

基于全生命周期理念的水工混凝土结构耐久性保障体系构建

董彩琴¹ 常 丹¹ 鲁常绕²

1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430010

2. 湖北省富水水库管理局 湖北 黄石 433200

摘 要：本文以全生命周期（Life Cycle）理念为核心指引，系统剖析水工混凝土结构从规划、设计、施工、运维到退役各阶段面临的耐久性挑战，提出并构建一套覆盖全生命周期、多维度协同、全过程闭环管控的耐久性保障体系。该体系以“预防为主、精准设计、精细建造、智能监测、科学评估、动态决策”为核心原则，通过整合材料科学、结构工程、信息技术、风险管理等多学科理论与技术，旨在实现水工混凝土结构耐久性性能的可预测、可控制、可优化与可延续，为我国及全球水工混凝土结构的长寿命、高可靠、低风险运行提供理论支撑与可行实践路径。

关键词：全生命周期；水工混凝土结构；耐久性；保障体系；智能监测

引言

水工混凝土结构作为大坝、水闸、泵站等水利关键基础设施的核心载体，具有工程规模大、投资额度高、服役周期长、风险等级高等特别，一旦发生耐久性失效乃至结构破坏，将引发灾难性安全事故，造成重大经济损失与社会影响，确保其服役期安全稳定意义重大。长期以来，水利工程领域普遍聚焦混凝土结构力学强度，忽视严酷服役环境的耐久性问题。大量工程实践表明，许多水工结构提前失效并非因承载力不足，而是在水环境、气候、侵蚀性离子等复杂作用下，发生碳化、冻融、钢筋锈蚀等不可逆物理化学变化，导致内部结构损伤持续累积、结构性性能退化，进而引发开裂、渗漏、剥落等耐久性病害，削弱了结构整体性、安全性与使用功能。这种“非荷载”因素主导的性能劣化过程隐蔽、渐进且不可逆，治理成本高、根治难度大。传统工程模式存在局限：设计理念上，将耐久性视为静态一次性指标，缺乏全周期考量；管理流程上，割裂建设期与运营维护期，重建设、缺养护、缺闭环。全生命周期理念强调从工程全流程视角审视结构性性能演变，将耐久性界定为工程系统在时间维度上的综合性性能表征。基于此，本文聚焦水工混凝土结构耐久性痛点，构建适配全生命周期的系统性保障体系，助力提升水利基础设施韧性与可持续发展水平。

1 全生命周期视角下水工混凝土结构耐久性挑战

水工混凝土结构耐久性问题贯穿工程全生命周期，各阶段挑战各异：（1）规划立项阶段：耐久性目标定义和量化缺失，决策者普遍重初始投资与工期，轻全生命周期成本控制，对工程环境环境勘察评估不足，易致设

计基准偏差，埋下耐久性先天隐患。（2）设计阶段：传统规范多依托经验取值，未充分考量工程环境特异性；设计人员对材料长期性能演变规律认识不足，难以精准预测结构全周期寿命；多重劣化机理耦合效应常被简化，设计方案针对性、前瞻性不足。（3）施工建造阶段：“三分材料，七分施工”，原材料质量波动、配合比控制不严等问题易埋下初始缺陷，成为日后劣化诱因；质量追溯体系不健全，施工问题溯源困难。（4）运行监测阶段：结构健康监测手段缺乏，难以精确捕捉早期损伤；维护策略被动滞后，多采用“事后抢修”模式，治理成本高、修复效果差；历史检测、监测数据分散，难以形成知识库指导科学决策^[1]。（5）退役再生阶段：大量老旧水利工程进入老龄化周期，剩余寿命评估缺乏科学方法，退役处置方案不合理；混凝土废弃物资源化利用率低，且前期设计未考虑结构可拆解性、材料可回收性，难以实现绿色循环利用。

综上，解决水工混凝土结构耐久性难题，亟需打破阶段割裂、单点管控的传统模式，构建覆盖全生命周期、多环节协同联动的系统性保障体系。

2 基于全生命周期的耐久性保障体系框架

针对上述挑战，本文提出一个“四阶八维”的耐久性保障体系框架。“四阶”指全生命周期的四个核心阶段：规划与设计、施工与建造、运维与监测、评估与决策。“八维”则是贯穿这四个阶段的八个关键支撑维度，共同构成体系的支柱。

2.1 体系总览：“四阶”协同

2.1.1 第一阶：规划与设计（前端预防）

此阶段是奠定耐久性基础的决定性环节。核心任务是精准识别环境作用、合理设定性能目标、科学选定结构材料,以及开展基于性能的全周期耐久性设计,从源头规避先天缺陷。

2.1.2 第二阶:施工与建造(过程保障)

此阶段是将设计意图转化为实体的关键,核心在于推进精细化施工工艺、落实全过程质量管控、应用智能化过程监控技术等,确保实体结构的内在质量与设计预期高度一致,消除施工初始隐患。

2.1.3 第三阶:运维与监测(状态感知)

此阶段是获取结构真实服役状态信息的窗口,通过部署多层次、多参数的智能传感网络,实现对结构关键性能指标(如裂缝、应变、温湿度、侵蚀离子浓度、钢筋锈蚀电位等)的长期、实时、自动化监测,动态捕捉结构劣化迹象。

2.1.4 第四阶:评估与决策(后端反馈)

此阶段是体系的智慧中枢,依托监测数据与定期检测结果,运用数值模型和人工智能算法开展结构耐久性状态评估、剩余寿命预测和风险量化分析,并据此生成最优的维护、修复、加固决策方案,并反向反馈至设计、施工阶段,指导同类工程的优化,形成全周期闭环管控。

2.2 体系支柱:“八维”支撑

(1) 环境作用精准识别与量化模型:综合地域气候、水质特性、水文情势、侵蚀介质等因素,构建精细化环境作用谱,为设计提供精准输入参数。(2) 基于性能的耐久性设计方法(PBD):从“经验规定”转向“目标导向”,明确不同服役年限下的性能要求,并反向推导材料与构造措施等核心设计参数。(3) 高性能与功能梯度材料体系:研发应用具有高抗渗、高抗裂、自感知、自修复等新型混凝土材料,并根据结构不同区域的环境暴露等级,采用功能梯度差异化设计。(4) 数字化与智能化施工管控:利用BIM、物联网等技术,实现原材料、配合比、浇筑、养护等施工全流程数字化追溯与智能预警,严控施工质量。(5) 多源异构健康监测系统:融合光纤光栅、压电陶瓷、无线传感器网络等多种传感技术,构建覆盖关键部位的立体化监测网络,实现多参数、全天候状态感知。(6) 耐久性性能演化与寿命预测模型:发展能够耦合多物理场、多化学反应的数值模型,准确模拟复杂环境下混凝土的损伤演化过程。(7) 大数据与AI的风险评估决策:运用机器学习、深度学习算法挖掘监测数据规律,实现损伤早期识别、风险智能预警与维护方案优化。(8) 全寿命周期成本(LCC)与风险(LCR)综合决策模型:将经济成本与安全风险统一纳入决策框

架,寻求最优的维护时机与策略组合。

3 各阶段耐久性保障关键技术与策略

3.1 规划与设计阶段:源头预防与精准设计

此阶段的核心是从根本上提升结构的“先天免疫力”,关键技术策略如下:

精细化环境作用调查与建模:摒弃粗放的经验取值,开展针对具体工程场址的长期环境监测,建立包含温度、湿度、降雨、水质(pH、侵蚀性离子浓度)、冻融频率等要素的时变环境数据库,借助GIS和气象水文模型,实线环境作用空间插值与未来情景预测。

推行基于性能的耐久性设计(Performance-Based Durability Design, PBDD):明确结构的设计使用年限(如50年、100年或更长),设定不同时间节点(如25年、50年)的性能极限状态(如最大裂缝宽度、钢筋开始锈蚀的时间、保护层剥落面积等),反向反向推导水胶比、保护层厚度、掺合料参数等核心指标,实现目标导向精准设计^[2]。

功能梯度材料与结构设计:认识到结构不同区域的环境严酷度不同,采用“按需设防”的策略。例如,在浪溅区和水位变动区采用超高性能混凝土(UHPC)或添加纤维增强的混凝土,在内部区域则可采用普通高性能混凝土,兼顾耐久性与经济性。

冗余设计与可检可修性考量:在关键传力路径上设置安全冗余,预留检测通道、安装传感器的位置以及未来可能的维修加固空间,为后期的运维创造便利条件。

3.2 施工与建造阶段:过程控制与品质保证

施工质量是耐久性保障的核心抓手,需全流程严控、闭环管理,关键技术策略如下:

落实原材料全流程质量控制:建立严格的供应商准入和原材料进场检验制度,重点把控水泥的矿物组成、骨料的碱活性、外加剂的相容性等关键指标,杜绝不合格材料入场。

实现高性能混凝土的精准制备与浇筑:采用自动化、信息化的搅拌站,确保配合比的精确执行;优化浇筑方案,防止离析、泌水,并采用分层、分块等温控防裂措施;落实大体积混凝土温控防裂措施,严控入模温度与内外温差。

推行精细化养护技术:根据环境条件,采用覆盖保水、喷淋、蓄水或喷涂养护剂等多种方式,保障7-14天关键水化期养护质量。对于重要工程,可采用内养护技术,通过预吸水的轻骨料或超吸水树脂(SAP)在内部提供持续的水分供应^[3]。

搭建数字化施工管理平台:依托BIM集成设计模型、

施工计划、质量验评标准等施工管理平台,通过移动终端和传感器,实时采集施工数据(如入模温度、振捣时间、养护温湿度),实现偏差自动预警和闭环管理。

3.3 运维与监测阶段:状态感知与数据驱动

此阶段的目标是将结构从“黑箱”变为“透明体”,关键技术策略如下:

构建智能健康监测系统(SHM):在结构的关键部位(如高应力区、高侵蚀区、施工缝、新老混凝土结合面)预埋或表面安装多种传感器。例如,光纤光栅(FBG)传感器可长期稳定地监测应变和温度;半电池电位法和线性极化电阻(LPR)探头可用于监测钢筋锈蚀状态;湿度/氯离子传感器可直接反映侵蚀介质的侵入深度。通过无线传输和边缘计算技术,实现数据的自动采集、初步处理和云端存储。

落实定期专项检测与无损/微损评估:除了自动化监测,还需辅以定期的人工巡检和专业检测。采用超声波、雷达、红外热成像等无损检测技术评估内部缺陷;通过钻取少量芯样进行实验室分析,获取混凝土强度、碳化深度、氯离子剖面等关键参数,用以校准和验证监测数据及数值模型。

建立结构数字孪生(Digital Twin):将BIM竣工模型、监测数据、检测报告、维修记录等多源信息融合,构建一个与物理实体同步演化的虚拟映射——结构数字孪生体,作为评估与决策的核心数据底座。

3.4 评估与决策阶段:智慧研判与闭环优化

这是体系的价值实现环节,实现科学评估、动态决策、经验反馈,关键技术策略如下:

构件多尺度耐久性性能演化建模:在数字孪生体的基础上,构建从微观(孔隙溶液化学、钢筋/混凝土界面)到宏观(构件、整体结构)的多尺度耦合模型。该模型能够同化实时监测数据,动态更新模型参数,从而高精度地反演结构当前的损伤状态,并预测其在未来不同环境情景下的性能演化轨迹。

开展AI的剩余寿命预测与风险评估:利用长短期记忆网络(LSTM)、图神经网络(GNN)等深度学习模型,直接从历史监测数据序列中学习损伤发展模式,克服传统物理模型在复杂耦合效应面前的局限性。结合蒙特卡洛模

拟等方法,对结构的剩余使用寿命进行概率化预测,并量化其在未来特定时段内发生功能失效或安全事故的风险水平^[4]。

推行LCC/LCR综合优化决策:面对多种可能的维护策略(如什么都不做、表面涂层、阴极保护、局部置换、全面加固),决策者需要权衡其成本与收益,LCC/LCR模型为此提供了量化工具。它计算每种策略在未来生命周期内的总期望成本(包括直接维护费、间接损失费)和总期望风险(用货币化或概率形式表示),并选择使“成本+风险”总和最小的策略。该决策过程是动态的,随着新数据的流入,模型会不断更新,决策也随之优化。

落实知识反馈与标准规范更新:将工程实践经验、数据模型纳入行业知识库,反向优化设计规范、施工指南与运维规程,推动行业耐久性管控水平螺旋式提升。

4 结语

水工混凝土结构耐久性保障是一项复杂的系统性工程,其解决核心并非依赖单项技术突破,而是构建覆盖全生命周期、整合多维要素、实现闭环管控的综合保障体系。本文提出的“四阶八维”保障体系,以全生命周期理念为核心指引,统筹规划预防、施工保障、运维感知、评估决策全过程协同,既是多学科技术的深度集成,更是水利工程管理范式的革新,推动水利工程从“传统建造”向“智能智造”、从“被动管控”向“主动治理”转型。

该体系的推广应用,可显著延长水工基础设施服役寿命、降低全周期成本与安全风险,破解水工结构耐久性退化难题,为保障国家水安全、推动水利事业高质量发展可持续发展提供坚实可靠的物质基础与技术支撑。

参考文献

- [1]吴有宝.水工混凝土结构耐久性研究[J].珠江水运,2020,(23):71-72.
- [2]张欢.港口在役水工混凝土结构耐久性检测与评估[J].珠江水运,2025,(05):130-132.
- [3]张昆.水工混凝土结构耐久性影响因素分析及控制[J].绿色环保建材,2020,(04):14+16.
- [4]冯卓.水工混凝土结构耐久性影响因素分析及控制[J].河南水利与南水北调,2020,49(01):50-51.