还需考虑骨料含水率变化对水灰比的影响，以及冻融环境对混凝土抗冻性能的要求，通过调整配合比参数，平衡强度、工作性和耐久性等性能，以适应高寒地区特殊的施工和使用环境。

### （三）施工工艺的作用

搅拌时间不足易造成材料混合不均，影响水泥水化及强度发展；搅拌时间过长则可能使混凝土坍落度损失过大，对施工性能产生影响，在高寒地区，鉴于环境温度低，搅拌时可适当延长搅拌时长，以促进水泥与外加剂充分反应，需注意控制搅拌温度，防止因搅拌过程中热量散失过快而影响混凝土性能。运输过程中，低温环境容易使混凝土温度下降，延缓凝结时间，若运输时间过长或保温措施不到位，还可能导致混凝土受冻，因此需选用保温性能良好的运输设备，并合理规划运输路线，以减少运输时间，浇筑和振捣工艺同样不可忽视，浇筑时混凝土入模温度过低会对早期强度增长造成影响；振捣不密实会使混凝土内部出现空洞、蜂窝等缺陷，导致强度降低<sup>[3]</sup>。在低温环境下，可通过加热骨料、水等方式提高混凝土出机温度，确保入模温度符合要求，振捣时依据混凝土的流动性和结构特点，选择适宜的振捣方式和振捣时间，避免出现过振或漏振现象，养护环节在高寒地区至关重要，适宜的养护温度、湿度和时间能够为混凝土早期强度发展营造良好条件，养护不当则会严重影响强度形成，养护过程中，需实时监测混凝土温度和湿度变化，及时调整养护措施，防止混凝土受冻或失水干燥。

### （四）结构形式与尺寸的影响

薄壁结构散热速率快，低温环境中更易受冻，需更高早期强度抵御冻害；大体积混凝土内部水化热难散发，温度控制不当易发生温度裂缝，影响早期强度发展，薄壁结构浇筑后表面温度骤降，内部热量难补充，易致表面混凝土强度增长缓甚至受冻。大体积混凝土因内部水化热积聚，中心与表面温差过大，产生的温度应力可能超混凝土早期抗拉强度而引发裂缝，结构尺寸对混凝土早期强度亦有影响，大尺寸结构内部温度场分布复杂，温度应力大，导致早期强度增长不均；小尺寸构件受环境温度变化影响更直接，易因温度波动生裂缝，大尺寸基础结构浇筑后需采取分层浇筑、埋设冷却水管等措施控温；小尺寸构件则需加强保温防护。设计阶段应根据结构形式与尺寸，合理确定混凝土强度等级

与配合比，制定针对性施工方案与养护措施，确保混凝土早期强度满足工程要求，避免因结构因素导致强度缺陷与质量问题。

### 三、高寒水利工程混凝土早期强度发展规律及优化措施

#### （一）混凝土早期强度发展规律

初期受低温抑制，强度增长缓慢，增速远低于常温环境，随时间推移，在满足温度和湿度条件时，水泥水化反应持续，强度逐步增长，但整体增幅有限，不同配合比与原材料的混凝土，早期强度发展曲线存在差异：使用早强剂、降低水灰比的混凝土，早期强度增长相对较快；普通配合比的混凝土，强度增长则滞后。混凝土早期强度增速与环境温度关联密切，温度略升，强度增速加快，温度降低则明显减缓，大量工程实践和试验研究表明，环境温度在 $-5^{\circ}\text{C}$ 至 $5^{\circ}\text{C}$ 区间时，混凝土早期强度增长极缓；温度升至 $5^{\circ}\text{C}$ 以上，强度增速开始加快，但仍低于常温环境，昼夜温差对强度发展影响显著，温差越大，混凝土内部因温度应力产生微裂纹的可能性越高，进而影响强度增长。不同龄期的强度增速也不同，早期强度增长主要集中在浇筑后前7天，7天后增速渐缓，掌握这些规律，便于施工中合理安排工期，采取针对性措施促进混凝土早期强度发展。

#### （二）原材料优选策略

优先选用快硬硅酸盐水泥、早强型普通硅酸盐水泥，此类水泥可在低温环境下快速水化，提升混凝土早期强度，选用水泥时，还需关注其化学成分与矿物组成，确保铝酸三钙和硅酸三钙含量满足要求，对于骨料，需严格把控质量，选择颗粒级配优良、强度高、含泥量低的骨料。粗骨料宜采用连续级配，细骨料细度模数应保持适中<sup>[4]</sup>。在高寒地区，骨料易发生冻害，可选用抗冻性优异的骨料，并在使用前对骨料进行预热处理，避免骨料温度过低对混凝土性能产生影响，合理使用外加剂，依据工程需求和环境条件，选用高效早强剂、防冻剂及减水剂，早强剂可加速水泥水化，防冻剂能防止混凝土受冻，减水剂可降低水灰比，提升混凝土强度与耐久性。选择外加剂时，需开展外加剂与水泥的适应性试验，确定最佳掺量，部分早强剂可能导致混凝土后期强度增长迟缓，需与其他外加剂复合使用；防冻剂的掺量需根据最低气温进行调整，确保混凝土在低温环境下不受冻害，考虑使用新型功能性外加剂，如兼具抗冻、早强、减水等多种功能的复合外加剂，提升混凝土综合性能，满足高寒地区水利工程对混凝土早期强度和耐久性的要求。

#### （三）施工工艺优化措施

高寒地区施工，可通过加热搅拌水、预热搅拌设备来提升混凝土出机温度，搅拌工艺优化不容忽视，采用二次投料法，即先将部分水和水泥搅拌形成水泥浆，加入骨料与剩余的水继续搅拌，如此操作能够有效提高混凝土强度与工作性能，运输过程

中，需采取切实有效的保温举措，选用保温罐车减少混凝土热量散失（如图2所示）。同时严格控制运输时长，以保障混凝土入模温度符合要求；运输途中，还可用保温棉被等材料对罐车进行包裹，进一步加强保温效果。浇筑时要审慎选择浇筑时间与方法，尽量规避在低温时段进行浇筑，运用分层浇筑、连续浇筑等方式，确保混凝土的密实性与整体性得以保障；分层浇筑过程中，必须严格把控每层浇筑厚度和浇筑间隔时间，防止出现冷缝现象，振捣环节，需精准控制振捣时间与振捣深度，避免出现过振或漏振情况，借助高频振捣器提升振捣效率，确保混凝土振捣密实，养护阶段，应综合运用多种养护措施，暖棚法、覆盖保温材料法等，以此维持混凝土表面的温度与湿度，为其早期强度发展营造良好环境，暖棚法通过在施工现场搭建暖棚，并在内部设置加热设备来维持棚内温度；覆盖保温材料法采用棉被、草帘等材料覆盖混凝土表面，再在上方覆盖塑料薄膜以保持湿度。在养护过程中，需要定期监测混凝土的温度和湿度状况，依据监测结果及时调整养护措施，从而保证混凝土早期强度能够正常发展。



图2 混凝土保温罐车及运输保温措施

#### （四）质量控制与监测方法

严格检验原材料质量，确保符合设计标准。对水泥、骨料、外加剂等原材料开展批次检验，核查性能指标是否达标，定期验证并调整混凝土配合比，保障其适用性，施工过程中，强化对混凝土搅拌、运输、浇筑、振捣及养护等环节的监督检查<sup>[9]</sup>。制定详尽的施工质量控制标准与操作规程，要求施工人员严格落实，运用先进监测技术，预埋温度传感器监测混凝土内部温度变化，借助无损检测技术检测混凝土早期强度与内部缺陷，及时掌握早期强度发展状况，发现问题立即采取措施处理，确保工程质量，温度传感器可实时监测混凝土不同部位温度，为温度控制提供数据支撑；超声回弹综合法、雷达检测法等无损检测技术，能在不破坏混凝土结构的前提下，检测强度与内部缺陷。通过建立质量



追溯制度，对每个施工环节进行记录，明确责任主体，确保出现质量问题时可及时追溯原因并整改，引入信息化管理系统，整合分析质量控制与监测数据，实现对混凝土施工质量的动态管理与优化。

四、结束语

高寒水利工程混凝土早期强度受环境、原材料、施工工艺及结构等多因素制约，在低温、强风等特殊环境中，呈现初期增长

迟缓、受温度影响突出等独特规律，通过剖析内在作用机制，针对性提出原材料优选、施工工艺优化、质量控制与监测等举措，选用适配的水泥、骨料及外加剂，优化搅拌、运输、养护等环节，构建全过程质量管控体系。这些研究成果对保障高寒地区水利工程施工质量与安全具有重要意义，需进一步探索新材料、新工艺在强度提升中的应用，研究早期强度与耐久性的内在关联，完善技术体系，推动水利工程可持续发展。

参考文献

[1] 柴朝煌. 高寒地区植生混凝土蓄冷阻热性能及植生性能试验研究 [D]. 中国矿业大学, 2024.  
[2] 吴起源. 高海拔寒冷地区混凝土抗裂技术研究 [D]. 西安工业大学, 2024.  
[3] 王定波. 复杂环境下含水碾压混凝土受载损伤演化机理研究 [D]. 西京学院, 2023.  
[4] 史琦. 高寒区高流速泄水道混凝土损伤数值模拟研究 [D]. 西安理工大学, 2022.  
[5] 张奇. 高寒地区水工碾压混凝土施工质量评价研究 [D]. 兰州交通大学, 2022.