

水利工程混凝土衬砌渠道防渗漏技术探讨

王海伟

山东大禹水务建设集团有限公司 山东济南 250109

DOI:10.12238/ems.v7i12.16387

[摘要] 混凝土衬砌渠道是水利工程输水系统的核心组成, 渗漏问题直接影响水资源利用效率与工程运行寿命。本文分析渠道渗漏的主要成因, 涵盖设计缺陷、材料性能不足、施工管控疏漏及运行环境侵蚀, 从材料优化、结构改进、施工革新、运维强化四个维度, 系统探讨防渗漏技术的应用要点, 为提升渠道防渗性能、保障水利工程长期效益提供技术支撑。

[关键词] 水利工程; 混凝土衬砌渠道; 防渗漏技术

引言

在我国水资源分布不均与供需矛盾突出的背景下, 水利工程作为水资源调配的关键载体, 其运行效率关乎农业灌溉、工业用水及民生供水的稳定性。混凝土衬砌渠道因具备强度高、耐久性强、便于维护等优势, 被广泛应用于大中型灌区、输水干渠等工程中。然而, 受设计、施工、材料及运行环境等多重因素影响, 混凝土衬砌结构易出现裂缝、剥蚀、接缝渗漏等问题, 不仅造成水资源浪费, 还会引发渠道周边土壤盐碱化、岸坡失稳等次生灾害, 缩短工程使用寿命, 增加运维成本。随着水利工程向“节水、高效、生态”方向发展, 混凝土衬砌渠道防渗漏技术已成为工程建设与改造的核心课题。近年来, 行业内围绕材料改性、结构优化、施工标准化及运维升级开展大量研究与实践, 形成了多元化的防渗漏技术体系。本文通过剖析渗漏成因, 梳理现有技术的应用逻辑与实施要点, 明确不同技术的适配场景, 为渠道防渗设计、施工及运维提供全面且具操作性的指引, 助力水资源高效利用与水利工程可持续发展。

1 水利工程混凝土衬砌渠道渗漏成因分析

混凝土衬砌渠道的渗漏是多环节问题累积的结果, 明确成因是制定针对性防渗漏措施的前提, 主要可归纳为以下四类:

1.1 设计环节缺陷

设计方案的合理性直接决定渠道衬砌结构的防渗基础, 常见缺陷包括: 一是断面设计未结合地质与水文特征优化, 导致衬砌结构受力不均, 或水流冲刷加剧; 二是防渗结构设计缺失, 未设置必要的防渗层, 或接缝构造不合理, 温度变化或地基沉降时易引发接缝开裂; 三是荷载计算偏差, 未充分考虑运行期各类荷载作用, 导致衬砌厚度或配筋不足, 结构因承载超限出现裂缝。

1.2 材料性能不达标

混凝土及配套防渗材料的性能是抵御渗漏的核心屏障, 材料问题引发的渗漏占比显著: 一是混凝土本身质量缺陷, 配合比不合理导致密实度低、抗渗性能不足, 或砂石骨料、水泥、外加剂等原材料质量不合格, 进一步降低混凝土抗渗性与耐久性; 二是防渗辅助材料劣质, 止水带、土工膜等存在老化、开裂、尺寸偏差等问题, 修补防渗材料的粘结强度与抗渗性能未达标; 三是材料兼容性差, 不同材料间物理力学性能不匹配, 环境变化时易出现剥离、空鼓, 形成渗漏通道。

1.3 施工质量把控不严

施工过程是将设计方案转化为实体结构的关键环节, 操作不规范或质量管控缺失是引发渗漏的直接原因: 一是地基处理不到位, 未按要求压实或未清理隐患, 导致地基不均匀沉降, 衬砌结构受拉开裂; 二是混凝土施工缺陷, 浇筑时振捣不密实形成蜂窝、麻面, 或养护不及时、时间不足引发干缩裂缝; 三是接缝施工不规范, 伸缩缝、沉降缝清理不彻底, 止水带安装偏移、填缝材料填充不饱满; 四是施工工序混乱, 未按标准顺序作业, 或衬砌未达强度即进入下道工序, 导致结构损伤。

1.4 运行环境与老化侵蚀

渠道投入运行后, 长期受自然环境与输水条件双重作用, 结构逐渐老化并产生渗漏: 一是冻融循环破坏, 冬季积水结冰产生冻胀力, 解冻后结构收缩形成裂缝, 反复循环导致裂缝扩大; 二是水流冲刷与侵蚀, 水流携带泥沙冲刷衬砌表面, 或水体含腐蚀性物质破坏混凝土微观结构, 降低抗渗性; 三是生物与物理作用, 植物根系撑开裂缝, 或外部荷载影响导致结构位移、断裂; 四是运维管理缺失, 未定期巡查维护, 初期渗漏隐患未及时处理, 长期累积导致问题加剧。

2 混凝土衬砌渠道防渗漏技术应用与实践

针对上述渗漏成因, 行业内已形成“材料防渗+结构防渗

+施工防渗+运维防渗”的综合技术体系,不同技术适用于不同场景,需结合工程实际选择并优化应用:

2.1 材料优化型防渗漏技术

2.1.1 抗渗混凝土技术

在混凝土配合比设计中引入改性材料,提升密实度与抗渗性。核心要点包括:一是掺合料优化,掺入粉煤灰、磨细矿渣粉等,利用其火山灰活性与微集料效应填充内部孔隙;二是外加剂选型,选用高效减水剂降低水灰比,同时掺入引气剂,在混凝土内部形成均匀封闭的微气泡,阻断渗水通道;三是质量控制,根据渠道水头高度确定抗渗等级,严格控制原材料质量与施工密实度。

2.1.2 水泥基渗透结晶型涂料技术

利用涂料中活性成分与混凝土基层水分、钙离子发生化学反应,生成不溶于水的针状结晶,堵塞孔隙与微小裂缝。应用要点包括:一是基层处理,确保混凝土表面平整洁净,对不同宽度裂缝采取对应预处理措施;二是涂刷工艺,按配比搅拌涂料,分多遍涂刷,控制每遍厚度与间隔时间;三是养护管理,涂刷完成后洒水养护,确保结晶充分生成。

2.1.3 聚合物改性混凝土/砂浆技术

通过在混凝土或砂浆中掺入聚合物乳液,改善其粘结强度、柔韧性与抗渗性。实践要点包括:一是配比控制,按比例掺入聚合物乳液,相应调整水灰比;二是施工要点,修补前对基层进行凿毛与湿润处理,采用抹压法确保砂浆与基层紧密结合;三是适配场景,尤其适用于受冻融、冲刷影响的渠道段。

2.2 结构改进型防渗漏技术

2.2.1 复合衬砌结构技术

采用“混凝土面板+防渗层+垫层”的复合结构,利用不同材料优势协同防渗。核心在于防渗层选型与铺设:一是混凝土+土工膜复合结构,土工膜铺设于混凝土面板与垫层之间,采用热熔焊接确保密封;二是混凝土+膨润土防水毯复合结构,利用防水毯遇水膨胀特性自行愈合微小裂缝;三是结构协同要求,垫层需起到找平与保护防渗层的作用,混凝土面板需设置合理伸缩缝。

2.2.2 接缝止水结构优化技术

针对接缝渗漏高发问题,通过改进止水构造设计提升防渗效果:一是止水带选型与安装,根据渠道变形量选择合适止水带,确保安装位置准确、固定牢固;二是多道止水构造,对高风险渠道采用“止水带+填缝材料+表面密封”的多道防护;三是伸缩缝间距优化,根据混凝土标号、衬砌厚度及环

境温度确定间距,减少接缝数量以降低渗漏风险。

2.2.3 边坡衬砌结构改进技术

通过结构改进增强边坡稳定性与防渗性:一是形式优化,采用“梯形边坡+弧形坡脚”避免应力集中,对长边坡设置横向齿墙增强结合力;二是配筋优化,在边坡衬砌中设置双向钢筋网,提升结构抗裂性;三是生态防渗结合,对边坡上部非核心区采用“混凝土预制块+植被”的生态衬砌,兼顾防渗与生态效益。

2.3 施工工艺革新型防渗漏技术

2.3.1 机械化衬砌施工技术

解决传统人工浇筑缺陷,提升施工质量与效率:一是滑模衬砌技术,适用于渠底、边坡连续浇筑,配备高频振捣器确保混凝土密实;二是预制装配式衬砌技术,工厂预制衬砌板并采用蒸汽养护提升性能,现场吊装拼接,板间缝隙用专用材料填充;三是施工质量管控,施工前对地基进行精准找平,施工中实时监测衬砌厚度与密实度。

2.3.2 防渗层焊接/铺设工艺优化

确保土工膜、防水毯等防渗层的施工质量:一是土工膜焊接工艺,采用专用设备焊接,焊接前清理膜面,焊接后进行密封性检测,不合格部位及时补焊;二是膨润土防水毯铺设工艺,从上游向下游推进铺设,确保毯面与地基贴合,搭接处妥善处理并及时覆盖保护;三是涂层类防渗材料施工工艺,采用高压无气喷涂机施工,确保涂层均匀,对边角、接缝等部位人工补刷。

2.3.3 裂缝预防与早期处理工艺

在施工阶段预防裂缝,并对早期微小裂缝及时处理:一是预防措施,混凝土浇筑后及时覆盖保湿,初凝后持续洒水养护,根据季节采取遮阳、保温等措施减少温度应力;二是早期处理,对不同宽度的早期裂缝,分别采用涂料封闭、低压注浆、聚合物砂浆填充等针对性措施。

2.4 运维管理型防渗漏技术

2.4.1 常态化巡查与监测体系

建立“人工+智能”的双重管控机制:一是人工巡查,定期对渠道进行全面检查,重点关注衬砌裂缝、接缝渗漏等问题,特殊时期加密巡查频次;二是智能监测,在高风险段布设监测设备,实时采集渗漏相关数据,超阈值自动报警;三是定期检测,每年枯水期对衬砌内部状况与渗漏情况进行系统检测,评估防渗性能。

2.4.2 分级修复与养护策略

根据渗漏隐患等级采取差异化处理措施:一是轻度渗漏,

采用涂料、密封胶等材料进行局部修补;二是中度渗漏,局部凿除破损衬砌,重新施工并增设防渗层;三是重度渗漏,分段停水后拆除失效衬砌,采用复合结构重建并处理地基病害;四是日常养护,定期清理渠道杂物,寒冷地区冬季排空积水,定期对防渗层进行养护。

3 新型防渗技术发展趋势

3.1 环保型防渗材料研发

在水利工程绿色低碳转型的核心导向下,防渗漏新型材料研发正从“功能达标”向“生态友好、全生命周期低碳”深度拓展,研究维度更趋多元且细节更具象:一是生物基聚合物改性材料研发,聚焦农业废弃物(如秸秆纤维、植物淀粉)或林业副产品的高值化利用,通过生物炼制技术提取天然高分子成分作为混凝土/砂浆改性剂——这类改性剂不仅替代传统化工乳液,减少生产环节碳排放,更能通过天然分子链的交联作用,同步提升材料的抗冻融性与界面粘结力,适配寒冷、湿润等复杂服役环境;二是自修复混凝土技术突破,从“被动修补”转向“主动响应”,核心路径包括两类:一类是掺入微生物孢子与营养载体,当裂缝产生导致水分渗入时,孢子被激活并代谢生成碳酸钙晶体,逐步填充裂缝孔隙;另一类是嵌入可降解高分子微胶囊,胶囊内包裹修复浆液,裂缝扩展时胶囊破裂,浆液在毛细作用下自动扩散至裂缝处固化,实现“裂缝出现即启动修复”,且修复成分与混凝土基体兼容性强,不影响整体结构性能;

3.2 智能化施工与监测技术

技术深度融合正驱动混凝土衬砌渠道的施工与监测体系向“无人化、精准化、高效化”迭代升级,具体实践呈现两大核心方向:一是无人化施工装备的场景化应用,针对渠道衬砌施工特点优化设备功能——无人驾驶衬砌滑模机搭载激光定位与AI视觉系统,可实时识别地基平整度、混凝土坍落度变化,自动调整行进速度与振捣频率,避免人工操作导致的衬砌厚度不均;智能土工膜焊接机器人集成红外测温与气压检测模块,焊接过程中动态校准温度与压力参数,焊后即时完成密封性检测,同步生成质量数据档案,实现“施工-检测-记录”一体化;二是分布式光纤监测技术的深度嵌入,将传感光纤与衬砌结构施工同步预埋——通过在混凝土浇筑时布设分布式应变-温度光纤,既能实时捕捉衬砌结构因温度变化、水压力作用产生的微小应变,提前预警裂缝萌生趋势,又可借助光纤的渗漏传感功能,精准定位渗漏水沿衬砌内部的渗透路径与集中区域,监测范围覆盖整个渠道段且数据精度不受环境干扰;

3.3 生态化防渗技术融合

在混凝土衬砌渠道防渗设计中,“功能与生态协同”成为核心方向,通过技术创新实现防渗效能与生态保护的平衡统一,具体呈现三大实践路径:一是透水衬砌结构的精细化设计,以多孔混凝土预制块为核心载体——预制块通过调控骨料级配形成合理孔隙结构,既通过孔隙的毛细阻滞作用控制渗流量,避免水资源浪费,又允许少量渗水缓慢渗入渠道周边土壤,维持岸坡及周边植被生长所需的湿度环境,破解传统不透水衬砌导致的土壤干化问题;二是植被-防渗协同技术的系统构建,突破“单一防渗”思维局限——在渠道边坡铺设防渗膜的基础上,结合植物种植形成复合防护体系:选用根系浅、固土能力强的草本或灌木植物,通过植被根系与土壤的咬合增强边坡稳定性,同时植物覆盖可减弱雨水冲刷、调节局部微气候,而防渗膜则阻断深层渗漏,实现“固坡-防渗-生态涵养”的多重效益;三是仿自然渠道的生态化设计,以还原天然河道生态功能为目标——衬砌表面模拟天然河床的纹理与起伏形态,减缓水流速度、降低冲刷力度,避免渠道内水流单一化导致的生态活力不足;同时在渠道两侧预留生态缓冲带,衬砌边缘设置仿自然浅滩与水生植物种植区,为水生生物提供栖息、繁衍空间,让人工渠道兼具防渗功能与天然河道的生态属性。

结束语

综上所述,混凝土衬砌渠道防渗是贯穿水利工程设计、施工、运维全周期的系统性课题,其核心在于以“源头控制、过程把控、全周期管理”为逻辑,将材料优化、结构改进、工艺革新与智能运维深度融合。从解决当下渗漏隐患到布局环保化、智能化、生态化的技术未来,每一项技术实践与创新,都是对水资源高效利用、工程长效运行需求的回应。唯有持续深化技术研究、严格落实管控措施,才能不断提升渠道防渗性能,为水利工程发挥“节水、惠民、护生态”的核心价值筑牢坚实基础。

[参考文献]

- [1] 李云鹏. 水利工程建设施工中混凝土衬砌渠道防渗漏技术的运用[J]. 工程建设与设计, 2023(20): 204-206.
- [2] 宗艳丽. 水利工程现浇混凝土衬砌渠道防渗漏技术分析[J]. 科技风, 2024, (8): 140.
- [3] 王利云. 水利工程混凝土衬砌渠道防渗漏施工技术探讨[J]. 低碳世界, 2023(5): 111-112.
- [4] 雷梨, 马凤霞. 浅谈水利工程现浇混凝土衬砌渠道防渗漏技术[J]. 科技风, 2022(17): 139.