

# 水利工程病害预防与治理技术研究

张文艳

四川中科博睿建设工程有限公司资阳分公司 四川资阳 641399

**摘要：**水利工程在保证农业灌溉、防洪减灾、水资源调配等工作中起着不可替代的作用，但是工程运行中受到诸多因素的叠加影响，各种病害问题不断积累，对工程的安全和使用寿命造成严重威胁。本文从水利工程常见病害的成因机理入手，整理出渗漏、裂缝、冻融损伤、碳化腐蚀、基础沉降等主要病害类型的发生规律，主要研究目前的预防措施和治理技术的适用条件以及实施要点，包括防渗体系的建立、混凝土结构缺陷的修复、地基处理加固、水下工程病害的处理等关键技术手段，并对工程病害智能监测和诊断方法进行了归纳总结。经过研究发现，系统化病害预防体系同分类施治的治理策略结合起来，可以有效地延长水利工程的服役年限，减少安全事故的发生。相关技术成果可以给同类工程的病害防治工作提供参考。

**关键词：**水利工程病害；渗漏防治；混凝土修复；健康监测

水利工程属于国家基础设施体系的重要组成，在防洪、供水、灌溉以及水力发电等各个方面起到重要的支撑作用。由于自然环境、材料老化、设计缺陷、施工质量等各方面的长期影响，水利工程在运行过程中不可避免地会出现各种病害，轻者影响工程的正常使用，重者会造成溃坝、管涌等重大安全事故，造成无法估计的经济损失和人员伤亡。近几年来，由于既有工程逐步进入老化期，病害问题越来越严重，病害预防和治理工作的重要性也越来越明显。系统整理水利工程病害发生规律、发展机理和防治技术，对提高工程安全管理水平、延长工程使用寿命有重大意义。本文从病害类型识别、预防措施设计、治理技术选用和监测体系建设四个方面入手，对水利工程病害预防与治理关键技术问题进行综合分析和研究。

## 一、水利工程病害类型及成因分析

### （一）常见病害类型

渗漏病害是水利工程中发生频率最高的一种病害，主要发生在坝体、堤防、闸门底座、渠道衬砌等部位，分为坝体渗漏、绕坝渗漏和坝基渗漏三种，严重时会引起管涌或者流土，危及工程整体的稳定性。根据水务署数据可知，2024年渗漏率目标为13.4%，计划到2030年或者之前将渗漏率降到10%以下。同时，上海市在2024年用老旧管网改造等方式把公共供水管网漏损率降低到7.4%。供水管网领域渗漏控制已经取得显著成效，但是整体渗漏防治仍然是水利工程安全运行的重要课题。

### （二）病害成因机制

水利工程病害的产生是由材料、环境、施工、运行管理等各方面因素相互影响而产生的。材料因素属于内在原因，混凝土配合比不合理、集料品质差等都会直接降低混凝土的耐久性和抗渗性。环境因素属于外部驱动力，水力侵蚀、冻融循环、干湿交替和化学腐蚀等持续的影响，加快了结构材料性能劣化的速度。施工因素是直接原因，工艺缺陷如振捣不密实、养护不到位、防渗层施工不合格等都会造成早期缺陷的出现。运行管理因素是病害发展的加速器，巡查、发现和处理的迟缓，会使得最初的一小问题慢慢扩大，最后变成严重的安全隐患。对以上各个方面的成因机制进行系统的剖析，就是采取有效的预防和精准治理措施的科学依据。

## 二、水利工程病害预防体系构建

### （一）设计阶段的病害预防

病害预防要从工程设计阶段开始，把耐久性设计理念贯穿到工程全寿命周期管理当中。结构设计时应根据工程所处的环境条件来合理选择混凝土的强度等级及保护层厚度，在高侵蚀性环境中应提高混凝土的抗渗等级要求，在易渗漏处设置专门的防渗结构体系。在材料选择上，应选用低水化热、高密实性的低碱水泥，合理掺入粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料来改善混凝土的孔结构，在寒冷地区工程中应加入引气剂来提高抗冻融性。在构造设计上，伸缩缝、沉降缝、止水结构的合理布置非常重要，缝间止水材料要具有良好的弹性及耐老化性，留

有维修更换的空间。地基设计时应充分考虑地质勘察资料的使用,对软弱地基、液化地基和岩溶发育地段做专项处理设计,防止因地基问题引发上部结构病害。设计阶段对于病害风险的预测以及防控,属于整个病害预防体系中投入产出比最高的部分。

## (二) 施工阶段的质量管控

施工阶段是病害预防措施落实的中心环节,质量控制是保证防病害设计意图得以实现的重要保证。混凝土施工质量控制时,必须严格按配合比设计要求执行,保证现场水灰比不大于设计值,加强搅拌均匀性及浇筑连续性管理,防止冷缝产生。振捣作业必须按规定的间距、深度进行,不得漏振、过振,模板支撑体系要有足够的刚度,防止浇筑时产生变形位移<sup>[1]</sup>。养护管理上,混凝土浇筑后要立即覆盖保湿,保温养护时间必须满足设计要求,在寒冷天气中要采取有效的防冻措施。防渗工程施工中,防渗层接缝处理、铺设搭接宽度、压接质量都会影响到防渗效果,施工过程中要安排专人对每一道工序进行全过程的质量监督,每道工序完成后都要做隐蔽工程验收。基础处理施工质量检验要采用多种检测手段相结合的方式,对灌浆效果、地基承载力和沉降量做综合评价,保证基础处理达到设计要求的效果。

## 三、渗漏与裂缝病害治理技术

### (一) 渗漏病害治理技术

渗漏治理技术的选择要考虑渗漏类型、渗漏量大小、工程部位、运行条件等因素。坝体渗漏治理一般采用垂直截渗加灌浆的方式,垂直截渗适用于均质土坝,用截水墙切断渗流通道;灌浆技术有帷幕灌浆、劈裂灌浆两种,帷幕灌浆用于坝基岩体裂隙封堵,劈裂灌浆用于土坝坝体加固和防渗。堤防渗漏治理时,常常使用高压旋喷桩截渗技术,即在堤基内注入水泥浆液形成连续防渗帷幕,该方法施工速度快、对原有工程扰动小,在软弱地基堤防的渗漏处理中得到了较多的应用。混凝土结构渗漏大多是由裂缝或者施工缝处理不好造成的,常见的治理措施有化学灌浆封堵、柔性止水材料嵌填、防水涂料涂抹等,化学灌浆材料以聚氨酯和环氧树脂为主,前者适合于活动性渗漏,后者适合于稳定性渗漏的永久封堵<sup>[2]</sup>。渠道衬砌渗漏可采取表面涂抹防渗砂浆、铺设土工膜或喷涂防水涂料等措施进行处理,具体方案要结合渠道断面尺寸、水流情况和经济性来确定。

### (二) 裂缝病害治理技术

裂缝治理要依照裂缝的形成缘由、种类以及活动

状况等来决定合适的处理办法。宽度小于0.2mm的表面微细裂缝,可以采用表面封堵法处理,常用的有弹性防水涂料、聚合物砂浆和柔性密封胶等,施工前要对裂缝两侧一定范围内基面进行打磨清洁处理,保证涂层与基面粘结强度。宽度大于0.2mm的结构性裂缝要用压力灌浆法进行深层处理,环氧树脂灌浆材料强度高、黏结力强,适合于干燥环境下裂缝的加固,聚氨酯灌浆材料遇水膨胀的特性,在潮湿或者带水裂缝处理中更优。对于贯穿性裂缝或者影响结构整体性的深层裂缝,单纯的化学灌浆不能从根本上解决,需要结合开槽嵌填柔性材料、增设钢板锚固、碳纤维布粘贴加固等方式进行综合处理。活动性裂缝由于缝宽随温度或者荷载的变化而变化,因此治理方案应该优先选择柔性封堵材料,在裂缝两端设置止裂孔,防止裂缝向两端延伸扩展。裂缝治理完毕后要创建定期观测制度,监视裂缝宽度改变趋向,评判治理成果并依照情况来决定是否需要执行进一步的加固工作。

## 四、混凝土结构耐久性修复与基础加固技术

### (一) 混凝土结构耐久性修复

混凝土结构耐久性修复的主要目的就是恢复或者提高结构的抗渗性、抗冻融性和抗腐蚀性,从而延长结构的使用寿命。对表层碳化深度达到或者接近钢筋保护层厚度的混凝土构件,先凿除碳化劣化层,对裸露钢筋进行除锈防腐处理后再用聚合物改性砂浆或高性能修补砂浆进行截面修复,修补料的收缩性能和弹性模量要与基底混凝土相匹配,减小修补界面的应力集中。对冻融损伤造成表层脱落的混凝土构件,在凿除疏松层、露出密实基面之后,应选用抗冻性能好的喷射混凝土或者抗冻聚合物砂浆进行修补,修补完毕后表面应涂刷防水涂料形成隔水层,防止水分再次侵入<sup>[3]</sup>。对钢筋锈蚀膨胀造成的开裂剥落的构件,要采用电化学除氯或者阻锈剂渗透等方法来控制钢筋的进一步腐蚀,再对截面缺损部位进行修复,根据承载力验算结果来决定是否需要增设加强措施。水下部位混凝土病害修复由于施工环境特殊,一般采用水下环氧灌浆料、水下修补砂浆或者钢板围套等专项修复技术,施工前需要对修复部位进行精确探测,制定专项施工方案。

### (二) 基础病害处理与加固技术

基础病害的治理难度一般大于上部结构,处理方案要结合地质条件、工程重要性和目前的运行状况来综合确定。对因地基承载力不够而造成沉降超标的工程,常

用的加固方式有锚杆静压桩、高压旋喷桩等，锚杆静压桩通过将荷载传到深层持力层来控制沉降，适合于既有建筑物地基加固不破坏上部结构运行的场合；高压旋喷桩在加固承载力的同时还能形成防渗帷幕，对同时存在承载力不足和渗漏问题的地基具有较好的综合处理效果。对于坝基扬压力过大造成的稳定性问题，一般采用排水减压与灌浆加固相结合的方式，即在坝基上设排水孔幕以降低扬压力，在坝基渗漏通道处进行灌浆封堵，两方面共同提高坝基抗滑稳定性。岩溶地基处理应按溶洞大小、埋深和充填情况分块处理，浅层溶洞用开挖清除充填物再回填混凝土，深层大溶洞用钻孔注浆充填或桩基础绕过等方法<sup>[4]</sup>。液化地基的处理措施主要有强夯法、振冲碎石桩法和灌注桩法等，选择时应根据液化土层的深度和液化程度来决定。基础加固处理完毕后，应对工程的变形和渗流进行连续观测，以检验处理的效果，并指导以后的维护工作。

## 五、水利工程病害智能监测与预警技术

### （一）病害监测技术体系

随着传感技术、信息技术的发展，分布式光纤传感技术开始在坝体、堤防渗漏监测中得到应用，它是在工程体内预先埋设光纤传感器，可以对温度、应变场进行连续的分布式监测，从而找到渗漏异常区的位置和范围。以益阳市资阳区为例，首次使用分布式光纤传感技术对堤防险情进行巡查，探测距离可以达到10公里以上，险情位置可以精确到2米以内。分布式光纤声波传感系统在武汉市水务系统中给供水管网装上了“神经末梢”，可以实现故障点的准确定位，误差不超过20公里的误差。另外，在嘉兴市域外配水工程盾构隧洞内，用分布式光纤传感技术做渗漏监测，可以准确找到30秒内渗漏水大于20升的渗漏点，定位误差为10米。这些应用实例说明，它已经成为水利工程智能监测的主要方式。

### （二）病害诊断与预警方法

病害诊断和预警方法革新给水利工程安全运行提供强有力的科技支持。有限元数值模拟就是建立高保真的结构模型，把实时监测的数据和仿真结果进行动态比较，从而对结构的应力应变状态进行精细化的评价，并且发出超限预警。机器学习技术，比如支持向量机、随机森林等算法，可以对大量的历史和实时监测数据中的隐藏

模式加以挖掘，进而自动找出异常信号并智能地对可能的病害种类加以分类，这样就大大加强了早期风险预警的能力<sup>[5]</sup>。数字孪生技术创建起物理实体同虚拟模型之间实时交互、同步演进的数字镜像，把多种监测、检测记载以及运维信息融合起来，给达成工程健康状况的动态感知、深入诊断以及预测性维修决策赋予了新的平台。预警体系的建立要科学地确定预警的分级和动态预警阈值，保证智能诊断的结果可以无缝地进入运维管理的过程，从而形成一个闭环式的监测、预警、评价、处理的智能安全管理系统。

## 结束语

水利工程病害预防和治理是贯穿工程整个寿命周期的一系列工作，必须依靠设计、施工、运行管理等各个方面的密切配合来完成。病害的有效预防要依靠科学合理的工程设计、严格规范的施工质量控制和完善的日常维护管理制度；病害治理技术的选择要根据对病害成因和发展规律的正确认识，选择适合于不同病害类型的治理方案，保证治理工作技术的可靠性、经济性。伴随着智能监测技术、数字化管理手段的不断发展，病害的早期发现、预防性养护的能力也越来越强，有利于推动水利工程安全管理模式由被动应付转向主动防范。工程实践当中，要重视积累病害案例数据，不断总结治理经验，完善病害防治技术体系，给水利工程长期安全稳定运行赋予强有力的科技支撑。

## 参考文献

- [1] 刘大川, 高茂森. 水利工程水闸常见病害及加固施工技术研究[J]. 新发现, 2025, (09): 91-93.
- [2] 杨海龙, 程冰清, 李萌. 水利工程中桥梁常见病害与检测评定方法浅析[J]. 技术与市场, 2025, 32(05): 128-131.
- [3] 王险峰. 水利工程渗漏勘察与防渗治理的对策建议[J]. 珠江水运, 2023, (24): 79-81.
- [4] 陈保增. 水利工程混凝土建筑物的表层病害修复结构设计[J]. 工程技术研究, 2022, 7(24): 161-164.
- [5] 祁之来. 水库大坝病害分析及整治措施应用[J]. 科技创新导报, 2021, 18(34): 69-71.