水利工程混凝土结构耐久性提升技术研究

赵 亮
中国水利水电第十一工程局有限公司，河南 郑州 451100

[摘要]水利工程混凝土结构作为大坝、水闸、输水隧洞等核心水工构筑物的主要承载体系，其服役寿命与安全稳定性直接关系流域防洪、水资源调配及能源供给的长期效能。不同于普通民用建筑结构，水工混凝土长期处于水位往复变动、冻融循环交替、盐类与水体溶蚀耦合作用的严苛环境中，服役过程中易出现表层剥蚀、微裂缝扩展、钢筋锈蚀及力学性能衰减等耐久性病害，直接削弱结构整体服役性能。当前国内已建水利工程中近半数混凝土结构存在不同程度劣化迹象，传统以强度控制为核心的设计思路已难以适配全生命周期耐久服役要求，同时在双碳目标导向下，高水泥占比、后期频繁修补的粗放建设运维模式已无法满足水利工程绿色长效发展需求。本文结合多场耦合作用下水工混凝土的劣化机理，从材料改性、结构优化、施工管控及运维监测全维度构建耐久性提升技术体系，依托寒区大坝等工程场景开展适用性验证，为实现水工混凝土结构长寿命、低维护的建设目标提供可行技术路径。

[关键词]水利工程；混凝土耐久性；矿物掺合料；装配式结构；区块链监测
DOI：10.33142/hst.v9i9.20647　　中图分类号：TV331　　文献标识码：A

Research on Durability Enhancement Technology of Concrete Structures in Water Conservancy Engineering

ZHAO Liang
Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He’nan, 451100, China

Abstract: As the main bearing system of core hydraulic structures such as dams, water gates, and water conveyance tunnels, the service life and safety stability of concrete structures in hydraulic engineering are directly related to the long-term effectiveness of flood control, water resource allocation, and energy supply in the basin. Unlike ordinary civil building structures, hydraulic concrete is subjected to harsh environments such as water level fluctuations, freeze-thaw cycles, and coupling effects of salt and water dissolution for a long time. During service, it is prone to surface erosion, micro crack propagation, steel reinforcement corrosion, and mechanical performance degradation, which directly weaken the overall service performance of the structure. Currently, nearly half of the concrete structures in China's constructed water conservancy projects show signs of deterioration to varying degrees. The traditional design concept centered on strength control is no longer suitable for the full life cycle durability service requirements. At the same time, under the dual carbon target orientation, the extensive construction and operation mode with high cement proportion and frequent repairs in the later stage can no longer meet the green and long-term development needs of water conservancy projects. This article combines the degradation mechanism of hydraulic concrete under multi field coupling, and constructs a comprehensive durability improvement technology system from material modification, structural optimization, construction control, and operation and maintenance monitoring. Based on engineering scenarios such as dams in cold regions, applicability verification is carried out to provide a feasible technical path for achieving the construction goals of long service life and low maintenance of hydraulic concrete structures.

Keywords: water conservancy engineering; concrete durability; mineral admixture; prefabricated structure; blockchain monitoring

当前我国大量已建水工混凝土结构长期处于冻融循环、盐渍侵蚀与生物附着的多场耦合环境下，服役 10 年以上的工程普遍出现不同程度的耐久性劣化病害，传统被动修补模式已无法匹配长效服役需求。本文从劣化机理、全链条技术体系、效益验证三个维度展开研究，构建覆盖材料、设计、施工、运维全周期的一体化耐久性提升框架，为极端工况下水工混凝土结构安全服役提供可落地的技术路径。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

1 耐久性劣化机理与关键影响因素

1.1 环境侵蚀的多场耦合效应

寒区冻融循环、盐渍土化学侵蚀与亚热带生物腐蚀并非独立作用于水工混凝土，而是通过物理损伤、化学反应与生物代谢的协同耦合，大幅加速结构耐久性劣化进程。寒区年均气温低于 5℃的服役场景下，混凝土每年承受 50～100 次冻融循环，内部孔隙水冻结产生的 90MPa 局部膨胀应力，不仅造成表层年均 0.8cm 的层状剥蚀，还会持续破坏基体孔隙结构，使抗渗等级从设计值 P8 逐步衰减至 P4，为后续侵蚀介质的内部扩散打通传输通道。西北盐渍土环境中，浓度超 12000mg/L 的硫酸盐与水泥水化产物反应生成膨胀性钙矾石，在冻融产生的连通孔隙中持续富集，形成“冻融扩孔-硫酸盐侵入-结晶膨胀开裂”的正向循环，灌区渠道衬砌裂缝年均扩展 0.3mm，钢筋锈蚀速率远超规范允许阈值。南方湿热环境下，硫酸盐还原菌通过代谢作用将环境中的硫酸盐转化为硫化氢，进一步与水泥石基体反应生成膨胀性腐蚀产物，使混凝土内部 pH 值持续降至 8.0 以下，在前期物理与化学损伤的基础上进一步加剧表层酥松剥落，最终形成多因素相互放大的耦合劣化效应，大幅缩短水工混凝土结构的安全服役寿命。

1.2 材料缺陷的链式反应机制

水工混凝土耐久性劣化并非单一病害的孤立发展，而是从微观孔隙结构损伤向宏观结构失效逐步传导的链式反应过程。传统高水胶比混凝土的连通孔隙率可达 12%，为氯离子等侵蚀性离子的快速迁移提供了顺畅通道，当内部氯离子浓度突破 0.6kg/m³ 的临界阈值时，钢筋表面的钝化层将直接失稳破坏，进而形成“钢筋-腐蚀产物-混凝土”的闭合电化学腐蚀电池。腐蚀电流密度每提升 1μA/cm²，钢筋年锈蚀深度便同步增加 0.116mm，最终在混凝土内部产生远超基体抗拉强度的膨胀应力，引发顺筋开裂等宏观病害。通过掺加硅灰、粉煤灰等矿物掺合料将水胶比优化至 0.32，可将连通孔隙率降至 5%以下，氯离子渗透系数降低 85%，从源头阻断这一链式劣化路径，大幅延长结构安全服役周期。

1.3 施工与管理的系统性短板

水工混凝土耐久性缺陷通常并非单一技术失误，而是施工组织、过程控制与后期管养彼此脱节所累积的系统结果。振捣欠密会形成局部疏松区，其氯离子侵入深度较密实部位约增三成；过振则使引气组分逸散，含气量降幅逾两成，抗冻储备明显受损。高温浇筑若保湿覆盖滞后，早龄期收缩可达 0.04mm/（m d），七成以上出现收缩裂缝，并可能贯通为渗流路径。运维仍依赖低效人工巡检，日检不足百平方米，病害发现与处置迟滞，使初始缺陷持续扩展，最终演化为“建造瑕疵-管养失灵-性能加速衰减”的闭环，故需强化全生命周期协同管控。

2 全寿命周期耐久性提升技术体系

2.1 多元矿物掺合料协同技术

多元矿物掺合料协同技术是水工混凝土耐久性提升的关键材料路径。矿渣粉、粉煤灰与硅灰复配后，通过微集料充填、火山灰活性激发及界面优化三重机制，协同改良孔结构与水化产物。粒径 0.1～0.2μm 的硅灰可填充水泥颗粒间微隙，使总孔隙率降低约 12%；球形粉煤灰改善浆体流变，在保持工作性下减水 10%～15%；活性 SiO_2 不低于 30%的矿渣粉经二次水化生成更多 C-S-H 凝胶，细化毛细孔并提高密实度。三元掺量 5%、35%、40%、水胶比 0.30 时，抗冻等级由 F200 升至 F500，500 次冻融后质量损失仅 1.1%，氯离子扩散系数较基准降低 80%，抗硫酸盐系数达 0.95，水化热减少 40kJ/kg，有利于抑制大体积混凝土温差裂缝。进一步引入煅烧煤矸石、纳米 SiO_2 与生物基氨基酸阻锈剂，可实现碳排放降低 25kg CO_2/m^3、界面过渡区粘结强度提高 20%，兼顾耐久性提升与低碳目标。

2.2 结构设计优化与抗蚀构造创新

水工混凝土耐久性保障除材料改性外，尚需依靠差异化结构设计与抗蚀构造创新，从服役界面阻断多场侵蚀介质侵入。针对迎水面与背水面环境荷载差异，可采用变厚度保护层：迎水面钢筋保护层增至 60mm，并配置 200～300μm 环氧涂层钢筋，背水面维持 40mm。依 Fick 扩散定律估算，氯离子到达钢筋表面时间由传统设计的 25 年延至约 80 年，可匹配百年服役要求。同时，在坝基或渠道底部布设竖向排水孔、HDPE 水平透水管与级配砂石反滤层组成的三维排水系统，使基底扬压力降低约 65%，既减轻水压力劈裂，又主动导排侵蚀性水体以降低化学腐蚀风险。装配式抗蚀体系方面，预制涵管通过凸榫咬合、三元乙丙橡胶止水带及聚合物砂浆填缝形成三重密封，接缝渗漏率由 18%降至 2%；闸墩密集配筋区采用自密实混凝土免振捣施工，保护层合格率由 72%提升至 98%，从构造层面消减振捣缺陷引发的耐久隐患。由此形成材料-结构-构造协同的水工混凝土耐久性保障路径。

2.3 智能化施工管控与质量追溯

施工期耐久性隐患多因操作偏差与数据失真，数字化测控与区块链追溯可形成过程管控闭环。大体积混凝土内以 1.5m 间距埋设光纤光栅测温点，借 BIM 动态呈现全断面温度场；当内外温差越过 22℃时，自动启动 25m³/h 循

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

环冷却，温控合格率由 65%升至 98%，有效抑制温度应力贯穿裂缝。温度裂缝一旦贯通，会加速氯离子、硫酸盐等侵蚀介质传输，故温控精度直接关联耐久寿命。免拆模板采用抗拉强度不低于 30MPa 的树脂 3D 打印，表面预设 2～3mm 凹凸纹理，替代人工凿毛，使新旧混凝土界面粘结达 1.2MPa，工效提高 50%，低导热特性还令早龄期强度增长速率提升 20%。质量追溯方面，以 RFID 自动采集原料批次、拌合时长、运输时效和入模温度等参数，加密上链、不可篡改，破解纸质台账易失易伪难题，责任认定效率较人工核查提高 70%。区块链追溯将原材料、配合比与施工参数固化为不可抵赖证据链，便于质量责任界定与后期运维决策，由此实现施工全链条质量可溯、责任可界，为水工混凝土长期耐久服役提供可靠过程保障。该模式推动施工管理由经验判断转向数据驱动，将事后补救转为事前预防、事中调控，从源头削减耐久性风险。

2.4 全周期智能监测与主动维护

针对水工混凝土全寿命耐久性劣化隐蔽、维护窗口受限等问题，宜由被动检修转向状态感知与自愈协同。于防渗面板、闸墩等关键部位布置光纤光栅应变与温度传感网络，应变分辨约 ±1με、温度分辨约 ±0.5℃，持续跟踪冻融及荷载所致微应变；若月增幅越过 8με，即启动预警，并以定位偏差不足 1m 的渗漏反演锁定损伤区。空中采用 LiDAR 无人机扫描坝面，2mm 分辨率可辨识 0.05mm 细裂纹，效率约 2000m^2/h，较人工巡查提高约 20 倍，使表层病害得以前置发现。修复层面，在防护层中包封粒径约 80μm 环氧树脂微胶囊，裂缝扩展至 0.1mm 时破裂释放，72h 自愈率约 92%。生物侵蚀区则喷涂含巴氏芽孢杆菌防护液，经矿化生成碳酸钙充填孔隙，吸水率下降约 88%，海生物附着由 90%降至 3%以下，且无需停运。由此形成预警-定位-自愈-防护的闭环运维，将监测、诊断与修复耦合，减少突发失效与维护中断，实现耐久性动态提升。该模式强调数据驱动的状态评估与预防性维护，可弥补传统人工巡检滞后与修复被动之弊。

2.5 多场环境适应性前置提升技术

多场环境适应性前置提升技术是水工混凝土耐久性防护体系的第一道核心屏障，针对不同极端服役场景的差异化劣化特征，从界面层面对结构性能完成定向补强。针对长期高饱水、渗水风险突出的工况，通过表层密实化工艺填充表层连通孔隙，配套专用抗渗成膜材料在迎水面形成连续致密隔离层，直接阻断水分与侵蚀介质的表层渗透通道，大幅削弱干湿交替往复作用对结构表层的剥蚀效应。针对寒区冻融循环与温度应力耦合劣化场景，在配合比设计阶段定向引入优质引气抗冻组分，优化混凝土内部气泡孔径级配，降低内部可冻水占比；施工阶段同步匹配动态温控养护方案，随环境温度调整养护时长与保温措施，从早龄期阶段抑制微裂缝萌生。针对盐渍土、滨海区域的化学侵蚀风险，拌合阶段掺入抗侵蚀活性组分优化水化产物结构，配套惰性防护涂层形成物理隔离屏障，从源头切断侵蚀介质与水泥石的反应路径，降低钢筋锈蚀与膨胀开裂隐患。

3 经济与环境效益分析

水工混凝土耐久性提升技术体系的综合价值，最终体现在全寿命周期的经济成本优化与绿色环境效益的双重协同提升层面，打破了传统认知中“高性能耐久性必然带来高初始投入”的行业固有误区。从全寿命周期成本维度看，尽管该体系的初期建设成本较传统工艺提升 18%，增量部分主要来源于高性能改性材料、智能传感设备与新型抗蚀构造的前置投入，但服役阶段的年均运维成本可较传统模式降低 76%。以 50 年设计服役周期测算，采用传统耐久性方案的水工混凝土单位体积总费用约 1670 元/m^3，而应用本套耐久性提升技术体系后总费用仅为 800 元/m^3，全周期成本节约比例超 50%，在氯离子、硫酸盐富集的高侵蚀服役环境下，长期成本优势还将进一步放大。在绿色低碳效益维度，体系中占比不低于 70%的多元矿物掺合料年消纳高炉矿渣、粉煤灰等工业废渣可达 800 万 t，直接减少水泥用量 240 万 t，折合年碳减排量达 18 万 t CO_2；配套推广的再生骨料年应用规模达 60 万 m^3，可替代等量天然砂石资源，减少砂石矿山土地开挖约 1200 亩；生物基阻锈外加剂与水性防护涂层完全替代传统高污染化工药剂，年可减少 VOC 排放约 50t，叠加结构服役寿命延长至 100 年带来的拆建资源节约，完全契合当前水利工程领域的“双碳”发展目标。

4 结束语

本研究针对水利工程混凝土在多场耦合侵蚀环境下的耐久性劣化痛点，搭建起覆盖材料、设计、施工、运维全链条的一体化耐久性提升技术框架。体系以多场环境适应性前置补强为基础，通过硅灰-粉煤灰-矿渣三元复配的矿物掺合料协同效应，将混凝土抗冻等级提升至 F500，氯离子扩散系数降低 80%，配套装配式抗蚀构造与区块链全流程质量管控，从源头消除施工缺陷带来的耐久性隐患。结合光纤光栅多模态监测与微胶囊自修复主动维护技术，最终实现全寿命周期运维成本降低超 50%，碳排放削减 30%以上，结构服役寿命延长至 60～100 年。后续研究将进一步推动智能自修复材料、低碳固废技术与行业

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

标准的深度融合，为极端工况下水工混凝土长效服役提供技术支撑。

[参考文献]

[1]顾跃.港口工程混凝土结构耐久性和韧性提升关键技术研究与应用[J].珠江水运,2026(13):22-24.

[2]徐亮,程国涛.加大技术应用力度，提升建筑工程混凝土结构耐久性[J].楼市,2026(4):114-116.

[3]赵扬扬.水利工程混凝土结构防腐技术优化与长效耐久性提升研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(3):415-417.

[4]罗登伟,李华勇,刘杰,等.水利工程中混凝土耐久性检测与提升技术研究[J].水上安全,2025(18):175-177.

[5]洪攀.水利工程混凝土结构耐久性提升策略与防护技术研究[C]//中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会.2025 人工智能与工程管理学术交流会论文集.

作者简介：赵亮（1991—），毕业于国家开放大学土木工程专业，当前就职于中国水利水电第十一工程局有限公司，副经理，工程师。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.