

水库大坝常见病害成因分析及防治技术研究

玉 珍

库伦旗水库事务中心 内蒙古 通辽 028000

摘 要： 水库大坝长期处于野外复杂服役环境中，各类结构性病害的渐进式发育会持续削弱工程运行稳定性，传统粗放式病害处置模式已难以适配当前高标准的安全管控需求。梳理大坝结构受力特征与病害演化的内在规律，本文拆解渗漏、裂缝、剥蚀、沉降等常见病害的诱发逻辑，厘清不同防治技术的适配场景与应用边界，从排查识别、工艺优化、协同治理、长效运维四个维度搭建全链条病害防控体系，为水库大坝的病害治理与结构安全保障提供实操支撑。

关键词： 水库大坝；病害演化；防渗加固；结构补强；长效运维

引言

水库大坝作为水利防洪与水资源调配的核心枢纽，其结构稳定性直接关系到下游区域的运行安全。野外露天长期服役状态，让坝体持续承受水体浸泡、温度交变、水位波动的多重侵蚀，原生施工缺陷与外部环境扰动的叠加，会逐步催生各类隐蔽性结构性损伤。传统病害处置多聚焦显性问题的单点修补，忽略多病害之间的衍生关联，难以从根源阻断病害的持续发育。厘清各类病害的形成机理，搭建适配复杂工况的防治技术体系，是当前水库大坝运维领域亟需推进的核心工作。

1 水库大坝运行基础特性与病害形成机理

1.1 水库大坝结构组成与运行受力特征

水库大坝的整体承载体系包含坝体主体、防渗构造、排水系统与外围防护结构。各部分结构各司其职，支撑水库蓄水运行的基本功能。坝体主体阻挡水体堆积压力，防渗构造阻断水体渗透路径，排水系统疏导多余积水，弱化水压堆积对坝体的持续作用^[1]。大坝运行阶段长期承接水体侧向压力、自身自重荷载以及坝基土体的反向支撑力。不同蓄水水位会改变坝体受力格局，让坝体不同区域形成差异化应力分布。迎水面直接接触水体，受力强度更大，坝基位置承担整体结构重量，容易出现应力集中现象。持续的荷载作用会慢慢引发材料微观形变，逐步积累结构损伤。

1.2 大坝外部服役环境的作用机制

水库大坝长期暴露于野外自然环境，各类环境因素持续对坝体结构产生侵蚀作用。水体持续性浸泡会改变坝体材料的内部结构，重塑土体孔隙形态，降低结构材料的密实程度与结构强度。区域温度反复升降，会让坝

体材料产生周期性伸缩变形，拉扯结构内部结合面，滋生细微裂隙。空气风化、干湿循环交替侵蚀坝体表层，磨损外部防护结构，削减结构抗侵蚀能力。库区水位频繁升降会改变坝体受力边界，持续扰动结构受力状态，加速坝体材料老化与结构破损进程。

1.3 大坝结构病害的形成与演化规律

水库大坝各类结构病害均遵循循序渐进的发育模式，存在清晰的演化阶段。病害萌芽阶段集中于结构内部，以微观损伤和隐蔽孔隙缺陷为主，坝体外部不会呈现明显异常变化。外界环境持续侵蚀会推动微小损伤逐步拓展，零散的内部缺陷相互连通，转化为肉眼可见的结构性问题。损伤体量不断累加后，病害发育速度会出现提升，单一类型缺陷会衍生多种结构问题，打乱坝体完整结构形态。渗漏类病害扩散速度较快，裂缝、不均匀变形类病害会随时间缓慢累积，呈现长效发育的特点。

1.4 大坝病害萌发的内在基础条件

大坝自身结构条件与施工成型状态，是各类病害萌发的内在诱因。施工建设阶段物料配比不均匀、土层压实作业不到位、结构层间结合处理粗糙，都会留存原生结构缺陷。坝体建材的抗渗、抗冻、耐久性能，决定结构抵御外界侵蚀的基础能力。结构内部天然存在的孔隙、细微缝隙，为水体渗透、杂质侵蚀提供扩散通道。坝基土体承载性能分布不均，沉降形变存在差异，会让上部坝体承受额外应力作用，推动各类结构性损伤持续产生并不断扩张。

2 水库大坝常见病害类型及成因解析

2.1 坝体渗漏病害的诱发机制与产生缘由

坝体渗漏属于水库大坝高发的结构性病害,源于坝体内部形成贯通性渗水通道。坝体填筑材质存在孔隙缝隙,水体可透过材质内部空隙缓慢渗透扩散。施工阶段填筑密实度不足、层间处理不精细,会在坝体内部形成松散带,提升水体渗透的通行能力^[2]。长期蓄水运行过程中,水体持续冲刷内部孔隙,逐步扩大缝隙尺寸,形成稳定渗漏通道。防渗结构老化损伤、局部破损失效,会丧失水体阻隔能力,让水体直接渗入坝体内部结构,形成持续性渗漏问题。

2.2 坝体裂缝病害的形成机理与诱发条件

坝体裂缝的产生多源于结构应力分布不均与材料性能变化。温度波动会让坝体材料产生伸缩变形,形变受到结构约束便会产生拉应力,应力超出材料承受极限便会生成细微裂缝。坝体沉降不均匀会扭曲整体结构形态,局部区域产生集中应力,拉伸结构表层与内部材质形成裂缝。材料长期老化、碳化会弱化自身抗拉性能,结构抵御形变的能力持续下降。内外湿度差异、干湿交替作用,会加速表层材质劣化,促使裂缝逐步产生并持续延展。

2.3 坝体冲刷剥蚀病害的产生逻辑与影响因素

坝体冲刷剥蚀集中发生于迎水面与坝顶临水区域,由水体长期冲击磨蚀引发。库区水流流动过程中携带泥沙与细小硬质颗粒,持续撞击、摩擦坝体表层结构。表层防护材质长期受机械磨蚀,逐步出现表层脱落、材质剥离的现象。水流流速变化会改变冲击强度,流速偏大的水域区段,剥蚀发育程度更为明显。水位变动区域结构反复浸泡、风干,材质耐久性能持续衰减,表层抗冲刷能力持续下降,逐步形成凹凸不平的剥蚀创面。

2.4 坝基沉降变形病害的诱发诱因与形成机制

坝基沉降变形由基底土体结构变化与荷载长期作用引发。坝基土体自身存在压缩空间,大坝自重与蓄水荷载长期施压,会促使土体孔隙压缩收缩,引发基础沉降。基底土质分布不均匀,不同区域土体压缩属性存在区别,会造成差异化沉降现象。地下水动态运动会扰动坝基土体结构,带走细小土颗粒,弱化基底承载稳定性。土体固结程度不足、基底压实质量偏弱,会延长土体压缩变形周期,让沉降变形问题长期存在。

2.5 附属结构配套病害的衍生成因

大坝附属结构涵盖排水、护坡、防渗辅助构件,病害多由长期服役损耗引发。附属结构长期暴露在自然环境中,风化侵蚀会逐步破坏表层结构,降低结构完整性。排水构件淤积堵塞会改变排水效率,坝体内部积水

无法及时排出,加重结构受潮侵蚀程度。护坡结构受水流冲击、环境风化影响,会出现松动、缺损问题,弱化坝体外部防护能力。各类附属构件损伤会相互影响,逐步衍生为整体性的配套结构病害。

3 水库大坝病害常用防治技术体系与应用逻辑

3.1 渗漏封堵与防渗加固技术工艺体系

渗漏防治技术围绕水体渗透通道处置与防渗能力提升构建完整工艺体系。针对坝体浅层渗漏问题,依托表层封堵工艺处理表层孔隙与细微渗水缝隙,阻断表层水体渗透路径。针对坝体深层贯通性渗漏,采用压力注浆、深层固结工艺,将固化材料填入内部孔隙与渗漏通道,通过材料固化填充渗透空间,重塑坝体内部致密结构。防渗加固侧重完善坝体防渗构造,对老化破损的防渗层开展翻新修补,重新搭建连续完整的防渗屏障^[3]。各类工艺依托渗漏发育深度、通道形态区分施工方式,从表层封堵、深层固结到结构防渗漏补强,分层完善坝体防渗性能。

3.2 裂缝修补与结构补强技术实施体系

裂缝治理技术根据裂缝开度、发育深度、分布位置划分对应的处理工艺。细微浅表裂缝采用表层封闭处理方式,通过专用修补材料涂抹覆盖,封闭裂缝开口,阻隔外界水体与杂质侵入。中等开度裂缝采用开槽填充工艺,清理裂缝内部松散材质后填充高强修补物料,填补结构空缺位置。深层贯穿裂缝依托注浆补强工艺,将粘结材料注入裂缝内部,连通断裂结构,恢复坝体整体性。结构补强搭配裂缝治理同步开展,通过局部结构加固提升坝体抗拉与抗形变能力,抑制裂缝再次发育扩张。

3.3 表层防护与抗冲刷治理技术体系

表层防护技术用于处理坝体剥蚀、磨损、表层破损等病害问题。对已经出现剥蚀缺损的坝体表层,清理破损松散材质,采用高强护面材料重新摊铺修补,复原坝体表层平整结构。增设刚性防护面层或柔性防护结构,提升坝体表层硬度与耐磨属性,抵御水流泥沙的长期磨蚀作用。优化临水区域防护结构形式,适配水位涨落带来的干湿交替环境,延缓表层材质老化劣化速度。整套技术体系聚焦表层结构防护性能提升,弱化水流冲击与自然风化对坝体的侵蚀破坏。

3.4 坝基稳固与沉降调控技术应用体系

坝基治理技术以夯实基底结构、优化土体状态为核心方向。基底土体松散、固结不足的区域,采用压实加固工艺提升土体密实度,缩减内部孔隙空间,增强基底

承载能力。针对地下水扰动引发的基底不稳问题,布设排水泄压结构,疏导基底积水,降低水体对土体的浸泡扰动。对存在不均匀沉降的坝基区域,采用注浆固结工艺固化基底土体,约束土体压缩变形,降低沉降发育程度。通过基底结构改良与水环境治理,改善坝基受力条件,维持坝体基础结构稳定。

3.5 差异化病害的技术适配运用逻辑

不同类型大坝病害的发育特点与破坏形式存在区别,技术选用遵循病害特征匹配原则。渗漏病害聚焦通道封堵与防渗补强,根据渗漏深浅、范围大小选用对应封堵工艺。裂缝病害依据发育尺度与贯穿程度,匹配封闭、填充、注浆等不同修补方式。冲刷剥蚀病害侧重表层修复与防护升级,强化坝体临水区域抗侵蚀能力。沉降变形病害立足基底土体改良与水环境调控,从基础层面控制结构变形。依据病害类型、发育位置、损伤程度匹配治理技术,实现针对性病害治理。

4 水库大坝病害防治技术优化与运维提升路径

4.1 病害精准排查识别的技术优化方式

病害排查是大坝病害治理的前置关键环节,传统人工排查方式精度有限,容易遗漏结构隐性隐患。技术升级聚焦排查模式的精细化革新,改变粗放的排查作业形式。对大坝整体结构进行区域细化划分,覆盖坝体表层、内部结构、坝基及各类附属设施,实现全域无死角排查。引入精细化探测手段,精准捕捉结构微观损伤、细微裂隙以及深层隐蔽渗漏通道^[4]。统一各类病害的识别判定标准,规整整套排查作业流程,降低人工操作带来的识别偏差。结合不同运行工况积累病害发育特征,细化各类隐患的甄别要点,提升初期病害与隐蔽病害的识别能力,为后续病害治理工作筑牢前置基础。

4.2 病害综合治理的工艺优化策略

常规单一治理工艺仅能处理表层显性病害,难以满足大坝长期稳定运行的治理标准。工艺优化立足传统技术短板,对各类主流治理工艺开展细节升级与内容完善。针对性调整修补、加固工序的施工参数,适配大坝临水服役、干湿循环交替的特殊环境条件。梳理并优化病害处置全流程,细化基层处理、材料铺设、后期养护等各环节的作业规范,规避施工细节疏漏引发的治理缺陷。迭代升级病害修补用材,强化材料抗渗、抗冻及耐久老化性能,更好适配野外复杂的服役场景。根据病害深度、病害规模灵活调整施工细节,提升各类病害单次治理的施工质量。

4.3 多病害叠加场景的协同治理思路

水库大坝长期服役过程中,初始单一结构损伤会

持续衍生各类次生问题,形成多病害叠加的复杂损伤状态。各类病害相互作用、相互诱发,单一独立的治理手段无法彻底解决复合型结构损伤问题。协同治理打破单一病害处置思维,梳理不同病害的内在关联,精准定位损伤源头。优先治理诱发多重病害的基础性隐患,封堵内部渗漏通道、加固松散土体,从根源上阻断病害持续衍生的条件。匹配适配工艺处置裂缝、剥蚀、沉降等次生病害,分层分步完成结构修复与加固作业。合理统筹各类治理工艺与施工流程,实现复合型病害的系统化治理。

4.4 大坝长效防病运维体系的构建方式

稳固大坝结构状态需要依托常态化运维管控,从日常管护层面降低病害滋生概率^[5]。完善大坝日常巡查管护机制,明确常规巡查范围与巡检频次,持续掌握坝体结构的实时运行状态。聚焦渗漏破损、表层剥落、基础不均匀沉降等高频病害点位,针对性细化运维管控重点。结合季节环境变化与库区运行状态,动态调整管护侧重点,适配不同阶段的结构防护需求,通过常态化、精细化的运维管控模式,持续削弱外界环境与结构自身隐患对坝体的负面影响,从源头降低各类病害的发生与衍生概率。

结束语

水库大坝病害的防治并非孤立的技术操作,而是一项贯穿排查识别、工艺实施与长效运维的系统工程。渗漏封堵、裂缝修补、表层防护与坝基稳固等技术各有侧重,需依据病害类型、发育深度与损伤程度进行精准匹配。面对多病害叠加的复杂工况,应树立协同治理理念,从源头切断病害衍生链条,分层推进结构修复作业。常态化运维体系的建立能够将病害控制关口前移,通过持续跟踪结构状态、动态调整防护策略,延缓老化进程,维持坝体整体性能的长期稳定。

参考文献

- [1] 尹晓龙. 水利水电工程水库大坝病害分析及整治分析[J]. 电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(8):2335-2336.
- [2] 谢宏武. 水利水电工程水库大坝病害分析及整治对策[J]. 城市周刊,2025(14):139-141.
- [3] 吴峰,王泽宇. 基于驱动因子分析的水库病害系统预防策略[J]. 四川建材,2026,52(1):149-151.
- [4] 卓华顺,薛贤章,张晓波,等. 老旧水库大坝坝体及坝基灌浆加固施工技术分析[J]. 水上安全,2026(8):25-27.
- [5] 卢建华,徐轶,田金章. 水库大坝水下安全保障技术探讨[J]. 中国水利,2023(16):35-40.