

堤防工程防渗施工工艺及质量控制

杨 志

新疆塔建三五九建工有限责任公司, 新疆 阿拉尔 843300

[摘要]平原土质堤防是流域防洪减灾核心水工构筑物, 渗流破坏是堤防运行期最常见结构性病害, 极易诱发管涌、堤坡滑移、堤身溃塌等安全事故。为解决堤防防渗工艺选型盲目、工序管控碎片化、病害防控滞后等工程痛点, 本文以沿江平原土质堤防为研究对象, 划分堤身、堤基、接触面三类典型渗漏类型, 从自然环境、土体物性、施工建设、后期运维四维剖析渗漏形成机理。结合地质条件、防洪等级、造价工期约束条件, 确定防渗工艺选型准则, 对比分析复合土工膜、劈裂灌浆、帷幕灌浆、塑性混凝土防渗墙四类主流防渗工艺施工原理、适用工况与施工重难点, 构建事前勘察预控、事中工序管控、事后运维管护一体化全周期质量管控体系, 归纳防渗施工高频病害成因并制定专项防控方案。研究表明, 因地制宜匹配防渗工艺、严控接缝施工质量、落实闭环质控, 可有效提升堤体防渗稳定性, 研究可为同区域土质堤防除险加固、防渗施工提供工程参考。

[关键词]土质堤防; 渗流破坏; 防渗工艺; 施工质控

DOI: 10.64635/ja.2026.1384

中图分类号: TV871

文献标识码: A

Anti-Seepage Construction Technology and Quality Control for Levee Projects

Yang Zhi

Xinjiang Tajian 359 Construction Engineering Co., Ltd., Alar, Xinjiang 843300, China

Abstract: Plain earth levees are core hydraulic structures for flood control and disaster reduction in river basins. Seepage failure is the most common structural disease during levee operation, and can easily induce safety accidents such as piping, levee slope sliding, and levee body collapse. To address engineering problems such as blind selection of anti-seepage techniques, fragmented process control, and delayed disease prevention and control, this paper takes plain earth levees along rivers as the research object. It divides typical leakage problems into three categories: levee body leakage, levee foundation leakage, and contact-surface leakage, and analyzes the formation mechanism of leakage from four dimensions: natural environment, soil physical properties, construction, and later operation and maintenance. Based on geological conditions, flood control grade, cost, and construction-period constraints, selection criteria for anti-seepage techniques are determined. Four mainstream anti-seepage technologies, namely composite geomembrane, split grouting, curtain grouting, and plastic concrete cutoff walls, are comparatively analyzed in terms of construction principles, applicable conditions, and key construction difficulties. A full-cycle quality control system integrating pre-construction investigation and prevention, in-process procedure control, and post-construction operation and maintenance is constructed. The causes of frequent diseases in anti-seepage construction are summarized, and special prevention and control measures are formulated. The study shows that matching anti-seepage techniques according to local conditions, strictly controlling joint construction quality, and implementing closed-loop quality control can effectively improve the anti-seepage stability of levee bodies. The research may provide engineering reference for risk elimination, reinforcement, and anti-seepage construction of earth levees in similar regions.

Keywords: earth levee; seepage failure; anti-seepage technology; construction quality control

引言

河湖土质堤防是流域防洪减灾、水土涵养的基础性水利构筑物, 承担拦蓄河道径流、防护沿岸村镇及农田安全的核心功能。我国中东部平原河湖密布, 沿江沿河存量堤防建设年限跨度较大, 20 世纪水利基建工程受施工工艺、

建材标准、现场管控体系制约, 多数填筑堤防未配套系统化防渗结构, 堤体分层填筑压实度偏低, 土体原生防渗性能偏弱。近些年全球气候异动加剧, 区域短时强降雨、持续性梅雨天气频发, 河道汛期高水位浸泡周期大幅延长, 水位往复升降交替作用, 持续冲刷、软化堤体填筑土体,

加速土体内部孔隙贯通,渗流问题逐步发展为堤防运行期首要隐患。从水利运维数据来看,土质堤防渗漏引发的管涌、边坡失稳等险情,占汛期堤防故障总量六成以上,大幅增加防汛值守人力物力成本,也提升了堤防溃塌安全风险。

现阶段行业现有研究侧重点较为单一,国内学界多聚焦单一防渗工艺参数优化、材料改良,侧重工艺技术迭代,缺少结合原位地质、堤防等级、工程造价的适配性选型研究,施工现场普遍存在工艺盲目选用、细部施工粗放、质控分段脱节等实操问题,防渗施工适配性不足,加固完工后防渗长效性较差。海外防渗施工体系依托均质新建堤防研发,装配式防渗结构、专用防渗材料造价高昂,适配国内分层杂填土、老旧拼接堤防工况适配性较差,落地推广受限。基于当下堤防防渗施工选型混乱、质控体系不完善的工程现状,本文立足平原常规土质堤防工程,系统分类研判渗漏发育规律,解析渗流形成内在机理,对标现行水利国标比对四类主流防渗工艺适配边界,搭建适配中小型堤防的全流程标准化质量管控体系,为同类堤防防渗施工提质、规范现场管控提供理论与实操支撑。

1 堤防渗漏类型及病害机理分析

1.1 堤防渗漏分类及特征

依据渗水位置、渗流路径差异,土质堤防渗漏分为三大类,各类病害发育特征、风险等级存在明显区别。堤身渗漏多发于素土填筑老旧堤防,堤体分层填筑压实不均,土体内部孔隙连通形成渗水通道,汛期水位上升后坡面出现连片散浸、土体软化,长期发展会形成深层裂缝,弱化堤体整体稳定性。堤基渗漏属于高危渗漏病害,堤基砂卵石透水层厚度较大、天然隔水层缺失时,上下游水头差带动地下水淘蚀基底细颗粒土,逐步形成管状渗流通道,最终诱发管涌、流土破坏,直接威胁堤防整体安全。接触面渗漏属于隐蔽性渗漏,多出现在新老堤拼接段、堤体与涵闸构筑物交接位置,施工接缝杂物清理不彻底、防渗过渡层缺失,会形成固定渗水缝隙,常规巡检难以排查,汛期易突发局部渗水险情。

1.2 渗漏主要诱发机理

堤防渗漏病害是自然因素与人为因素耦合作用的结果,各类因素协同加速渗漏发育进程。水文工况为渗流提供动力条件,汛期上下游水位高差越大,渗流作用力越强,水位反复升降会扰动土体结构,降低土颗粒粘结力,拓宽原生渗水通道。土体自身物性决定防渗基础性能,填筑土颗粒级配失衡、渗透系数超标、有机质含量过高,都会降低土体原生防渗能力,后期不均匀沉降催生结构性

裂缝。施工遗留问题为渗漏埋下长期隐患,前期填筑摊铺厚度超标、防渗工序简化、灌浆点位布设不均、防渗嵌入深度不足,均会形成永久性渗水薄弱区。后期运维外力进一步破坏防渗体系,水流侧向冲刷、动植物土体掏空、人为坡面作业扰动,都会破损表层防渗结构,衍生次生渗流通道。

1.3 防渗工艺选型基本原则

结合堤防防洪标准、原位地质条件、施工窗口期、项目建设成本四大维度,划定防渗工艺四项选型原则。地质适配优先原则,透水层深度、土体含水率、夹层分布直接决定防渗工艺类型,浅层渗水选用柔性防渗工艺,深层基底渗流选用刚性防渗结构。等级匹配原则,一二级高防洪等级堤防,优先选用耐久性强、防渗系数稳定的防渗工艺。乡镇四级次要堤防,兼顾经济性选用经济型防渗技术。施工避险原则,施工时段避开每年汛期高水位周期,降低临水作业安全风险,减少水体扰动对在建防渗结构的破坏。经济长效原则,结合堤防剩余使用年限选型工艺,平衡施工造价、运维成本、防渗年限,杜绝过度施工、低成本粗放施工两类问题。

2 主流堤防防渗施工工艺及适用工况

2.1 复合土工膜防渗施工工艺

复合土工膜属于坡面柔性防渗工艺,适配堤高 6m 以内、坡面浅层散浸的中小型土质堤防,粉质黏土堤体适配效果最优,具备施工快捷、造价低廉、后期修补便捷的优势。施工前期清理坡面杂草、棱角石块等硬质杂物,平整坡面后压实基底土体,铺设无纺土工垫层缓冲受力,按坡面尺寸裁切土工膜,采用错缝搭接方式排布膜材,搭接宽度控制 $\geq 10\text{cm}$,采用双轨热熔焊接工艺拼接膜体,焊接完成逐段开展气密性检测,破损点位及时修补。坡面顶端、坡脚开挖锚固沟固定膜体端头,杜绝膜体滑落脱开,最后分层覆土防护,隔绝紫外线、水流外力破坏,延长土工膜使用寿命,该工艺不适用于深层基底管涌治理工程。

2.2 劈裂灌浆防渗施工工艺

劈裂灌浆为堤体原位加固防渗工艺,针对性适配服役年限久、内部裂隙发育、土体松散的老旧填筑土堤。工艺原理为低压可控外力劈开堤体原生竖向、横向裂隙,灌注黏土水泥复合浆液,浆液固结后形成连续封闭防渗帷幕,同时挤压密实周边松散土体,兼顾防渗与堤体加固双重作用^[1]。施工流程为先勘测渗漏点位划定灌浆轴线,按 2~3m 间距布设垂直钻孔,清理孔内浮土保障孔壁完整,遵循由低到高、由外到内顺序低压注浆,根据土体硬度分级调控注浆压力,避免高压撑裂完好堤体。注浆完成密封孔口保

湿养护, 养护结束检测帷幕连续性, 病害严重区段加密钻孔补灌, 该工艺防渗深度有限, 无法治理基底深层渗流病害。

2.3 帷幕灌浆防渗施工工艺

帷幕灌浆属于精细化基底止水工艺, 适配隔水层埋深浅、透水层厚度小于 4m 堤基, 多用于涵闸、堤身衔接节点精细化防渗封堵。依托回转钻机垂直钻进至隔水层顶面, 调配适配比重护壁泥浆防控孔壁塌孔, 采用高压匀速灌注纯水泥浆液, 浆液填充基底土体孔隙、细微裂隙, 固结后形成整体性隔水帷幕, 阻断基底横向渗流。相较于劈裂灌浆, 帷幕灌浆注浆压力更大, 浆液固结密实度、结构强度更高, 防渗整体性更好。两类灌浆工艺适用场景差异明显, 劈裂灌浆作用于堤体土体, 侧重内部裂隙修补加固, 帷幕灌浆作用于堤基地层, 侧重基底隔水封堵, 施工需根据渗水位置差异化选用。

2.4 塑性混凝土防渗墙施工工艺

塑性混凝土防渗墙为深层刚性防渗工艺, 适配高水位运行、砂卵石透水层深厚、基底管涌频发的高等级堤防, 防渗耐久年限可达 30 年以上。施工采用分段开槽工艺, 液压开槽机开挖防渗槽孔, 同步灌注护壁泥浆维持槽壁稳定, 槽底沉渣彻底清理后吊装钢筋笼, 现场调控混凝土坍落度, 不间断连续浇筑塑性混凝土, 分段槽体咬合搭接形成整体防渗墙体, 墙体底端嵌入天然不透水层, 彻底截断基底渗流路径。施工核心管控槽体垂直度、槽段咬合宽度、混凝土浇筑连续性, 严控墙体开裂、夹泥缺陷, 该工艺防渗效果稳定, 但施工工期较长、综合造价偏高, 适合重点堤防系统性防渗加固^[2]。

2.5 四类防渗工艺综合对比

从施工造价、工期时长、防渗深度、耐久年限、运维难度五项指标, 横向对比四类工艺适配性。复合土工膜造价最低、工期最短, 仅适配坡面浅层防渗, 抗水流冲击能力一般。劈裂灌浆原位施工扰动小, 适配老旧堤体裂隙治理, 深层防渗能力不足。帷幕灌浆施工精度高, 节点防渗效果优异, 大面积施工经济性较差。塑性混凝土防渗墙防渗可靠性最强, 适配深水高危堤基, 施工成本与工期成本最高。工程施工不可单一套用工艺, 浅层坡面渗水优选土工膜, 堤身内部病害选用劈裂灌浆, 构筑物节点选用帷幕灌浆, 基底深层渗流选用防渗墙, 复杂工况可组合施工, 兼顾防渗效果与施工经济性。

3 堤防防渗工程全周期质量控制

3.1 施工事前源头预控

事前预控从勘察、材料、方案、交底四方面筑牢施工

基础, 从源头规避防渗质量缺陷, 从源头降低后期返工概率。地质勘察加密病害堤段钻孔点位, 按 2m 断面间距分层取样, 精准检测各土层渗透系数、透水层埋深、厚度及颗粒级配数据, 结合现场水文资料出具专项勘察报告, 将勘察数据作为防渗工艺选型、施工深度划定的核心依据, 杜绝经验化施工。进场建材执行试验室双人复检、见证取样制度, 土工膜重点抽检抗拉强度、耐水压、抗老化防渗指标, 严禁使用破损、厚度不达标的膜材。灌浆所用水泥、黏土核验细度、安定性、固结防渗强度。防渗混凝土骨料严控含泥量、粒径级配, 进场砂石骨料分批筛分检测, 所有不合格建材直接登记清场退场, 严禁混用施工。施工专项方案完成施工、监理、业主三级审核会审, 结合流域汛期水文节律排布分段施工进度, 专项论证临水防渗作业可行性、边坡施工安全性, 完善雨季应急施工预案。开工前面向管理人员、作业班组开展全员专项技术交底, 明确四类防渗工艺工序标准、质控红线、竣工验收指标, 逐级落实岗位质控责任, 提前研判开槽塌孔、膜材滑移、注浆不均等施工风险, 前置布设防护措施。

3.2 施工事中过程管控

落实全过程监理旁站、项目部巡检双重管控机制, 精细化闭环管控现场工序施工质量。基底施工复核堤体标高、轴线定位、基底压实度, 堤身基底压实度不得低于 0.93, 新旧堤体接缝、构筑物衔接位置必须全面凿毛清理, 剔除松散浮土后增设防渗过渡垫层, 加厚接缝防渗材料布设厚度, 从结构层面消除接缝渗水薄弱隐患^[3]。分工艺专项落实关键点管控, 土工膜施工严控基面平整度、搭接尺寸、锚固深度, 搭接宽度严格 $\geq 10\text{cm}$, 双轨焊缝完整无断点, 每施工 20m 逐段开展气密性打压验收, 漏气焊缝整体返工重做。灌浆施工严格按设计孔位施工, 执行一孔一档台账制度, 实时留存注浆压力、注浆体量、注浆时长数据, 遵循定量稳压注浆标准, 杜绝漏灌、超压串孔施工。塑性混凝土防渗墙施工严控开槽垂直度偏差 $\leq 0.4\%$, 槽底沉渣厚度控制在 10cm 以内, 严禁混凝土中途停工、分层间隔浇筑, 保障墙体整体性。现场监理实时复核施工参数, 及时整改违规工序, 所有隐蔽防渗工序全程留存影像、检测资料, 多方签字确认后方可进入下一道工序, 杜绝隐蔽工程遗留质量隐患。

3.3 施工事后验收及运维管控

防渗施工完工后依规开展专项竣工验收, 严格依照 SL260-2014 堤防工程施工规范开展检测验收, 采用分层钻孔注水试验、无损探伤检测防渗体整体密实度、渗透系

数,堤体防渗完工渗透系数需低于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, 指标达标后方可竣工验收, 防渗薄弱、渗流不达标的区段, 必须针对性打孔注浆补强, 复检合格后方可交付^[4]。防渗结构成型后划定专属施工防护区域, 设置围挡警示标识, 禁止重型机械碾压、人为开挖坡面扰动, 结合建材属性落实养护作业, 灌浆防渗体保湿养护不少于 7d, 防渗墙体标准养护时长不少于 14d, 保障浆液、混凝土结构固结达标。工程交付后构建常态化长效运维管控机制, 汛期加密堤顶、堤坡水位及渗水巡检频次, 建立每日巡查台账。非汛期定期排查防渗结构开裂、剥离、破损点位, 建立一堤一档运维档案, 复盘历年渗水点位、施工工艺资料, 结合年度水文预报, 提前制定下阶段防渗补强运维方案, 形成前期施工、中期管控、后期运维全链条闭环管理体系, 长效保障堤防防渗使用性能^[5]。

4 结论

本文依托现行水利防渗施工国标, 系统完成土质堤防渗漏特征机理研判、防渗工艺对比、全周期质控体系搭建研究。厘清堤身、堤基、接触面三类渗漏差异化危害, 明确水文、土体、施工、运维四大渗漏诱因, 确定因地制宜、等级适配、避险施工、经济长效四项工艺选型准则。厘清四类主流防渗工艺适用边界与施工重难点,

构建事前预控、事中旁站、事后运维标准化全周期质控模式, 贴合堤防施工现场管理要求。工程实践可得, 结合渗水深度、堤防等级、项目预算科学选型防渗工艺, 严控细部接缝施工质量, 落实闭环质控管理, 可有效阻断堤体渗流通道, 保障堤防防洪运行安全。本次研究仅针对平原常规土质堤防开展研究, 未涉及冻土、滨海盐碱特殊堤体工况。后续可结合智能传感监测、BIM 可视化技术, 打造数字化防渗施工管控模式, 适配智慧水利行业发展趋势。

【参考文献】

- [1]张蕾,马岩.水利工程中堤防防渗施工技术的应用与探讨[J].科技与创新,2025(18):125-127.
- [2]梦辉.水利工程中堤防防渗施工技术的应用研究[J].水上安全,2025(2):70-72.
- [3]李佳乐.浅谈堤防加固工程中防渗墙技术的应用[J].水上安全,2024(2):184-186.
- [4]毛玉增.基于防渗截渗技术的水利工程堤防加固处理研究[J].珠江水运,2024(15):82-84.

作者简介:杨志(1996.11—),男,土家族,贵州铜仁,大学本科学历,职称:助理工程师,研究方向:水利工程施工管理。