

冻融环境下桥梁墩柱耐久性混凝土材料性能分析

燕宏达

兴安盟安城建设工程有限公司 内蒙古自治区 兴安盟乌兰浩特 137400

【摘要】：本文针对冻融环境下桥梁墩柱混凝土耐久性不足的问题，系统分析了冻融循环引起的表面剥落、内部微裂及孔隙结构劣化等破坏机理，并识别出高水胶比、气泡体系不稳定、矿物掺合料应用不足等关键成因。在此基础上，提出以低水胶比配合比设计为核心，结合引气技术、矿物掺合料复配、纤维增强及有机硅表面浸渍等综合改性路径。通过快冻试验、超声波检测、气泡结构显微分析及盐冻耦合模拟等多维度验证手段，证实优化后混凝土在动弹性模量保持率、质量损失控制及抗渗性能方面显著提升，从而增强了桥梁墩柱在严酷冻融环境中的长期服役能力。

【关键词】：冻融循环；桥梁墩柱；耐久性混凝土；抗冻性能；材料优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.029

引言

在寒冷及严寒地区，桥梁墩柱长期暴露于干湿交替与温度剧烈波动的复杂环境中，频繁的冻融循环成为威胁混凝土结构耐久性的主要因素之一。尤其在水位变动区、浪溅区等高饱水区域，混凝土内部孔隙水反复冻结与融化，诱发显著的体积变化和内应力累积，导致材料微结构劣化并逐步扩展为宏观损伤。随着交通荷载与环境侵蚀的耦合作用加剧，传统混凝土体系在抗冻性、密实度及界面稳定性方面已难以满足长期服役需求。因此，深入剖析冻融作用下混凝土性能退化机理，针对性地优化材料组成与结构设计，构建科学有效的性能验证手段，对提升桥梁墩柱在恶劣气候条件下的安全性和使用寿命具有重要工程价值。

1 冻融环境下桥梁墩柱耐久性混凝土材料现存问题及成因分析

1.1 冻融环境对桥梁墩柱混凝土材料的核心破坏表现

冻融环境对桥梁墩柱混凝土材料的核心破坏表现集中于表面劣化与内部结构损伤的协同演化（见图1）。在低温条件下，混凝土内部孔隙水冻结形成冰晶，体积膨胀对孔壁产生持续压力，导致原有微孔扩展为可见裂缝^[1]。反复冻融循环促使裂缝由表及里逐步发展，尤其在水位变动区或浪溅区，混凝土饱水状态频繁变化，加剧了冻胀应力的累积效应。表层砂浆因失去骨料支撑而出现鳞片状剥落，暴露出粗骨料，减小保护层厚度。冻融作用破坏水泥水化产物的胶结结构，使孔隙连通性增强，渗透性上升，为后续水分、氯离子等有害物质侵入提供通道。这种物理损伤与化学侵蚀相互促进，进一步加速混凝土强度退化和弹性性能劣化，最终影响墩柱整体结构稳定性与服役寿命。

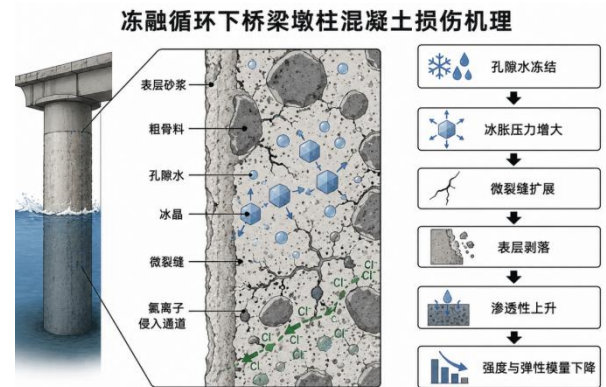


图1 冻融循环下桥梁墩柱混凝土损伤机理示意图

1.2 冻融循环导致混凝土材料性能劣化的关键因素

冻融循环引发混凝土材料性能劣化，本质是内部水分相变引发的力学损伤与微观结构演变共同作用的结果。低温环境下孔隙水结冰产生体积膨胀，在密闭孔隙中产生较高内应力，反复冻融不断扩展贯通水泥基体微裂缝，破坏原有胶凝结构完整性。混凝土抗冻性能受气泡体系分布直接控制，含气量不足、气泡间距系数过大均难以有效缓冲冰胀压力。偏高水灰比会增加可冻水含量、增强孔隙连通性，加速水分迁移与冰晶集聚，加剧结构损伤。环境干湿交替利于外界水分渗入，使混凝土长期处于高饱和状态，为冻融破坏创造条件。盐分中的氯离子既能降低冰点延长冻结过程，又会产生盐结晶压力与冻胀应力叠加，引发表层剥落与内部疏松，多因素耦合作用最终大幅降低混凝土强度、弹性模量及整体耐久性。

1.3 当前桥梁墩柱混凝土材料应对冻融破坏的不足

当前桥梁墩柱混凝土在抗冻融损伤层面仍存在明显技术短板。常规配合比设计多侧重强度指标，忽视孔隙结构优化与抗冻耐久性的协同把控，造成混凝土连通孔隙占比偏高，水分

易渗入孔隙并在冻结过程中引发结构损伤^[1]。引气剂虽已广泛应用,但实际施工受搅拌工艺、环境温湿度及水泥品类影响较大,气泡稳定性难以保证,易出现分布不均、气泡破损等问题,削弱了微气泡缓冲冰胀应力的作用。多数工程未结合墩柱长期处于水位变动区、浪溅区的特殊服役环境开展针对性抗冻设计,未采用低渗透胶凝体系与矿物掺合料复配工艺,混凝土密实度不足,抗离子侵蚀及抗冻融能力受限。同时现场养护常不到位,早期失水、低温养护阻碍充分水化,进一步降低材料耐久性能,多重短板共同制约桥梁墩柱在严酷冻融工况下的长期服役稳定性。

2 冻融环境下桥梁墩柱耐久性混凝土材料性能优化方案

2.1 混凝土原材料配比优化设计

在冻融环境下桥梁墩柱耐久性混凝土材料性能优化方案中,混凝土原材料配比优化设计是提升抗冻耐久性的关键环节。通过合理调控水泥品种与用量,优先选用低水化热、高抗硫酸盐侵蚀能力的硅酸盐类水泥,有效降低早期开裂风险。细骨料应控制含泥量与云母含量,确保颗粒级配连续,粗骨料则需具备良好压碎指标与坚固性,最大粒径不宜过大以增强界面过渡区密实度。掺入适量矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉或硅灰,可细化孔隙结构,减少自由水迁移通道,从而提升混凝土抵抗冻融循环破坏的能力^[3]。高效减水剂的引入在保证工作性的前提下显著降低水胶比,进一步增强基体致密性。骨料与胶凝材料之间的体积比例需经过多轮试配验证,以实现力学性能与耐久性能的协同优化,确保混凝土在反复冻融作用下维持结构完整性与功能稳定性。

2.2 混凝土改性技术应用及性能提升路径

冻融环境下桥梁墩柱混凝土的性能提升可通过多种材料改性技术实现。引气剂的合理掺入可在水泥浆体中形成大量均匀、稳定且互不连通的微小气泡,为冻结时水分膨胀提供缓冲空间,从而显著抑制内部损伤累积。此外,矿物掺合料如硅灰、矿渣粉和粉煤灰被广泛用于替代部分水泥,这不仅降低水化

热,还能细化孔隙结构,提高密实度,有效阻碍水分迁移与冰晶生长。同时,纤维材料的引入进一步增强基体抗裂能力,其中聚丙烯纤维可控制早期塑性收缩裂缝,钢纤维则提升后期抗冲击与抗剥落性能。在表面防护方面,采用低表面能的有机硅类渗透型涂料对混凝土进行深层浸渍处理,可在毛细孔内壁形成疏水膜,大幅降低吸水率而不影响透气性。这些技术路径从微观结构调控到宏观力学增强,共同构建起适应严酷冻融循环的高性能混凝土体系。

2.3 优化后混凝土材料冻融耐久性验证方法

为系统评估优化后混凝土在冻融环境下的耐久性能,需构建多维度、全过程的验证体系。试验以快冻法为核心,将标准尺寸试件在完全饱水状态下置于冻融循环设备中,经历规定次数的低温冻结与常温融化交替过程。每次循环后,通过共振频率法测定相对动弹性模量,追踪内部微结构损伤演化;同步记录试件表面剥落情况及质量变化,反映宏观劣化程度。除常规指标外,引入超声脉冲速度检测,分析波速衰减趋势以判断内部裂隙扩展状态。针对引气效果,采用显微图像分析技术对硬化混凝土薄片进行观测,量化气泡间距系数与含气量分布均匀性,确保微气泡体系具备有效缓冲能力。在模拟实际服役条件的盐冻耦合环境中开展对比试验,考察氯离子侵蚀与冻融协同作用下的性能退化特征。所有测试数据按周期归档,结合微观形貌(如SEM图像)与宏观性能演变规律,形成完整的耐久性验证链条,为材料优化效果提供科学依据。

3 结语

冻融环境严重威胁桥梁墩柱混凝土长期服役性能,其损伤由物理冻胀、化学侵蚀与结构劣化多重耦合引发。现有混凝土材料在孔隙结构、引气稳定性及抗渗性能上存在明显短板,通过优化配合比、掺入矿物掺合料与纤维改性,并辅以表面防护工艺,可从材料层面系统提升混凝土抗冻耐久性能。依托快冻试验、微观形貌观测及盐冻耦合模拟构建综合评价体系,精准表征复杂工况下材料性能演变特征。整套技术有效增强混凝土抗冻融损伤能力,为寒区桥梁等重大基建工程的耐久性设计与运维保障提供可靠技术支持。

参考文献:

- [1] 贾宪华.混凝土冻融破坏影响因素分析及耐久性试验[J].建筑机械,2022,(09):61-63.
- [2] 郝伟,韦丽,陶泽,等.除冰盐与冻融环境下在役混凝土桥梁耐久性评估[J].安全与环境学报,2022,22(03):1207-1216.
- [3] 李金涛,高明亮.高寒冻融环境桥梁混凝土耐久性设计研究[J].四川水泥,2020,(05):14.