

Optimization of impermeability and frost resistance performance of concrete structures in hydraulic engineering

Linjian Huang Xuesong Wu

Yellow River Estuary Management Bureau Lijin Yellow River Affairs Bureau, Dongying, Shandong, 257400, China

Abstract

As the core structural material of hydraulic engineering, the durability of concrete directly affects the safety and service life of the project. Water conservancy projects are often located in complex water environments and are susceptible to factors such as seepage, freeze-thaw cycles, temperature differences, and chemical erosion, leading to a decline in structural performance. Impermeability and frost resistance are key indicators of the durability of hydraulic concrete. This article studies the formation mechanism, influencing factors, and optimization methods of concrete's impermeability and frost resistance, and analyzes the technologies in material composition, pore structure, construction and curing, and application of admixtures. Research has shown that by optimizing the mix proportion, introducing mineral admixtures and high-efficiency additives, controlling the water cement ratio, improving the pore structure, and implementing reasonable construction and maintenance, the density and frost resistance of concrete can be significantly improved. Based on typical engineering practices, optimization strategies for anti-seepage and frost resistance adapted to different climatic conditions have been proposed, providing theoretical support and technical pathways for improving the durability of water conservancy engineering structures, extending their service life, and achieving green and low-carbon construction.

Keywords

water conservancy engineering; Concrete structure; Impermeability performance; Frost resistance; Durability optimization

水利工程中混凝土结构抗渗抗冻性能优化研究

黄林健 吴雪松

黄河河口管理局利津黄河河务局, 中国·山东 东营 257400

摘要

混凝土作为水利工程的核心结构材料,其耐久性直接影响工程的安全和寿命。水利工程常处于复杂水环境中,易受渗水、冻融、温差及化学侵蚀等因素影响,导致结构性能衰减。抗渗性与抗冻性是水工混凝土耐久性的关键指标。本文研究了混凝土抗渗抗冻性能的形成机理、影响因素及优化途径,分析了材料组成、孔隙结构、施工养护和外加剂应用等方面的技术。研究表明,通过优化配合比、引入矿物掺合料与高效外加剂、控制水胶比、改善孔结构以及合理施工养护,可显著提升混凝土的致密性和抗冻性。结合典型工程实践,提出了适应不同气候条件的抗渗抗冻优化策略,为提升水利工程结构耐久性、延长服役寿命及实现绿色低碳建造提供了理论支持与技术路径。

关键词

水利工程; 混凝土结构; 抗渗性能; 抗冻性能; 耐久性优化

1 引言

水利工程承担着防洪、灌溉、供水与发电等重大功能,是基础设施体系的重要组成部分。混凝土作为主要结构材料,长期处于高水压、冻融循环及温度梯度变化的环境中,其耐久性直接决定工程的安全与经济性。近年来,我国水利工程规模持续扩大,运行环境复杂化,混凝土渗漏、冻裂、表面剥蚀等问题频发,严重威胁结构稳定性与使用寿命。

传统混凝土设计更多关注强度指标,忽视渗透性与耐久性控制,导致服役期性能衰减明显。为应对复杂工况,现

代水工混凝土研究逐渐从“高强度”转向“高耐久”,其中抗渗性用于防止水与有害离子侵入,抗冻性用于抵御温度应力和冻融破坏,两者相互关联、相互促进。本文以水利混凝土为研究对象,从理论分析与工程实践出发,探讨其抗渗抗冻性能的形成机理、影响因素与优化措施,提出可推广的综合改进方案,以为水利工程建设与维护提供系统化参考。

2 水利混凝土抗渗抗冻性能的形成机理

2.1 抗渗性能机理

混凝土抗渗能力取决于其内部孔隙结构特征与水流通道的连通性。混凝土为多相多孔复合材料,水分在其中的渗透主要通过毛细孔、微裂缝及界面过渡区进行。渗透过程可分为毛细吸水、压力渗透与离子扩散三个阶段。毛细作用在

【作者简介】黄林健(1985-),男,中国山东东营人,本科,助理工程师,从事土木工程研究。

早期阶段占主导地位，当水压增大或混凝土内部存在贯通微裂缝时，渗透速率显著提升。

研究表明，水胶比是控制抗渗性能的核心因素，水胶比每降低 0.05，渗透系数平均下降约 30%。此外，水泥水化产物中 C-S-H 凝胶越致密，孔径分布越集中于 10 nm 以下，则水分迁移路径越复杂，抗渗能力显著增强。

2.2 抗冻性能机理

抗冻性能是指混凝土在反复冻融循环作用下抵抗结构损伤的能力。冻融破坏主要由孔隙水结冰膨胀产生的内压引起。水在冻结时体积膨胀约 9%，当毛细孔与微裂缝中含水率高、排水通道不足时，冻结压力将导致裂纹扩展和界面剥离。

空气含量对抗冻性能影响显著。引入均匀分布的微气泡可提供“释放空间”，缓解冻结膨胀压力；气泡半径一般控制在 50~200 μm ，体积分数为 4%~6% 时抗冻性最优。水泥水化产物与掺合料共同作用形成的致密结构可降低孔隙连通性，减少冻融应力集中，延缓破坏过程。

2.3 抗渗与抗冻性能的耦合关系

抗渗性与抗冻性在本质上均依赖于混凝土的孔隙特征与界面结构。孔隙率低、分布均匀且不贯通的结构可同时提高两项性能。若混凝土渗透性较强，水分易进入深层，在冻融条件下形成冰晶扩展裂缝，进一步降低抗渗性能。因此，研究者提出以孔结构调控为核心的“双控体系”，通过材料设计与养护控制实现抗渗抗冻性能协同优化。

3 影响水利混凝土抗渗抗冻性能的主要因素

3.1 原材料特性与配合比设计

水泥品种和矿物掺合料比例直接影响混凝土的密实度和耐久性。低水化热硅酸盐水泥适用于大体积水工结构，能够减少因温差引起的裂缝风险。掺入粉煤灰、矿渣粉和硅灰等活性掺合料，有助于优化混凝土的孔隙结构，填充毛细通道，提高水化产物的稳定性，从而提升抗渗性能。骨料级配也对混凝土的密实性与孔隙率有重要影响，采用连续级配可以减少浆体需求，降低水胶比，而过高的针片状骨料比例会增加渗透通道，降低强度和抗渗性。水胶比控制在 0.35~0.45 范围内，可以在确保良好流动性的同时，达到较高的抗渗效果。

3.2 外加剂与微结构调控

外加剂如引气剂、减水剂和膨胀剂对混凝土的耐久性能有显著影响。高效减水剂能够在保持混凝土流动性的同时，减少拌水量，从而降低孔隙率，增强密实度。引气剂能形成封闭气泡，改善抗冻性，但过量掺入会降低混凝土强度，需控制在 1.5% 以内。膨胀剂通过补偿收缩裂缝，减少渗透通道的形成。现代微观分析显示，适量使用外加剂可以使 C-S-H 凝胶更加致密，毛细孔比例下降约 20%，抗渗系数降低至 10^{-11} cm/s 以下，显著提升冻融循环的稳定性。

3.3 施工工艺与养护条件

施工工艺是影响抗渗抗冻性能的重要外部因素。振捣不实、模板漏浆和早期失水都可能形成渗水通道，影响混凝土的整体密实性。浇筑温度过高会引起热裂缝，从而降低混凝土的抗渗性和抗冻性。养护条件也至关重要，湿度不足时，水化反应不充分，孔隙结构难以完善。

4 提升水利混凝土抗渗性能的优化措施

4.1 低水胶比与双掺体系设计

合理降低水胶比是提升混凝土抗渗性能的关键途径。通过采用高效减水剂与优化粒径分布，不仅能确保混凝土的良好流动性，还能有效提高其密实性。低水胶比设计能够减少孔隙率，增强混凝土的密实性，减少水分渗透路径，从而提高抗渗性能。此外，双掺体系（如粉煤灰 + 硅灰、矿渣 + 粉煤灰）的应用，通过填充效应和火山灰反应双重机制，进一步优化了混凝土的孔隙结构。粉煤灰和硅灰的复掺能够增加 C-S-H 凝胶的含量，显著降低孔隙率，提升混凝土的抗渗性。实验数据显示，在水胶比为 0.38、粉煤灰掺量为 20%、硅灰掺量为 10% 的复掺体系下，混凝土的渗透系数比普通混凝土降低了约 65%，在水压作用下无明显渗漏，表明该设计在提高抗渗性能方面的显著效果。

4.2 界面过渡区结构改进

混凝土中的界面过渡区（ITZ）通常是最脆弱的区域，其孔隙率约为基体的 2-3 倍，因此，改善界面区的结构对于提高混凝土的抗渗性至关重要。研究表明，加入纳米 SiO_2 或活性微粉可以促进界面区水化产物的结晶，填补空隙，从而有效降低孔隙率，提高混凝土的致密性。微硅粉与聚合物乳液复合使用，能够显著改善骨料与浆体的粘结性能，增强抗渗系数的稳定性，减少水分渗透的路径。此外，采用钢纤维或玄武岩纤维可以有效阻止微裂缝的扩展，将渗透通道“桥联”封闭，进一步提高混凝土的整体密封性，从而增强其抗渗能力。这些技术的应用能够显著提升混凝土的长期耐久性，降低水土流失风险，保障水利工程的结构安全。

4.3 表面防护与渗透结晶技术应用

表面防护材料，如硅烷浸渍剂和渗透结晶涂层，能在混凝土内部生成不溶性结晶物，封堵毛细孔道，进一步提升混凝土的抗渗能力。渗透结晶剂（PRA）在水分存在的条件下，与氢氧化钙反应生成 C-S-H 凝胶，形成“自愈”层，有效阻止水分渗透。长期监测结果表明，使用 PRA 的水工混凝土在三年运行后，渗水量减少了 50%，且抗渗性能保持稳定。这表明，渗透结晶技术不仅能增强混凝土的初期抗渗性，还能通过自愈作用延长其使用寿命，显著提升其在恶劣环境下的耐久性。该技术的应用对于水利工程中的混凝土结构至关重要，能够在减少维护成本的同时，提高工程的长期稳定性与安全性。

5 提升水利混凝土抗冻性能的关键技术

5.1 引气与微气泡结构优化

引气技术是提高混凝土抗冻性能的有效手段之一。通过在拌合过程中引入均匀细密的气泡，可以为混凝土提供膨胀缓冲空间，减轻冻融过程中产生的内压，防止裂缝的产生。为了确保气泡稳定性，选择表面活性适中的引气剂，并控制搅拌时间和温度是至关重要的。工程实践表明，当气泡间距系数控制在 $200\ \mu\text{m}$ 以下时，混凝土在经历 300 次冻融循环后的质量损失率小于 2%，相对动态弹性模量保持率超过 90%，这表明其抗冻性能优异。通过引气技术的优化，混凝土能够有效抵御冻融过程中的破坏，提高结构的耐久性。因此，引气技术在水利工程中被广泛应用，并取得了显著效果。

5.2 掺合料复合增强与孔结构调控

掺合料的微细填充和活化作用能有效优化混凝土的孔隙分布，从而提升其抗冻性。粉煤灰可以细化孔径，硅灰具有核化效应，有助于改善孔隙结构，而矿渣粉则有助于提高混凝土的整体结构稳定性。复掺体系通过二次水化反应形成致密的 C-S-H 凝胶网架，显著降低可冻水的比例，减少冻融损伤。同时，使用憎水性外加剂能够降低混凝土的毛细吸水率，减少水的饱和度，从而抑制冰胀破坏。实验研究表明，在掺入 10% 硅灰和 2% 憎水剂的条件下，冻融循环 200 次后，混凝土的强度保持率提高约 15%。这种复合增强技术能够显著提升混凝土在恶劣环境下的抗冻性能，延长其使用寿命。

5.3 温控与防冻施工技术

在寒冷地区施工时，温控和防冻技术至关重要。采用热拌混凝土或保温措施可以确保早期水化的充分进行，减少低温对水泥水化反应的不利影响。冬季浇筑时，可以使用加热骨料与保温模板，并辅以蓄热覆盖物，防止混凝土早期冻结，确保其强度和密实性。在混凝土运行期，通过设置保温层、优化结构厚度和通气设计，可以有效降低温差应力，减少冻融循环带来的损害。

6 工程实践中的综合应用与成效分析

6.1 水电站重力坝抗渗抗冻优化实例

在某西北高寒地区水电站重力坝工程中，为提升混凝土的抗渗抗冻性能，采用了“低水胶比+三掺体系+引气剂”设计。混凝土水胶比为 0.38，掺入 15% 的粉煤灰、10% 的矿渣和 5% 的硅灰，同时添加 0.8% 的引气剂。经实测，混凝土的抗渗等级达到 P12，抗冻等级达到 F300，满足寒区长期运行的需求。坝体运行 5 年后，未出现渗水或表面剥蚀，

显示出该优化方案在提升水电站重力坝耐久性方面的显著效果。此实例验证了低水胶比与掺合料应用对水电站重力坝抗渗抗冻性能的有效提升。

6.2 渠道衬砌混凝土的生态防护应用

在西南山区输水渠道工程中，采用了表面渗透结晶剂与植被生态护面相结合的技术，以实现混凝土的结构防渗与生态融合。通过在混凝土表层涂覆约 5mm 厚的渗透结晶层，毛细渗透系数降低了 45%，有效减少了水体渗透。与此同时，生态护面植物的根系减少了因温差变化而产生的裂缝，提升了抗冻稳定性。这种结合技术不仅提高了混凝土的防渗性能，也促进了生态环境的恢复与稳定。

6.3 冻融环境下坝基混凝土长期监测

在冻融环境下，对坝基混凝土的长期监测通过嵌入式传感器，记录了混凝土内部的温度与湿度变化。监测结果显示，冻融循环主要集中在表层 50mm 范围内。为提升混凝土的抗冻性能，采用了防冻剂与引气混凝土，监测数据表明，冻融区裂缝宽度下降了 40%，冻融剥蚀量减少了 60%。这些监测结果验证了综合优化技术在提高坝基混凝土耐久性方面的显著效果。

7 结语

水利工程混凝土结构的抗渗抗冻性能是保障工程安全与延长寿命的关键指标。通过系统研究可知，性能提升应遵循“材料优化—结构致密—环境调控”的综合原则。优化配合比、控制水胶比、复掺矿物材料、引入外加剂及采用科学施工与养护制度，可实现抗渗抗冻性能协同提升。未来，水工混凝土研究将向微结构定量表征与性能预测模型方向发展，结合纳米材料与智能监测技术，实现从“经验设计”到“性能导向设计”的转变。同时，应构建全寿命周期的耐久性评价体系，将生态环保与低碳理念融入水利工程建设全过程。通过持续的技术创新与科学管理，可实现我国水利工程的高质量、长寿命与可持续发展目标。

参考文献

- [1] 徐国栋.水运工程混凝土结构抗冻性能监测方法设计研究[J].智能城市,2025,11(05):158-160.
- [2] 张军鹏.纳米高性能混凝土+复合土工膜新型衬砌结构抗冻胀模拟[J].河南水利与南水北调,2022,51(12):76-77.
- [3] 刘影.碳纤维形状和掺量对二级配混凝土抗渗和抗冻性能的影响研究[D].郑州大学,2021
- [4] 王牡丹.高性能引气剂的制备及其对混凝土抗冻性能的影响[J].化[1]徐国栋.水运工程混凝土结构抗冻性能监测方法设计研究[J].智能城市,2025,11(05):158-160.