

堤坝水工建筑物防渗帷幕渗漏机理与加固处理技术研究

潘 珏¹ 何安柱²

1. 江苏省太湖地区水利工程管理处 江苏 苏州 215128

2. 江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要: 堤坝防渗帷幕在长期运行中易因自身缺陷、接触面间隙及绕坝渗流等多重因素发生渗漏劣化。本文梳理了帷幕体与坝基岩土体的接触特征及渗漏通道的空间发育规律,从帷幕结构缺陷、界面渗透、绕坝深层透水及化学机械耦合侵蚀等维度剖析了渗漏演化机理,并提出了涵盖化学灌浆封堵、整体防渗提升、排渗减压及深部防渗墙补强的综合加固技术体系,为堤坝防渗体系的长期安全运行提供技术参照。

关键词: 堤坝水工建筑物; 防渗帷幕; 渗漏机理; 加固处理; 灌浆技术

引言: 堤坝水工建筑物防渗帷幕承担着阻隔坝基渗流的关键职能,结构完整性直接关联坝体运行安全。帷幕在地下水长期侵蚀与水力荷载持续作用下,内部缺陷逐步扩展,接触面与绕坝区域渗流问题日趋突出,传统单一封堵手段难以应对复杂渗漏工况。深入剖析帷幕渗漏的多源驱动机理,并将探测诊断与加固处理技术有机衔接,对于提升堤坝防渗体系的可靠性具有重要的工程实践价值。

1 堤坝水工建筑物防渗帷幕结构特征与渗漏条件

1.1 堤坝水工建筑物防渗帷幕体结构与布设形态

堤坝工程体系中的防渗帷幕体依托高压灌浆施工工艺成型,整体以连续固结的浆液固化层为主体结构。固化浆液填充坝基内部原生裂隙与松散空隙,形成整体性较强的防渗阻水结构。帷幕体整体呈现连续带状的空间形态,延展范围贴合堤坝坝轴线走向,竖向深度贯穿坝基浅层透水岩层,延伸至相对致密的隔水层内部^[1]。常规堤坝工程帷幕竖向布设深度普遍达到30m~80m,结构整体具备均匀的密实度指标,层体厚度根据坝基水文地质条件与工程防渗标准进行动态适配,能够对坝基渗流水体形成持续性阻隔作用。成型后的帷幕体结构整体性稳定,内部孔隙占比极低,可有效削弱水体透过坝基岩土介质的渗透作用,适配各类堤坝水工建筑物的基础防渗管控需求。

1.2 帷幕体与坝基岩土体的接触关系

帷幕体成型后可与周边坝基岩土体形成紧密的嵌合衔接状态,浆液固化过程中会充分贴合岩土体表层结构,渗透嵌入岩土细微裂隙内部。两种介质的接触面不存在明显空隙与分离区域,整体衔接界面平整且贴合度均匀。固化后的帷幕结构与原生坝基岩土体形成一体化受力与防渗整体,岩土体可对帷幕体形成稳定支撑约

束,限制结构出现形变偏移。帷幕体可填补坝基岩土体结构存在的透水缺陷,依托界面紧密结合的特性消除岩土体与人工结构衔接位置的渗流薄弱区域,提升坝基整体防渗体系的完整性。

1.3 坝基地层渗透特性与地下水赋存状态

坝基地层由多层物性参数存在差异的岩土介质堆叠构成,不同层位岩石的颗粒级配与裂隙发育程度存在区别,渗透性能表现出明显的分层差异。浅层岩土结构松散,裂隙发育程度更高,水体渗透能力更强。深层岩土结构致密,孔隙与裂隙发育规模较小,渗透系数维持在较低水平。地下水主要储存于地层孔隙与裂隙空间内部,赋存状态随地层结构变化产生对应改变。浅层地下水具备较强的流动性,水体补给与运移更为活跃。深层地下水流动状态相对平缓,水体存量稳定,地层渗透性能的分层特征直接决定地下水的空间分布与运移规律。

1.4 渗漏通道的空间分布与路径特征

坝基渗漏通道多依托地层原生裂隙、岩土松散带以及结构衔接缝隙形成,空间分布状态贴合地层构造发育规律。通道整体呈现无序分布的特点,浅层区域通道数量更多、延展范围更广,深层区域通道发育密度显著降低。水体沿渗漏通道的运移路径具备曲折性与连通性,多以分散式渗透的形式贯穿透水地层。各类渗漏通道相互交织串联,形成贯通性的水体运移网络,成为坝基渗流问题产生的核心诱因。通道的空间发育规模与连通程度,直接决定坝基渗流的强弱水平,也影响防渗帷幕结构的实际阻水效能。

2 堤坝水工建筑物防渗帷幕渗漏机理分析

2.1 帷幕体自身缺陷引发的渗漏机理

防渗帷幕施工成型阶段容易产生细微孔隙与微裂隙等原生结构缺陷,灌浆作业不均匀或浆液固结程度不足

都会造成这类结构问题。浆液固化过程中出现的收缩形变会在帷幕体内部形成细微贯通缝隙,水体可沿这类薄弱结构缓慢渗透流通^[2]。帷幕体长期处于坝基水环境中,固化材料的密实度会随运行时长逐步衰减,内部微观缝隙会持续发育扩张。水体持续透过结构缺陷位置形成稳定渗流路径,逐步扩大帷幕体内部透水空间,持续弱化帷幕整体的隔水能力,引发持续性的坝基渗漏现象。

2.2 帷幕与坝基接触面渗漏机理

帷幕结构与坝基岩土体的结合界面属于防渗体系的薄弱区域,灌浆施工无法完全填充界面处的细微缝隙。岩土体表层粗糙结构会让浆液贴合存在局部缺失,界面位置留存大量微小透水通道。坝体蓄水运行后,水环境压力会持续作用于结合界面,逐步扩宽界面缝隙的发育规模。水体沿着帷幕与岩土体的结合缝隙持续渗入坝基深层,界面位置的渗流作用会不断冲刷贴合区域,弱化结构嵌合效果,让界面透水能力持续提升,形成长期稳定的接触面渗漏问题。

2.3 绕坝渗流与深层透水渗漏机理

堤坝两岸岩土体与帷幕端头衔接位置存在天然透水区域,这类区域未被防渗结构完全覆盖,成为绕坝渗流的主要发育位置。岸坡岩土体裂隙发育程度较高,水体可沿岸坡岩土结构持续绕开帷幕主体结构渗透流动。坝基深层存在未被封堵的透水岩层与构造裂隙,深层岩体透水结构具备良好的连通性。水体能够依托深层透水结构完成纵向与横向运移,穿透坝基隔水层薄弱位置形成深层渗漏。这类渗漏模式隐蔽性较强,会持续改变坝基内部渗流场分布状态。

2.4 水力梯度变化驱动下的渗漏演化机制

坝体上下游水位差会形成固定的水力梯度条件,水位动态波动会持续改变水力梯度的数值大小与作用强度。水力梯度处于较高数值时,水体具备更强的渗透驱动力,可快速冲刷帷幕内部及坝基各类透水通道。渗透水流会持续带走结构内部细小松散介质,让原有透水缝隙不断拓宽延伸。水力梯度的动态波动会加速渗漏通道的发育与贯通,让坝基渗流状态逐步从微弱渗透转变为集中渗流,持续推动渗漏问题持续恶化发展。

2.5 化学溶蚀与机械潜蚀对帷幕完整性的破坏机理

坝基水体中含有的各类离子成分会与帷幕固化材料产生缓慢化学反应,持续溶蚀帷幕结构内部胶结物质。长期化学作用会破坏帷幕材料的结构整体性,降低结构密实程度,催生大量新生微观裂隙。渗透水流产生的机械冲刷作用会形成机械潜蚀效应,持续剥离帷幕结构内部松散颗粒。两种作用方式相互叠加,持续破坏帷幕结

构的完整状态,大幅提升帷幕体透水性能,彻底削弱防渗结构对坝基水体的阻隔作用。

3 堤坝水工建筑物防渗帷幕渗漏探测与诊断技术

3.1 渗漏水化学特征分析与示踪技术

水体在坝基岩土介质与防渗结构内部运移过程中会持续改变自身理化属性,水质参数的差异化变化可作为渗漏识别的核心依据。技术手段通过精准检测水体离子组分、矿化度以及水温等多项指标,对比不同水域水体的基础特征参数,区分坝基渗水与常规水体的属性差异。天然示踪物质依托水体运移规律贯穿坝基透水结构,技术作业依托监测点位捕捉物质扩散规律,梳理水体的实际运移路径^[3]。这类技术依托水体自身演化特征实现渗漏溯源,可适配复杂坝基环境下的渗漏隐患筛查工作,为渗漏问题研判提供精准的数据支撑。

3.2 坝体内部渗流场分布探测技术

渗流场的空间分布状态能够直观反映坝基内部透水结构的发育情况,相关探测技术依托专业监测设备布设全域监测点位,持续采集坝体与坝基内部的渗压数据。设备捕捉不同深度、不同区域的渗压数值变化,通过数据整合梳理坝体内部渗流的分布规律与发育范围。监测作业可捕捉渗流异常区域的数值波动,精准锁定渗流紊乱的核心区域。技术应用能够清晰刻画坝体内部渗流的整体分布格局,精准识别渗流异常发育区域,为后续防渗治理提供精准的空间数据支撑。

3.3 帷幕体完整性无损检测技术

无损检测技术依托物理探测原理开展帷幕结构检测作业,无需对坝体与帷幕结构造成破损扰动。各类物理探测信号在均质帷幕结构内部传播状态稳定,遇到裂隙、空洞以及密实度缺失等缺陷区域会出现传播速率与波形的改变。探测设备捕捉信号传播的差异化特征,依托信号变化规律判别帷幕体内部结构的完整状态。技术应用可精准筛查帷幕体内部隐蔽性结构缺陷,定位结构薄弱区域的具体位置与发育规模,适配堤坝长期运移过程中的结构状态检测需求。

3.4 渗漏通道空间定位与延伸方向判定方法

渗漏通道的发育形态与空间延展特征是渗漏治理的关键参考依据,相关判定方法整合渗流监测数据与物理探测成果,梳理坝基透水结构的发育规律。结合不同监测点位的渗流数据差异,反向推演透水通道的埋藏深度与空间分布范围。依托水体运移的梯度变化与信号反馈特征,精准判别通道的延展趋势与连通范围。整套判定体系可精准刻画渗漏通道的三维空间形态,明确通道贯通规模与核心发育区域,实现渗漏隐患的精准定位

与精细化研判。

4 堤坝水工建筑物防渗帷幕加固处理技术体系

4.1 帷幕体缺陷段化学灌浆封堵技术

化学灌浆封堵技术针对帷幕体内部裂隙、空洞及疏松缺陷区域开展专项修复作业。适配性较强的化学浆液具备良好的流动性与渗透能力,可渗入帷幕体微观孔隙与贯通裂隙内部。浆液固化后可填充各类透水缺陷,重塑帷幕体内部密实结构,阻断缺陷位置形成的渗流路径。施工过程依托精准探测成果锁定病害集中区域,定向开展灌浆作业,针对性修复局部结构破损问题^[4]。固化后的浆液结构可与原有帷幕材料充分结合,提升缺陷区段的隔水能力与结构稳定性,实现局部渗漏病害的精准治理。

4.2 帷幕体整体防渗性能提升灌浆技术

整体防渗提升灌浆技术面向完整性偏弱的整体帷幕结构开展规模化加固处理。灌浆孔按照规范排布方式均匀布设于坝顶作业区域,浆液可均匀渗透至帷幕整体结构及周边浅层岩土体。浆液固结后可填补帷幕成型阶段留存的细微透水空隙,优化整体结构密实度与均匀程度。这类技术能够改善帷幕整体防渗性能不均的问题,缩减结构内部透水空间,弱化坝基渗流发育条件。持续的灌浆加固作业可稳定帷幕长期运行状态,提升结构抵御水环境渗透侵蚀的基础能力。

4.3 帷幕下游排渗减压与导渗处理技术

排渗减压与导渗处理技术通过主动疏导坝基地下水,降低防渗帷幕承担的渗透压力。合理布设的导渗排水结构可收集坝基内部渗流水体,引导水体有序排出坝基体系内部。布设的排水孔径普遍设置为100~150mm,可高效疏导富集地下水,渗流水体堆积带来的渗透荷载会持续下降,大幅减少高压水体对帷幕结构的冲刷与侵入作用。疏导后的渗流状态更为平稳,能够规避高水压引发的裂隙扩张与结构破损问题。这类技术从渗流荷载层面保护帷幕结构,和灌浆封堵技术形成互补,完善坝基防渗管控体系。

4.4 坝基深部防渗墙补强与新帷幕搭接技术

坝基深部透水岩层会造成深层渗流持续发育,深部防渗墙施工可对深层透水层形成有效阻隔。墙体结构嵌入深层稳定隔水地层,成墙厚度控制在0.8~1.2m,封堵

坝基深部纵向与横向的透水通道。新筑防渗帷幕与原有帷幕结构采用科学搭接工艺处理衔接区域,搭接重叠长度不小于3.0m,消除结构交接位置的透水薄弱带。搭接施工可保障新旧防渗结构的整体性与连续性,打通深层防渗屏障的完整体系,解决深部坝基隐蔽渗漏带来的运行隐患。

4.5 多工艺联合加固的施工衔接与质量控制

多工艺联合加固模式整合灌浆封堵、排渗减压、深部结构补强等多项施工工艺,适配复杂坝基的防渗加固需求。各类施工工序按照地层条件与结构加固需求有序排布,把控工序交叉位置的施工衔接精度,避免不同工艺施工产生结构衔接缺陷。质量控制工作贯穿整体施工流程,实时监测浆液灌注量、施工深度以及结构固结状态等关键参数^[5]。动态化参数调控可适配不同地层的加固需求,动态调整施工工艺参数可保障各类加固措施的实施效果,维持防渗帷幕结构的整体性与防渗稳定性,满足堤坝长期安全运行的工程标准。

结束语

防渗帷幕渗漏成因涉及结构缺陷、接触面薄弱、绕坝深层透水及化学机械耦合侵蚀等多重因素,单一治理手段难以全面覆盖。通过渗流场探测与无损检测实现渗漏通道的精准定位,结合化学灌浆封堵、整体性能提升、排渗减压及深部防渗墙补强等多工艺协同施策,能够有效恢复帷幕防渗功能。施工过程中严格把控工序衔接与关键参数,可保障加固措施的实施质量,维持堤坝防渗体系的长期稳定运行。

参考文献

- [1]刘青.永丰水库堤坝防渗土工膜水力性能试验[J].黑龙江水利科技,2024,52(4):105-108.
- [2]周炜星.水利建筑工程中防渗墙施工技术的应用研究[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(4):228-230.
- [3]尹必春.水利工程施工中堤坝防渗加固技术探析[J].建筑与施工,2023,2(19):100-101.
- [4]刘星炜.浅谈堤坝工程防渗加固施工技术[J].房地产导刊,2022(16):30-32.
- [5]王乾坤.水工建筑物防渗堵漏施工技术[J].建筑工程技术与设计,2024,12(7):40-42.