

# 水利工程结构耐久性与加固新技术研究

李 锋 吴 伟

菏泽市水务集团万福供水有限公司 山东 菏泽 274000

**摘 要：**水利工程结构耐久性受环境、材料、荷载等多因素耦合影响，常出现裂缝、渗漏、冻融破坏及钢筋锈蚀等问题，显著降低工程安全性与使用寿命。针对此，研究提出新型加固技术：采用高性能复合材料（如玄武岩纤维布、纳米改性混凝土）增强抗裂抗渗性；应用自修复混凝土与形状记忆合金实现结构自主修复；结合智能监测（光纤光栅传感器、无人机巡检）与数字孪生技术，实现耐久性动态评估与精准加固。上述技术可有效延长水利工程服役周期，提升全生命周期管理效率。

**关键词：**水利工程；结构耐久性；加固新技术

引言：水利工程作为防洪、灌溉、发电及供水的重要基础设施，其结构安全直接关系到区域经济与社会稳定。然而，长期处于复杂环境（如水流冲刷、冻融循环、化学侵蚀）及荷载作用下，水利工程结构易出现耐久性退化，引发裂缝、渗漏、钢筋锈蚀等病害，缩短工程寿命并威胁运行安全。传统加固方法存在材料性能局限、施工效率低、智能化程度不足等问题，难以满足现代水利工程长寿命、高可靠性的需求。因此，研发新型耐久性提升与加固技术，成为保障水利工程安全运行、实现可持续发展的关键课题。

## 1 水利工程结构耐久性退化机理分析

### 1.1 耐久性退化影响因素

（1）环境因素：水作为核心介质，长期浸泡会软化混凝土内部结构，加速有害物质渗透；氯离子易通过孔隙侵入，破坏钢筋钝化膜，诱发锈蚀；冻融循环使混凝土内部水分反复冻胀收缩，产生微裂缝并不断扩展；化学腐蚀（如酸雨、盐碱土环境）会与混凝土成分发生反应，降低其强度和密实度。（2）材料因素：混凝土碳化是空气中CO<sub>2</sub>与水泥水化产物反应，导致内部pH值下降，失去对钢筋的保护作用；钢筋锈蚀会使体积膨胀，挤压混凝土产生裂缝，进一步加剧锈蚀速度；裂缝扩展则打破结构完整性，为环境因素和荷载作用提供更直接的作用通道，形成恶性循环。（3）荷载因素：静力荷载长期作用易使结构产生应力集中，在薄弱部位引发微损伤；疲劳荷载（如水流反复冲击、车辆通行）会导致损伤累积，加速裂缝萌生；地震作用产生的瞬时巨大能量，可能使已有裂缝急剧扩展，甚至引发结构局部破坏<sup>[1]</sup>。

### 1.2 多因素耦合作用机制

（1）环境-材料-荷载协同作用模型：环境因素（如氯离子）先侵蚀材料，降低混凝土强度和钢筋抗锈能力；

材料性能劣化又使结构在荷载作用下更易产生损伤，而荷载引发的裂缝反过来加速环境因素的侵入，三者相互促进，放大耐久性退化效应。（2）耐久性退化的非线性演化规律：在退化初期，单一因素作用下结构性能下降缓慢，呈线性趋势；当多因素耦合作用后，损伤累积速度加快，性能曲线出现拐点，进入非线性退化阶段，后期可能因关键部位失效导致结构整体性能突变。

### 1.3 典型病害案例分析

（1）大坝渗漏与渗透破坏：某混凝土重力坝因施工时振捣不密实，存在微小孔隙，长期受库水渗透作用，孔隙逐渐扩大形成渗漏通道；同时，水流携带的杂质堵塞排水系统，渗透压力增大，最终导致坝体局部出现管涌，影响大坝稳定性。（2）渡槽混凝土剥落与钢筋锈蚀：某灌区渡槽处于盐碱地区，土壤中的氯离子随雨水渗入混凝土内部，导致钢筋锈蚀；锈蚀钢筋体积膨胀使混凝土表面出现裂缝，雨水进一步侵入，加速钢筋锈蚀和混凝土碳化，最终造成混凝土保护层剥落，影响渡槽承载能力。（3）水闸底板冲刷与不均匀沉降：某平原水闸因下游河道护底工程损坏，水流长期冲刷底板基础，导致基础土层流失；同时，闸室两侧填土压实度不足，在水压力和自重作用下，底板出现不均匀沉降，引发闸室裂缝，影响水闸正常运行。

## 2 水利工程结构耐久性评估方法

### 2.1 基于材料性能的评估方法

（1）混凝土强度检测：回弹法通过回弹仪测量混凝土表面硬度，结合碳化深度修正，间接推算抗压强度，操作简便、成本低，但受表面状态影响较大，需避开裂缝、蜂窝等缺陷区域；超声波法利用超声波在混凝土内部的传播速度与强度的相关性，通过发射和接收探头获取声速数据，可检测内部密实度及缺陷，两种方法

常结合使用,提高检测精度,适用于大坝、渡槽等混凝土结构的批量强度筛查。(2)钢筋锈蚀电位检测:以混凝土中钢筋为阳极、参考电极为阴极构成半电池体系,通过测量钢筋表面电位差判断锈蚀状态。当电位低于-200mV时,钢筋大概率发生锈蚀;电位在-100mV~-200mV之间时,锈蚀可能性中等。该方法可快速定位锈蚀区域,为后续修复提供靶向依据,广泛应用于水闸、桥梁等带筋混凝土结构检测<sup>[2]</sup>。(3)氯离子含量测定与扩散模型:采用钻芯取样法获取混凝土不同深度样品,通过化学滴定或离子色谱法测定氯离子含量,绘制氯离子浓度分布曲线;结合Fick第二定律建立扩散模型,计算氯离子扩散系数,预测不同服役年限后混凝土内部氯离子浓度是否达到钢筋锈蚀临界值,为结构防锈蚀维护提供时间节点,尤其适用于沿海、盐碱地区水利工程的耐久性评估。

## 2.2 基于结构性能的评估方法

(1)有限元模拟与寿命预测:利用ABAQUS、ANSYS等有限元软件,建立结构三维模型,输入材料参数(如混凝土弹性模量、钢筋屈服强度)、荷载条件(如静水压力、地震荷载)及环境侵蚀参数(如氯离子扩散系数),模拟结构在多因素作用下的应力应变状态;基于损伤累积理论,将材料性能劣化与结构力学响应耦合,预测结构性能衰减规律,推算剩余使用寿命,为大修、加固决策提供量化支撑。(2)可靠性分析与风险评估:以结构承载能力、正常使用功能为目标,确定耐久性失效临界指标(如混凝土强度降低30%、裂缝宽度超过0.3mm);通过蒙特卡洛模拟、响应面法等计算结构在服役期内达到失效指标的概率(可靠度),结合失效后果(如经济损失、安全风险)进行风险等级划分(低、中、高风险),为工程运维优先级排序提供依据,例如对高风险的病险水闸优先安排改造。

## 2.3 基于智能监测的评估技术

(1)光纤光栅传感器(FBG)监测应变与裂缝:将FBG传感器预埋或粘贴于混凝土内部及表面,利用光栅波长随应变、温度变化的特性,实时采集结构应变数据;当混凝土产生裂缝时,传感器波长发生突变,可精准捕捉裂缝萌生与扩展过程,监测精度达微应变级,且抗电磁干扰、耐腐蚀,适用于大坝坝体、隧洞衬砌等长期服役结构的动态监测。(2)无人机巡检与图像识别技术:采用搭载高清相机、红外热像仪的无人机,对水利工程边坡、坝面、渡槽外壁等人员难达区域进行巡检,获取高分辨率图像;通过深度学习算法(如卷积神经网络)对图像进行处理,自动识别裂缝、剥落、渗漏痕迹

等病害,计算病害尺寸与分布密度,生成巡检报告。该技术大幅提升巡检效率,减少人工成本,尤其适用于大型水利枢纽的周期性外观评估<sup>[3]</sup>。

## 2.4 综合评估体系构建

选取材料性能(如混凝土强度、钢筋锈蚀程度)、结构性能(如承载能力、变形量)、环境影响(如氯离子浓度、冻融循环次数)及监测数据(如应变值、病害发展速率)作为评估指标;采用层次分析法(AHP)结合专家打分确定各指标权重,其中结构承载能力、钢筋锈蚀状态等关键指标权重通常分配较高(30%~40%);通过模糊数学将定性指标(如外观病害等级)与定量指标(如强度检测值)转化为模糊矩阵,经多轮运算得出综合评价结果(优秀、良好、合格、不合格),实现对水利工程结构耐久性的全面、客观评估,为工程全生命周期运维提供系统决策方案。

## 3 水利工程结构加固新技术研究

### 3.1 新型加固材料研发

(1)高性能复合材料:玄武岩纤维以天然玄武岩为原料,经熔融拉丝制成,抗拉强度是普通钢筋的3-5倍,且耐酸碱腐蚀、重量轻,可制成纤维布包裹混凝土结构,提升抗裂与抗渗性能,适用于渡槽、水闸等构件加固;纳米改性混凝土通过掺入纳米SiO<sub>2</sub>、纳米TiO<sub>2</sub>等颗粒,填充混凝土内部孔隙,优化微观结构,使抗压强度提升20%-30%,抗氯离子渗透能力提高50%以上,能有效延缓沿海或盐碱地区水利工程的材料劣化。(2)环保型防腐涂料:水性环氧树脂涂料以水为溶剂,无挥发性有机化合物(VOC)排放,对环境无污染,涂覆于钢筋或混凝土表面,形成致密保护膜,隔绝水、氧气与氯离子,防腐寿命可达15年以上;石墨烯涂层凭借独特的二维片状结构,能紧密覆盖基材表面,阻止腐蚀介质渗透,同时具备优异的导电性,可通过电化学方法实时监测涂层完整性,适用于大坝闸门、输水管道等金属与混凝土结构的防腐保护<sup>[4]</sup>。(3)自修复材料:微生物诱导碳酸钙沉淀技术利用巴氏芽孢杆菌等微生物,在混凝土裂缝处代谢产生碳酸钙,填充宽度0.2-1mm的裂缝,修复率达80%以上,且修复过程绿色环保,无二次污染;形状记忆合金(如镍钛合金)制成的筋材预埋于混凝土中,当结构因荷载或温度产生变形时,通过加热使合金恢复原始形状,产生反向应力抑制裂缝扩展,同时可重复使用,适用于地震多发区水利工程的抗变形加固。

### 3.2 创新加固工艺

(1)3D打印技术修复复杂结构:针对水利工程中异形构件(如弧形闸门支臂、渡槽变截面段)的破损修

复,采用混凝土3D打印技术,根据构件三维模型,通过机械臂精准喷射特种修复混凝土,实现复杂形状的快速成型,打印精度可达 $\pm 2\text{mm}$ ,相比传统支模浇筑,施工效率提升3倍以上,且能减少材料浪费,适用于老坝改造、破损构件原位修复。(2)喷射混凝土与机器人施工:采用湿喷混凝土工艺,将水泥、砂石、外加剂与水按比例混合后,通过高压喷枪喷射至结构表面,混凝土密实度高、粘结力强,结合遥控式喷射机器人,可在大坝坝面、隧洞衬砌等高危作业区域自主移动施工,避免人工操作风险,同时机器人配备的激光定位系统,能确保喷射厚度均匀,误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内,提升加固质量稳定性。(3)预应力加固与体外索技术:对于承载力不足的梁式结构(如渡槽槽身、桥梁),采用体外索预应力加固技术,在结构体外布置高强度钢索,通过张拉施加预应力,抵消部分荷载产生的内力,减少结构挠度与裂缝宽度;索体采用防腐套管包裹,内充防腐油脂,抗腐蚀性能优异,同时可通过调节张拉力实现后期维护,适用于既有水利工程的承载能力提升。

### 3.3 智能加固与监测一体化技术

(1)嵌入式传感器与物联网(IoT)集成:在加固施工过程中,将光纤光栅传感器、压电传感器预埋于加固材料(如复合材料、喷射混凝土)内部,实时采集应变、温度、裂缝发展等数据;通过物联网模块将数据传输至云端平台,利用大数据分析技术对结构受力状态与加固效果进行评估,当监测数据超出阈值时,自动发出预警,实现加固与监测的同步进行,为结构长期安全运维提供数据支撑。(2)基于BIM的加固方案优化:建立水利工程结构的BIM模型,将材料性能、病害分布、荷载条件等参数导入模型,进行加固方案的三维模拟与受力分析,直观呈现不同方案(如粘贴纤维布、体外索加固)的效果;通过BIM碰撞检测功能,提前规避加固构件与原有管线、预埋件的冲突,同时可生成工程量清单与施工进度计划,实现加固设计、施工与运维的全流程数字化管理,提升方案可行性与施工效率<sup>[5]</sup>。

### 3.4 生物加固技术探索

(1)植物根系固坡与生态护岸:在水利工程边坡、河岸加固中,种植紫花苜蓿、狗牙根等深根植物,其根系可深入土层30-50cm,形成纵横交错的根系网络,增强土壤抗剪强度,减少水土流失;同时,植物茎叶可减缓水流冲刷,改善岸坡生态环境,相比传统浆砌石护岸,成本降低40%以上,且具备生态修复功能,适用于河道治理、水库边坡防护工程。(2)微生物矿化加固地基:针对水利工程软弱地基(如淤泥质土、砂土地基),向地基中注入巴氏芽孢杆菌与尿素、氯化钙营养液,微生物分解尿素产生碳酸根离子,与钙离子结合生成碳酸钙晶体,填充土壤孔隙,胶结土颗粒,使地基承载力提升50%-80%,渗透系数降低1-2个数量级;该技术无需大型设备,施工简便,且对环境无破坏,适用于水闸、泵站等工程的地基加固处理。

### 结束语

水利工程结构耐久性关乎其长期安全稳定运行,而创新加固技术是应对耐久性退化问题的核心手段。本文系统分析了环境、材料与荷载耦合作用下的退化机理,提出了高性能复合材料、智能监测及生物加固等新技术,实现了从被动修复到主动防御、从单一加固到全生命周期管理的转变。未来需进一步深化多学科交叉融合,推动新材料、智能化与生态化技术的工程化应用,为水利基础设施的高质量发展与韧性提升提供坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1]王凤龙.水利工程结构耐久性与加固新技术研究[J].现代工程科技,2025,4(6):65-66.
- [2]龙伟,陆光寿.水利工程混凝土结构耐久性研究进展.水利学报,2021,52(2),213-214.
- [3]陈虹.水利工程中水闸加固施工技术的实际应用[J].水上安全,2024,(10):160-162.
- [4]顾振汉.水利工程施工中防渗和加固技术研究[J].农业灾害研究,2024,14(05):272-274.
- [5]陈昕.大型水闸除险加固工程耐久性检测分析与问题探讨[J].水利技术监督,2023,(05):283-284.