水利工程混凝土结构耐久性评估与预防和修复技术

李汝献 李杰

枣庄大禹水利工程有限公司

DOI:10.12238/hwr.v8i12.5942

[摘要] 本文针对水利工程混凝土结构耐久性问题,从结构劣化机理、损伤评估方法与维护管理策略等方面开展研究,提出了水利工程混凝土结构预防和修复技术。

[关键词] 水利工程; 混凝土结构; 耐久性

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Durability Evaluation, Prevention and Repair Technology of Concrete Structure in Water Conservancy Project

Ruxian Li Jie Li

Zaozhuang Dayu Water Conservancy Engineering Co., Ltd.

[Abstract] In this paper, the durability of concrete structures in water conservancy projects is studied from the aspects of structural deterioration mechanism, damage assessment method and maintenance management strategy.

A set of scientific technology system of life cycle management is put forward.

[Key words] hydraulic engineering; concrete structure; durability

引言

水利工程作为国民经济与社会发展的重要基础设施,其混凝土结构的耐久性直接关系到工程的安全性、经济性与可持续性。

1 水利工程混凝土结构耐久性问题科学内涵

1.1 耐久性概念与理论基础

水利工程混凝土结构耐久性指结构在特定使用环境中保持预期性能与功能的能力,这一概念包括结构物理完整性、材料性能长期稳定性、使用性能持续性、结构安全动态演化过程^[1]。传统结构设计理论关注静力学与材料力学,耐久性理论从动态、开放与系统视角审视结构性能。混凝土是复合材料,其性能受多重因素影响,外部环境的物理、化学、生物作用与材料内部组织结构演变形成为动态耦合系统,温度变化、湿度波动、化学侵蚀、机械应力等因素综合作用导致混凝土材料微观结构持续调整,影响宏观力学性能^[2]。水利工程混凝土结构耐久性是开放、非线性复杂系统,传统线性确定性评估方法难以全面刻画结构性能动态演化过程,现代耐久性理论引入随机性、不确定性与复杂性理论,建立基于概率统计与模糊数学的评估模型,这种理论范式转变使耐久性评估从静态描述转向动态预测,从单一指标转向多维度综合判断。

1.2 水利工程混凝土结构面临的主要耐久性挑战

水利工程混凝土结构面临着多重耐久性挑战:它们通常处于水土大气多重界面交互区域,承受高温高湿、盐分侵蚀和冻融

循环等环境因素的影响,不同地区的环境特点导致结构面临的耐久性问题各异,如高寒地区需应对冻融破坏,热带地区则面临强烈的化学侵蚀与生物腐蚀风险^[3]。水电站大坝需承受静水压力、水位变化引起的动力学效应、泥沙冲刷、地震等多重载荷,而水库调度运行过程中频繁的水位变化更增加了结构承受交变应力的复杂程度^[4]。混凝土本身存在的微裂缝、孔隙、界面缺陷等材料固有缺陷,以及结构使用条件的不确定性,进一步加剧了这些耐久性挑战。

2 水利工程混凝土结构耐久性劣化机理分析

2.1 物理-化学耦合劣化机制

水利工程混凝土结构的劣化过程是物理-化学多场耦合作用的复杂系统,这一过程涉及微观尺度的材料组织结构演变、介观尺度的界面相互作用以及宏观尺度的结构性能转化^[5]。从微观角度审视,多场耦合作用导致混凝土内部组织结构发生显著变化,这种变化通过多重作用通道相互影响、放大与传递。

水利工程混凝土结构在昼夜温差、季节变化与水库调度过程中经历复杂的温度场演化。温度梯度引发的热膨胀与收缩应力,直接作用于混凝土的微观组织结构。水泥石基体内部毛细孔隙网络随温度变化呈现非线性膨胀与收缩,孔隙率与连通性发生动态调整。这一过程改变了混凝土的物理力学性能,为后续化学反应提供了动力学基础。

水利工程混凝土长期处于湿润环境,水分子在毛细孔隙中的传输与转化贯穿整个劣化过程。水分子通过扩散、渗流与毛

细作用,携带溶解性物质穿越混凝土微观组织。溶解盐分、腐蚀性离子在水分子作用下产生复杂的迁移与转化,改变孔隙溶液的化学组成。水分场不仅是物质传输的载体,更是推动界面化学反应的关键介质。

外部荷载与环境应力导致混凝土内部应力重分布,破坏原有的力学平衡状态。局部应力集中区域更易诱发微裂纹萌生与扩展。应力场通过改变材料的微观组织结构,调控化学反应的动力学过程。

钢筋与混凝土基体形成复杂的电化学微电池系统。氯盐、二氧化碳等腐蚀性介质改变电解质溶液的电化学性质,诱发电位差与电流密度变化。电化学腐蚀过程不仅导致钢筋表面氧化,还产生腐蚀产物,引发混凝土体积膨胀与微观组织破坏。电化学场的演化过程与物理场、应力场、水分场呈现多重耦合。

2. 环境因素与材料退化关联机制

水利工程混凝土结构暴露于高度复杂的自然环境,环境因素与材料退化之间存在多维度、非线性的关联机制。这种关联机制超越了传统的线性叠加模型,体现为开放的、动态演化的复杂系统特征。

温度循环导致材料内部产生热膨胀与收缩应力,引发微观尺度的组织结构调整。低温环境下,水分子结冰膨胀破坏毛细孔隙结构;高温环境则加速水泥水化产物的非可逆转化。温度场的长期作用导致混凝土微观组织不断演变,削弱材料的力学性能与致密性。热力学视角揭示,温度变化推动了材料内部熵增过程,加速微观缺陷的累积与扩展。

水分子在混凝土毛细孔隙中的迁移与转化过程极其复杂。高湿环境加速盐分迁移、腐蚀性离子扩散,改变孔隙溶液的化学组成。水分子同时作为反应介质与传输载体,在材料退化过程中发挥多重功能。水分场诱发的化学侵蚀、盐分结晶、硫酸盐反应等作用模式,显著影响混凝土的微观组织结构与宏观力学性能。

水库、河流、海洋等不同水环境的pH值差异,直接影响混凝土的化学稳定性。强酸性环境加速水泥水化产物的溶解与分解,弱碱性环境则可能诱发碱骨料反应。pH值的长期变化导致混凝土基体矿物相转化,改变材料的微观结构与化学组成。这一过程不仅影响材料的力学强度,还降低了材料的抗侵蚀性能。

藻类、细菌、真菌等微生物群落在混凝土表面形成复杂的生物膜。生物代谢过程产生的酸性物质、配体与胞外聚合物,直接腐蚀混凝土基体。微生物诱导的生物矿化过程改变混凝土表面微观形貌,增加材料的孔隙率与表面粗糙度。生物腐蚀因素与物理-化学作用耦合,形成材料退化的新型机制。

在寒冷地区,水分子反复冻结与融化过程对混凝土微观组织产生持续性破坏。冰晶形成时体积膨胀,挤压孔隙壁面,导致微裂纹萌生与扩展。多次冻融循环累积了微观损伤,降低混凝土的抗压强度与抗渗性能。冻融作用不仅表现为物理破坏,还伴随复杂的化学转化过程。

3 水利工程混凝土结构耐久性检测评估技术

3.1 非破坏性检测方法

非破坏性检测技术是通过结构无损探测,获取内部性能参数,实现对结构健康状态的精准诊断。非破坏性检测方法的发展历程体现了现代检测技术从定性到定量、从经验到科学的不断演进。

超声波检测利用声波传播特性,通过测量声波传播时间与波形特征定位混凝土内部缺陷,评估裂缝发展程度与结构致密性。低频声波检测对大尺度结构缺陷敏感,高频声波能捕捉微观材料组织变化。涡流检测技术通过感应电磁场分析其衰减与变形特征,擅长检测钢筋腐蚀程度、混凝土保护层厚度与均匀性。多频段、多场耦合检测模式能获取更丰富的结构内部信息。红外热像仪捕捉物体表面辐射热红外线,通过分析表面温度梯度与热传导特征反映结构内部裂缝、空洞、界面脱粘等缺陷。

3.2 全寿命周期性能监测技术

全寿命周期性能监测技术体系突破了传统的静态、周期性检测模式,构建了基于连续监测、实时数据分析的动态管理范式。全寿命周期监测不仅关注结构的即时状态,更重视对结构性能演化趋势的科学预测。

光纤光栅传感器、电阻应变计、位移传感器等嵌入式智能传感装置,实现了对关键参数的连续、精准采集。光纤光栅技术具有抗电磁干扰、测量精度高、可嵌入性强等优势,能够实时监测结构应变、温度、裂缝发展等多维度参数。分布式光纤传感技术进一步突破了传统点测量的局限,实现了对大跨度结构的连续性监测。

海量传感器数据经过深度学习模型处理,可构建结构性能预测模型。卷积神经网络、长短期记忆网络等先进深度学习算法,能从复杂的传感器时序数据中提取关键特征,识别潜在劣化趋势。概率统计模型与贝叶斯网络为结构性能预测提供了不确定性量化方法,显著提高了预警的精确度与可靠性。

低功耗广域网、5G通信等新一代通信技术,实现了对分布式传感器的高效数据采集与实时传输。边缘计算技术在传感器端进行数据初步处理,显著降低了中心数据处理系统的计算负担。云平台为监测数据提供了海量存储与智能分析环境,构建了面向水利工程混凝土结构的数字孪生系统。

4 水利工程混凝土结构预防和修复技术

4.1 预防性维护技术

水利工程混凝土结构预防性维护技术是关键策略,构建多维度技术框架。优化材料配比提升性能与抗侵蚀力,绿色配方降低水化热、减微裂缝风险,活性掺合料改善微观结构,新型表面防护材料阻隔介质,纳米级防护材料形成致密层,纳米增强材料提高抗腐蚀性能,钢筋防锈及不同防腐抑制剂各起防护作用。

4.2 修复加固关键技术

水利工程混凝土结构修复加固技术是系针对不同损伤类型与严重程度,构建差异化、精准化的修复加固策略。现代修复加固技术突破了传统的被动修补模式,引入了智能化、功能化的技术理念。

预浸碳纤维布、碳纤维板等复合材料具有高强度、低自重的显著优势。这类材料通过粘贴于混凝土表面,显著提升结构的承载能力与变形能力。先进的碳纤维复合材料加固技术引入了预应力控制、界面粘结优化等关键技术,实现了对结构性能的精准调控。智能化碳纤维复合材料even可集成传感功能,实现对结构性能的实时监测。

阴极保护技术通过在钢筋表面施加反向电流,抑制电化学腐蚀过程。电化学脱碱技术可去除混凝土表面碱性腐蚀产物,恢复混凝土的原始性能。电化学修复技术突破了传统物理修复的局限,实现了对腐蚀过程的主动干预。复杂电化学场调控技术为结构修复提供了新的理论基础。

自修复混凝土通过添加胶囊体、生物矿化细菌等特殊材料,赋予混凝土主动愈合微裂缝的能力。可膨胀修复材料能够填充裂缝,恢复结构的连续性。生物基修复材料利用微生物诱导矿化作用,实现对微裂缝的原位修复。这些技术突破了传统被动修复模式,构建了主动智能的修复理念。外伸预应力加固、钢板粘贴预应力技术能够有效调控结构内部应力场。先进的预应力加固技术引入了智能化张拉控制、应力实时监测等技术,实现对结构性能的精准调控。多场耦合预应力加固理论突破了传统单一物理场控制模式,为结构修复提供了更加科学的理论基础。

5 结论

水利工程混凝土结构全寿命周期管理技术研究表明,结构耐久性涉及物理-化学多场耦合作用,温度场、水分场、应力场、电化学场动态演化主导着混凝土性能退化过程。非破坏性检测

与全寿命周期监测技术为结构健康状态评估提供科学依据。预防性维护通过材料优化与表面防护提升抗侵蚀能力,修复加固技术针对不同损伤类型提供差异化解决方案。建议加强智能监测、主动防护、自修复等新技术研发应用,完善全寿命周期管理体系,保障水利工程混凝土结构长期安全运行。

[参考文献]

- [1]秦文平.全寿命周期下农田水利工程质量策略[J].河南水利与南水北调,2024,53(10):58-60.
- [2]徐文浩,胡文新,林晶.数字孪生水利工程的價值分析[C]//推动新阶段水利高质量发展全面提升水安全保障能力论文集.南水北调东线智能水务(北京)有限公司,2023:5.
- [3]孙玉玲.水工混凝土耐久性改善措施研究[J].黑龙江水利科技,2022,50(06):26-28.
- [4]代玉华.水利工程人工骨料坚固性对混凝土耐久性影响分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(04):16-19+195.
- [5]张文雅.城市生态防洪工程劣化评价及维修计划优化[D].河北农业大学,2020.

作者简介:

李汝献(1972--),男,山东枣庄台儿庄人,专科,工程师,枣庄大禹水利工程有限公司,研究方向:水利工程混凝土结构耐久性评估与全寿命周期管理技术。

李杰(1973--),男,枣庄市台儿庄区人,大学专科,工程师,枣庄大禹水利工程有限公司,研究方向:水利工程混凝土结构耐久性评估与全寿命周期管理技术。