

水利工程老化病害诊断及加固改造技术研究

冯 勇 孟祥专 张石祥

江苏省水利工程建设有限公司 江苏 扬州 225000

摘 要：水利工程老化病害诊断及加固改造技术是保障工程安全运行的核心手段。诊断技术涵盖外观检查、无损检测（如探地雷达、光纤传感）及综合评估体系，可精准识别裂缝、渗漏、钢筋锈蚀等病害。加固改造技术包括碳纤维布补强、劈裂式帷幕灌浆防渗、高压喷射注浆处理地基，以及智能化改造（如远程监控、自动化启闭设备）。该技术体系通过材料创新与智能诊断融合，显著提升工程耐久性与安全性。

关键词：水利工程；老化病害诊断；加固改造技术

引言：水利工程作为国家基础设施的重要组成部分，在防洪、灌溉、供水及发电等方面发挥着关键作用。然而，随着服役年限的增长，大量水利工程逐渐出现老化病害问题，结构性能衰退、功能失效等现象频发，严重威胁工程安全运行与效益发挥。准确诊断老化病害成因与类型，并采取科学有效的加固改造措施，成为保障水利工程可持续发展的紧迫任务。本研究聚焦于此，旨在系统探索水利工程老化病害诊断及加固改造技术，为工程维护管理提供理论支撑。

1 水利工程老化病害分类与成因分析

1.1 常见病害类型

（1）结构类病害：作为水利工程安全运行的核心隐患，混凝土开裂多因温度变化、荷载作用等导致内部应力失衡，裂缝不仅影响结构完整性，还会加速内部钢筋腐蚀；钢筋锈蚀主要源于环境中水分、氧气侵入，锈蚀后体积膨胀会进一步加剧混凝土开裂，形成恶性循环；地基不均匀沉降则与地质条件差异、地基处理不当相关，易造成工程结构倾斜、变形，严重时引发整体失稳。（2）功能类病害：渗漏问题常见于坝体、渠道等部位，多因防渗结构损坏或施工缝隙存在，导致水资源流失，同时增加工程渗透压力；启闭设备故障多由零部件老化、润滑不足、电气系统故障引发，直接影响闸门、阀门等关键设施的正常操作，制约工程调度能力；消能设施失效会使水流能量无法有效消散，高速水流冲击建筑物基础，缩短工程使用寿命。（3）环境类病害：水流冲刷集中在河道、溢洪道等区域，长期高速水流会带走建筑物周边泥沙，掏空基础；冻融循环在寒冷地区尤为突出，水分渗入工程结构后反复冻结膨胀、融化收缩，导致混凝土剥落、强度下降；生物侵蚀主要包括水生生物附着、微生物腐蚀等，会破坏工程表面保护层，加剧内部结构损坏。

1.2 病害成因机理

（1）材料劣化：混凝土碳化是空气中二氧化碳与混凝土中的氢氧化钙反应，降低混凝土碱度，丧失对钢筋的保护作用；氯离子侵蚀多来自海水、含盐土壤，氯离子易穿透混凝土保护层，加速钢筋锈蚀；碱骨料反应是混凝土中碱性物质与骨料中活性成分反应，产生膨胀性产物，导致混凝土开裂、强度降低。（2）环境因素：温度应力由昼夜温差、季节变化引发，工程结构因热胀冷缩产生内部应力，长期作用下出现裂缝；水压力在挡水建筑物中普遍存在，过大的水压力会加剧渗漏，还可能导致结构变形；地震荷载属于突发性外力，会使工程结构产生剧烈振动，超出承载能力时引发断裂、倒塌等严重病害^[1]。（3）设计施工缺陷：结构配筋不足会导致工程承载能力达不到设计要求，在正常荷载作用下易出现裂缝、变形；施工质量不达标涵盖混凝土浇筑振捣不密实、防渗材料铺设不规范等问题，为后期病害发生埋下隐患，降低工程整体耐久性和安全性。

2 水利工程老化病害诊断技术

2.1 传统诊断方法

（1）外观检查法：作为最基础、最直观的诊断手段，目视检测通过专业人员现场观察工程表面，识别混凝土裂缝、剥落、钢筋外露等明显病害，同时记录病害位置、形态、尺寸等信息；敲击检测则利用小锤等工具轻击结构表面，根据声音差异判断内部密实度—清脆声表明结构完好，沉闷或空洞声则提示可能存在内部疏松、空洞等隐患。该方法操作简便、成本低，但仅能检测表面及浅层病害，难以反映结构内部问题，主观性较强。（2）物理检测法：超声波检测通过向结构内部发射超声波，根据声波传播速度、衰减情况等参数，判断混凝土内部是否存在裂缝、空洞、不均匀性等病害，可精准定位病害深度与范围，适用于坝体、闸墩等厚重结构检测；回弹法

测强度基于混凝土表面硬度与抗压强度的相关性,利用回弹仪测量混凝土表面回弹值,结合碳化深度等修正因素,推算混凝土抗压强度,广泛应用于评估老旧工程混凝土强度衰减情况。两种方法均无需破坏结构,检测效率较高,但受混凝土表面状态、内部钢筋分布等因素影响,需专业人员解读数据^[2]。(3)化学分析法:氯离子含量检测通过采集混凝土芯样或粉末样品,采用化学滴定、仪器分析等方法测定氯离子含量,判断钢筋锈蚀风险—当氯离子浓度超过临界值时,会破坏钢筋钝化膜,加速锈蚀;碳化深度测定则使用酚酞试剂涂抹混凝土新鲜断面,根据试剂变色边界判断碳化深度,反映混凝土碱度降低程度,为钢筋保护状态评估提供依据。该方法能深入分析材料化学性能变化,但需取样检测,对结构有轻微损伤,且检测结果具有局部代表性。

2.2 智能化诊断技术

(1)无损检测技术:红外热成像技术通过红外相机捕捉结构表面温度场分布,因病害区域(如渗漏、空洞)与正常区域导热性差异,形成温度异常区域,可快速排查大面积渗漏、保温层损坏等问题,尤其适用于寒冷地区冻融病害检测;光纤光栅传感技术将光纤传感器预埋或粘贴于结构内部,实时监测温度、应变、裂缝开合度等参数,数据传输稳定、抗干扰能力强,可实现长期在线监测;探地雷达利用高频电磁波探测地下结构,通过分析反射波信号,识别地基不均匀沉降、地下空洞、防渗层破损等隐患,适用于渠道、堤坝基础检测,且检测深度较深、分辨率高^[3]。(2)数值模拟技术:有限元分析(FEA)通过建立工程结构三维数值模型,模拟荷载作用、环境变化下的结构应力分布、变形规律,进而预测病害发展过程—如模拟混凝土裂缝在水压力、温度应力作用下的扩展速度,或地基沉降随时间的变化趋势。该技术可替代部分复杂现场试验,提前识别潜在风险,但模型精度依赖参数设置与边界条件,需结合实际检测数据修正。(3)人工智能技术:基于机器学习的病害识别模型,通过大量病害图像、检测数据训练算法(如卷积神经网络CNN),实现对裂缝、锈蚀等病害的自动识别与分类,降低人工检测主观性,提升识别效率与准确率;预测模型则结合历史病害数据、环境监测数据,通过时间序列分析、深度学习等方法,预测未来病害发生概率与发展趋势,为工程维护决策提供前瞻性支持。目前该技术已在大型水库、灌区渠道等工程中试点应用,需持续积累数据以优化模型性能。

2.3 综合诊断体系构建

(1)多源数据融合:整合传统检测数据(如回弹

值、碳化深度)、智能化监测数据(如光纤传感应变、红外热成像图)与工程历史运行记录(如水位变化、维修记录、地质勘察资料),通过数据清洗、标准化处理,消除不同检测方法的误差与数据异构性,构建统一数据库。例如,将探地雷达检测的地基缺陷数据与历史沉降观测数据结合,可更精准判断沉降成因;融合氯离子含量数据与机器学习病害识别结果,能提升钢筋锈蚀风险评估准确性。(2)风险评估模型:基于层次分析法(AHP)构建病害等级划分体系,将病害类型(如结构类、功能类)、严重程度(如裂缝宽度、渗漏量)、影响范围(如是否危及核心结构)等作为评估指标,通过专家打分确定各指标权重,计算综合风险值,划分“低风险”“中风险”“高风险”三个等级。低风险病害仅需定期监测,中风险需制定维修计划,高风险则需紧急处置。该模型逻辑清晰、权重分配合理,可避免单一指标评估的片面性,为工程维修优先级排序提供科学依据。

3 水利工程老化病害加固改造关键技术

3.1 结构加固技术

(1)混凝土修复:针对混凝土裂缝、剥落等病害,环氧树脂灌浆技术通过高压设备将低黏度、高强度的环氧树脂浆液注入裂缝内部,浆液固化后可有效填充缝隙,恢复混凝土结构整体性与抗渗性,尤其适用于宽度0.1mm以上的非活动性裂缝修复;碳纤维布加固技术则利用碳纤维布高强度、轻量化的特性,通过专用粘结剂将其粘贴于混凝土受拉区或薄弱部位,增强结构承载能力与抗裂性能,施工便捷且不显著增加结构自重,广泛应用于坝体、闸室等混凝土构件加固。(2)金属结构防腐:阴极保护技术分为牺牲阳极法与外加电流法,前者通过在金属结构表面附着锌、铝等活性更强的金属块,利用电化学原理保护主体金属不被腐蚀,适用于小型闸门、管道等构件;后者通过外部电源向金属结构施加阴极电流,抑制阳极溶解反应,适用于大型钢闸门、启闭机等关键金属设备,可显著延长金属结构使用寿命。纳米涂层技术则将纳米级防腐材料(如纳米二氧化钛、纳米氧化锌)制成涂层,喷涂于金属表面,形成致密防护膜,阻隔水分、氯离子等腐蚀介质侵入,兼具防腐与抗老化性能,且涂层附着力强、耐磨损^[4]。(3)地基处理:高压喷射注浆技术通过钻机将带有喷嘴的注浆管插入地基深层,利用高压水流或气流切割土体,同时注入水泥浆液,与土体混合形成连续的水泥土加固体,改善地基承载力,适用于软土地基、地基不均匀沉降等问题处理,可有效提升坝基、渠堤的稳定性;微型桩加固技

术采用直径100-300mm的小型钻孔灌注桩,按一定间距布置于地基薄弱区域,通过桩体与地基土的协同作用承担荷载,施工时对既有工程扰动小,适用于老旧水利工程地基加固改造,尤其适合空间受限的施工场景。

3.2 功能提升技术

(1) 防渗技术:土工膜防渗技术采用高密度聚乙烯(HDPE)、复合土工膜等材料,通过焊接或粘接形成连续防渗层,铺设于坝体迎水面、渠道底部等部位,阻断渗水通道,具有防渗效果好、施工速度快、成本低等优势,适用于中小型水库、灌区渠道的防渗改造;塑性混凝土防渗墙技术通过在地基或坝体中浇筑塑性混凝土(具有低弹模、高抗渗性的特性),形成连续的垂直防渗墙,可有效拦截地下渗水,适用于坝基渗漏严重、地质条件复杂的大型水利工程,防渗深度可达数十米。

(2) 消能防冲:新型消力戽通过优化戽斗体型设计,利用水流在戽内形成的旋滚运动消耗能量,相较于传统消能设施,其消能效率提升20%-30%,且可减少下游冲刷,适用于高水头泄水建筑物;柔性防护网采用高强度钢丝绳网、格栅网等材料,铺设于溢洪道下游岸坡、河道冲刷段,通过网体的柔性变形缓冲水流冲击,保护岸坡土体不被冲刷流失,同时具备生态兼容性,可与周边植被协同防护。(3) 智能化改造:远程监控系统通过在工程关键部位安装视频监控、渗压计、位移传感器等设备,实时采集水位、渗漏量、结构变形等数据,经无线传输至控制中心,管理人员可远程掌握工程运行状态,实现病害早发现、早处置;自动化启闭设备结合PLC控制系统与电动或液压驱动装置,可根据预设程序或远程指令自动完成闸门启闭操作,替代传统人工操作,提升启闭精度与效率,同时减少人为操作失误,保障工程调度安全^[5]。

3.3 耐久性提升技术

(1) 新材料应用:高性能混凝土通过优化骨料级配、掺入矿物掺合料(如粉煤灰、硅灰)与高效减水剂,提升混凝土抗压强度、抗渗性与抗冻性,其使用寿命较普通混凝土延长50%以上,适用于严寒地区、高腐蚀

环境下的水利工程结构浇筑;自修复材料包含微生物自修复混凝土、胶囊型自修复材料等,前者通过在混凝土中掺入特定微生物与营养剂,当结构出现裂缝时,微生物被激活并代谢产生碳酸钙,填充裂缝;后者将修复剂封装于微胶囊中,裂缝扩展时胶囊破裂释放修复剂,实现裂缝自主修复,减少后期维护成本。(2) 施工工艺优化:低温施工技术通过采用冬季施工专用水泥、掺加防冻剂、对原材料加热保温等措施,确保混凝土在0℃以下环境中仍能正常凝结硬化,避免低温导致的混凝土强度不足、裂缝等问题,保障冬季水利工程加固施工质量;绿色施工技术则注重施工过程的节能环保,如采用模块化施工减少现场作业量、回收利用施工废水与建筑垃圾、使用低噪声设备降低环境干扰,在提升工程耐久性的同时,实现水利工程加固改造与生态环境保护的协同发展。

结束语

水利工程老化病害诊断及加固改造技术研究,是保障工程安全、延长使用寿命、提升综合效益的关键举措。通过深入剖析病害分类与成因,构建多维度诊断技术体系,并针对性地研发结构加固、功能提升及耐久性强化等改造技术,实现了从病害精准识别到高效处置的全链条覆盖。未来,需持续融合新材料、智能化与绿色化技术,推动水利工程维护向科学化、精细化方向发展,为水利事业高质量发展筑牢根基。

参考文献

- [1]李守义,陈尧隆,李炎隆.水利工程老化病害评估及除险加固决策支持系统[J].水利学报,2023,54(03):281-282.
- [2]王正中,孙逊,刘铨鸿.混凝土坝老化病害检测与评估技术研究进展[J].水利学报,2020,51(10):183-184.
- [3]廖云.水利工程中病险水库加固工程技术研究[J].水上安全,2024,(07):163-165.
- [4]马磊.水利工程中浆砌石坝老化病害诊断与修复技术研究[J].城市规划与设计,2025,(08):65-67.
- [5]刘云.水利工程老化病害诊断及加固改造技术研究[J].建筑理论,2025,(07):91-92.