

堤坝水工建筑物防渗帷幕渗漏机理与加固处理技术研究

周东坡 王金伟

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要: 防渗帷幕是堤坝水工建筑物地基防渗的核心结构,其长期服役过程中易受地质环境、结构形变等多重因素影响产生渗漏病害。本文结合帷幕结构构造、渗流作用特征,系统剖析岩体裂隙发育、注浆体老化、水文及应力环境变化等不同维度的帷幕渗漏失效机理,针对性梳理各类专项防渗加固技术的应用逻辑。同时结合地层工况与施工条件,探究加固技术的适配规律,优化施工工艺参数与材料适配体系,完善复杂工况下的工艺改良方式,可为堤坝防渗帷幕病害治理提供理论支撑。

关键词: 堤坝; 防渗帷幕; 渗漏机理; 加固技术; 工艺优化

引言: 堤坝防渗体系的稳定运行,是水工建筑物长期安全服役的核心前提。防渗帷幕作为体系中阻断深部渗流的关键结构,运行状态直接决定整个坝基的渗控水平。在长期复杂的水文地质与结构荷载作用下,帷幕内部的微小缺陷会逐步发展,最终诱发不同程度的渗漏问题,削弱整体阻水能力。从底层作用机制出发厘清渗漏发生的完整脉络,梳理适配性强的加固处置路径,形成覆盖全流程的工艺优化方向,可为现场防渗运维工作提供扎实的理论支撑。

1 堤坝防渗帷幕基础结构与渗流作用机制

1.1 防渗帷幕基本结构组成与构造形式

防渗帷幕以连续阻水功能层为核心,沿堤坝地基与岸坡定向布设,通过差异化构造形式适配不同场地的防渗需求,形成完整的止水体系^[1]。其中,垂直帷幕纵深切入透水地层,部分可嵌入深部隔水层,彻底阻断地下水竖向渗流通道,构建全深度封闭阻水屏障;水平帷幕则沿坝基、库底表层延展布置,有效延长水平渗流路径,降低渗流速率。整体帷幕各构造单元衔接密实、无防渗空白区,可全覆盖堤坝控渗范围。针对地层起伏、地形特殊的局部区域,可通过微调帷幕布设角度,精准贴合地层形态,确保防渗边界完整闭合,保障整体阻水效果。

1.2 防渗帷幕服役环境水文地质作用特征

防渗帷幕长期处于复杂动态的水文地质环境中,多重要素持续影响其服役状态。稳定的上下游水头差会在帷幕迎水侧形成恒定渗流驱动力,推动水体向背水侧渗透;库区水位周期性涨落,持续改变帷幕表面荷载,形

成往复受力工况。同时,地下水携带着地层细微颗粒沿帷幕周边空隙运移,易引发空隙冲刷拓展。此外,环境温度波动会改变岩土介质孔隙结构,地层应力动态调整持续挤压帷幕结构,地下水化学成分则会缓慢侵蚀帷幕表层材料、改变其物理性能。多重水文地质因素共同作用,持续改变帷幕服役的边界条件,长期影响结构防渗稳定性。

1.3 帷幕岩体与注浆体介质渗流基本特性

天然岩体内部存在大量无规律原生裂隙,是地下水渗流的主要天然通道,裂隙的宽度、走向与连通性直接决定区域渗流强度。通过注浆工艺填充岩体裂隙后,原有贯通渗流通道被封堵,岩体整体防渗性能大幅提升。介质的孔隙尺寸、连通程度是控制渗流特性的核心指标,岩体与注浆体的复合介质结构可对水流形成有效阻滞作用。长期渗流过程中,水流与孔隙壁面持续摩擦、冲刷,会缓慢重塑介质孔隙形态,导致部分细小孔隙贯通衍生新的微导水通道,造成防渗性能随服役时间逐步衰减。

1.4 堤坝整体结构与防渗帷幕协同受力机制

防渗帷幕与堤坝主体、周边地层形成协同受力体系,结构间应力、形变联动特征显著。坝体上部荷载会传导至帷幕地层区域,由帷幕与地层共同分担承载。坝体混凝土收缩、地层形变会带动帷幕产生位移与形变,改变周边应力分布。同时,帷幕阻水形成的水头差会使其内部产生定向渗透压力。在服役过程中,坝体与帷幕形变相互适配、应力相互传递,共同维持防渗体系整体受力平衡。局部应力集中区域会率先发生形变调整,带动周边结构完成应力重分布,保障堤坝防渗体系长期稳

定服役。

2 堤坝防渗帷幕渗漏失效机理研究

2.1 防渗帷幕本体结构性渗漏成因机制

帷幕本体内部的原生缺陷会成为渗漏的起始点。施工阶段留下的局部空隙会在后续运行中逐步扩展。不同注浆段的衔接位置容易出现连续性不足的问题。阻水结构的局部厚度未达到设计要求,会削弱整体阻水能力。水流会优先从这些薄弱位置穿过,逐步扩大原有缺陷的影响范围。结构内部的不连续面会为渗流提供天然的通行路径^[2]。这类渗漏从帷幕本体内部发起,逐步向外延伸形成稳定的渗漏通道。

2.2 帷幕岩体裂隙发育引发的渗流通道形成机理

岩体内部原有闭合裂隙会在外部因素作用下逐步张开。裂隙的延展方向会顺着渗流的主导方向发展。多条互不连通的细小裂隙会逐步串联起来。原本被注浆材料填充的裂隙,会在长期作用下出现填充体与岩体分离的情况。裂隙的宽度会随渗流的持续作用缓慢增大。贯通后的裂隙网络会形成完整的导水路径,绕过原本连续的阻水段。岩体裂隙的持续发育会不断突破帷幕的原有阻水边界。

2.3 注浆体老化、开裂产生的渗漏失效机理

注浆材料在长期水工环境作用下会出现性能衰减。材料内部的胶结成分会逐步发生缓慢分解。注浆体表层会出现细碎的剥落现象。内部应力变化会让注浆体内部产生细微裂纹。裂纹会从表层向注浆体深处逐步延伸扩展。原本致密的注浆体内部会出现新的空隙。水流顺着新生成的裂纹不断侵入,进一步加速注浆体的破损进程。最终在注浆体内部形成贯穿性的渗漏通道。

2.4 水文环境动态变化诱发的帷幕渗漏演化机理

库水位的反复升降会不断改变帷幕两侧的水头差。渗流的作用力会随水位变化出现周期性波动。水位快速上升时,突然增大的渗透力会冲击帷幕内部的薄弱位置。水位下降过程中,内部留存的水体向外排出,会带动内部细微颗粒移动。反复的荷载变化会不断损耗帷幕结构的完整度。原本处于稳定状态的微小缺陷会被逐步激活。渗漏的发展速度会随水文波动的频次不断加快。

2.5 结构应力变形导致的防渗帷幕破损渗漏机理

坝体结构的形变会向帷幕所在区域传递。不均匀的地层沉降会拉扯帷幕结构产生变形。局部应力超过结构承受上限时,会直接形成贯通裂缝。应力的持续作用会让裂缝的宽度不断增大。原本连续的阻水结构会被裂缝切割成多个独立区块。裂缝内部没有阻水材料填充,直

接成为高速导水的通道。应力变形引发的破损会快速改变帷幕局部的渗流状态。

3 堤坝防渗帷幕专项加固处理关键技术

3.1 帷幕深层注浆加固技术体系

深层注浆作业沿预设钻孔向帷幕深部布设。注浆材料通过专用管路输送到目标加固层位。注浆压力按深度梯度逐步调整,适配不同地层的约束条件。浆液沿帷幕内部的微小空隙缓慢扩散,填充所有未被完全密实的区域。钻孔的布设轨迹避开原有完整的阻水段,直接对准内部缺陷集中的区域。注浆过程按分段推进的方式完成,每一段的作业范围精准覆盖预设加固区间。浆液凝固后和原有结构结合,形成连续的致密阻水层^[3]。

3.2 裂隙充填防渗封堵技术

针对不同开度的裂隙选择适配的充填材料。细小裂隙采用流动性较强的浆体,顺着裂隙的走向渗入深部。开度较大的裂隙先填入颗粒级配合理的填充介质,再注入胶凝材料固结。充填作业从裂隙的出露位置向内部逐步推进,避免内部残留封闭空腔。材料完全填满裂隙的所有延展空间,阻断裂隙内部的导水路径。充填完成后裂隙内部形成高强度的阻水实体,不会被后续的渗流冲刷破坏。裂隙周边的松散区域也同步得到密实处理,消除周边衍生的渗漏隐患。

3.3 破损帷幕表层修复与防渗补强技术

先清理帷幕表层所有松散脱落的破损部分,露出内部完整的结构基面。在基面上涂刷适配的防渗涂层,封闭表层所有细微的开孔与裂纹。分层铺设补强材料,逐层提升表层结构的抗渗能力。补强层的厚度按表层渗漏的严重程度调整,完全覆盖所有表层破损区域。修复后的表层结构和原有帷幕本体紧密结合,形成连续的防护面层。面层能阻隔外部水体直接接触破损基面,避免表层缺陷继续向内部延伸发展。

3.4 复合防渗帷幕重构加固技术

在原有帷幕的指定侧布设新的加固孔位,构建全新的阻水结构。新结构和原有帷幕保持合理的间距,形成双层阻水的复合布局。新帷幕的深度完全覆盖原有帷幕未达标的透水层位,补齐原有结构的防渗短板。两层帷幕之间的空隙区域同步做密实处理,消除两层结构之间的绕渗路径。重构过程不会破坏原有仍保持完整的帷幕段,保留原有结构的有效阻水作用。复合结构的整体阻水能力远高于单一帷幕,大幅提升防渗体系的冗余度。

3.5 深部渗流通道靶向封堵技术

精准定位深部隐蔽渗流通道的空间位置,沿通道走

向布设靶向钻孔。封堵材料直接输送到渗流通道的内部区域,从通道中段开始向两端逐步填充。优先在通道内部形成阻水塞,阻断水流的连续通行路径。后续注入的材料顺着已形成的阻水塞向通道的上下游延展,填满整个通道空间。封堵作业避开周边完整的岩体区域,不会对原有正常结构造成额外扰动。封堵完成后深部通道完全被致密材料填充,可彻底切断隐蔽渗流的通行路径。

4 防渗帷幕加固技术适配性与工艺优化

4.1 不同地质条件下加固技术的适配原理

透水层厚度较大的区域,优先选用深层注浆类技术。这类技术能顺着地层的透水特性,把加固材料送到深部需要处置的区域。裂隙发育密集的岩体区段,采用小流量慢速率的注浆方式。让浆液顺着细小裂隙自然扩散,不会出现浆液大量窜流的问题。松软破碎的地层区域,先做预加固处理再开展后续作业。避免钻孔过程中出现塌孔,保证作业通道能顺利抵达目标层位。透水性极弱的完整岩体区段,简化不必要的冗余工序。直接对准局部缺陷位置布设孔位,减少无效作业的工作量。岩溶发育的特殊地层,选用大粒径的充填材料先填充大尺度空间。再注入细颗粒浆体封堵剩余的细小空隙^[4]。不同地质条件对应不同的技术选择逻辑,让每一项加固作业都能精准作用到渗漏发生的核心区域。

4.2 防渗加固施工工艺核心参数优化

注浆压力的调整完全匹配地层的埋深与岩体强度。浅部区域采用较低的压力,避免压力过大抬动周边地层。深部区域逐步提升压力,保证浆液能扩散到足够远的范围。注浆流量按渗漏通道的大小动态调整。细小裂隙区域控制低流量,防止浆液快速堆积堵塞进浆通道。大尺度渗漏通道适当提升流量,让大量材料快速填充内部空间。钻孔的布设间距根据浆液的有效扩散半径确定。相邻两个钻孔的扩散范围形成有效搭接,不会留下未被覆盖的空白带。注浆段的长度按地层的完整程度划分。破碎地层采用短段作业,保证每一段的注浆质量都能达到要求。完整岩体区域适当加长段长,提升整体作业的推进效率。所有工艺参数都围绕现场实际条件动态调整,不套用固定不变的预设数值。

4.3 加固材料与帷幕本体的适配结合机理

加固材料的凝结时间适配现场的作业节奏。远距离输送的工况选用较长的凝结时间,保证材料抵达目标位置前不会提前凝固。快速封堵的工况选用短凝结时间的材料,进入通道后快速形成阻水结构。材料的膨胀性能适配不同的空隙形态。有收缩趋势的材料添加适量膨胀组分,凝固后完全填满所有空隙,不会留下新的细小缝

隙。材料的强度指标和原有帷幕本体的强度相互匹配。不会出现加固部分强度过高,和原有结构形变不协调的问题。材料的流变性能适配渗流通道的形态。细小裂隙选用流动性好的浆体,能顺着裂隙延伸到最远端的位置。大通道选用抗冲蚀性能强的材料,不会被高速流动的水体冲散带走。材料和原有结构的接触面形成紧密结合,不会在界面位置出现新的渗水缝隙。

4.4 复杂工况下防渗帷幕加固工艺改良路径

高水头作用下的加固作业,提前在迎水侧设置临时导水设施。降低作业区域的瞬时渗透冲击力,保证注浆材料能在目标位置顺利留存。深部隐蔽渗漏的工况,采用分段递进的作业方式。从浅部到深部逐步推进,每完成一段作业就检查对应区域的渗流状态。再开展下一段的施工作业。周边存在敏感结构的工况,采用低扰动的钻进工艺。减少作业过程中产生的震动,不会对周边完好的坝体结构造成额外损伤。水位变动频繁的区域,调整材料的抗疲劳性能。适配水位反复变化带来的荷载波动,延长加固后结构的稳定运行时长。工艺改良均立足施工现场各类复杂难题精准施策,针对不同特殊工况的作业需求优化施工方案,有效弥补了常规防渗加固工艺在复杂工况中的适配性不足、施工效果受限等短板,大幅提升复杂场地防渗帷幕加固的施工质量与稳定性^[5]。

结束语

从最开始拆解帷幕的基础结构和渗流规律,到一步步挖透不同场景下渗漏发生的底层逻辑,再落到具体的加固技术和工艺优化方向,整套内容没有停留在表层的泛泛讨论。所有梳理都对准防渗帷幕运行里最容易出问题的核心环节,把机理研究的结论直接转化成可参照的加固处置思路。后续现场碰到不同类型的帷幕渗漏问题,都能顺着这套逻辑找到对应的处置方向,给实际工程运维提供扎实的支撑。

参考文献

- [1] 欧阳照.帷幕灌浆在水工建筑物防渗工程中的应用研究[J].装饰装修天地,2022(22):148-150.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] 王洁霞.水工建筑物防渗堵漏施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2023(16):142-144.