

堤防渗透变形成因分析及加固处理措施

李彦伦

中工武大设计集团有限公司新疆分公司

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7075

[摘要] 渗透变形是堤防运行阶段高发结构性病害,病害处置不及时会持续削弱堤身、堤基整体稳定性,极端工况下诱发堤体失稳、溃决等重大安全险情。以堤防长效安全运行为目标,文章梳理各类渗透变形病害形成机理,梳理现阶段主流防渗加固工艺,依托实体堤防工程对比多种渗透病害检测手段,完整拆解防渗加固方案设计逻辑与现场施工流程。完工后多维度检测数据证实该套加固体系可有效阻断渗流通道、抑制土体渗透破坏,为堤防工程安全运行提供保障。

[关键词] 堤防工程; 渗透变形; 成因分析; 加固措施

中图分类号: TV871.1 文献标识码: A

Analysis of Causes and Reinforcement Strategies for Seepage-Induced Deformation in Embankment Structures

Yanlun Li

Xinjiang Branch, China Engineering Wuda Design Group Co., Ltd.

[Abstract] Seepage-induced deformation represents a critical geotechnical failure mode commonly observed during the operational phase of embankment structures. If left unmitigated, such deformation progressively compromises the structural integrity and foundation stability of embankments; under extreme hydraulic or loading conditions, it may culminate in catastrophic failures—including slope instability, internal erosion, and embankment breaching—posing significant safety and environmental risks. To ensure long-term structural reliability and operational safety, this paper systematically examines the physical mechanisms underlying principal seepage deformation types, critically reviews state-of-the-practice seepage control and reinforcement methodologies, and evaluates the applicability and detection efficacy of contemporary field monitoring techniques through case studies drawn from representative embankment projects in Xinjiang. Furthermore, the paper delineates the conceptual design rationale, technical specifications, and implementation protocols for integrated anti-seepage reinforcement systems. Post-construction multi-source monitoring data—including piezometric, geophysical, and visual inspection results—demonstrate that the proposed reinforcement strategy effectively intercepts seepage pathways, suppresses soil particle migration, and enhances overall hydraulic stability, thereby contributing to sustainable embankment performance and risk-informed infrastructure management.

[Key words] Embankment engineering; Seepage-induced deformation; Mechanism analysis; Reinforcement strategy; Hydraulic stability

引言

堤防渗透变形的本质为堤内持续渗流形成水力坡降,水流裹挟土体细粒流失、扰动原有土体骨架,最终形成管涌、流土、接触冲刷三类典型破坏形态。堤基地质、堤身填筑构造存在明显个体差异,各类堤防诱发渗透病害的主导诱因各不相同。开展堤防加固前需选用适配检测手段精准判定渗流破坏根源,再匹配针对性防渗处置工艺,以此从根源控制渗透变形发展,实现堤体长效防渗稳定。

1 堤防渗透变形的原因

堤防渗透变形的发生与堤防结构、土体特性、水文条件密切相关,不同部位(堤身、堤基)的渗透变形,其诱发机制存在显著差异,需分别展开分析。

1.1 堤身渗透变形

堤身作为堤防的主体挡水结构,其渗透变形主要源于填筑质量缺陷与后期环境作用,导致土体抗渗性能下降,形成渗流通道。一是填筑压实度不足。部分堤防建设时采用人工或小型机

械填筑, 压实度未达到设计要求, 土体孔隙率偏大。洪水期堤身两侧形成水头差, 水流易在孔隙中形成集中渗流, 当渗流作用于土体的动水压力达到能使土颗粒悬浮或移动的临界水力梯度时, 土颗粒会不断流失, 最终导致土体塌落^[1]。二是堤身材料不均。堤防施工中若未严格控制填筑料质量, 将粗土和细土不均匀填筑, 由于这两种材料的透水性不同, 所以水流会优先沿渗透系数较大的区域流动, 形成渗流通道, 长此以往就会产生局部塌陷。三是低深裂缝发育。堤防运行过程中会因为各种因素影响出现干缩裂缝^[2], 在反复冻融和长期侵蚀的作用下裂缝宽度就会不断扩大和延伸, 最终发展为集中渗流通道, 诱发渗透变形。

1. 2堤基渗透变形

堤基是堤防工程的基础支撑, 主要作用是承受堤身传递的全部荷载并确保堤防稳定, 其渗透变形主要与地质条件、水力条件和工程因素有关, 同时, 堤基的渗透变形具有隐蔽性强、检测难度高等特点^[3]。其中, 多数堤防是围绕冲洪积平原地带的房屋建筑、道路耕地而建设的, 堤基地层常会存在粗、细粒土层互层的情况, 部分区域还会存在不规则的透镜体层, 由于粗粒土的透水性通常优于细粒土, 致使洪水期地下水多顺粗粒土层径流, 其渗透变形破坏类型也会因渗流方向的变化而发生变化, 当面临洪水期水位上升、降雨导致地下水位变化, 基坑开挖、地下水抽取时, 也可能改变渗流路径和压力, 诱发破坏。另外, 当已建堤防临水截渗、背水导渗、工程加固等防渗措施失效也会加剧渗透变形风险。

2 堤防渗透变形的常用加固技术

2. 1防渗技术

防渗技术的核心是在堤防构建连续的防渗屏障, 截断渗流通道。

(1) 混凝土防渗墙通过采用机械抓斗、冲击钻或回转钻等设备在泥浆护壁条件下开挖槽孔, 浇筑混凝土形成墙体, 适用于深层砂层或复杂地层; 施工时需控制槽壁垂直度(偏差 $\leq 1/500$), 防止墙体错位, 墙体底部需嵌入不透水层 $\geq 0.5\text{m}$, 确保防渗完整性。

(2) 高压喷射注浆防渗墙通过高压注浆管(压力 $20\text{--}40\text{MPa}$)将水泥浆液喷射至土体中, 浆液与土体混合固化形成桩体, 多桩搭接形成防渗墙; 施工前需进行现场试验, 确定注浆压力、提升速度($10\text{--}20\text{cm/min}$)等参数, 避免出现桩体强度不足或搭接不密实的问题^[4]。

(3) 防渗铺盖采用黏性土或土工膜铺设于堤前地面, 延长渗流路径, 降低渗流梯度; 黏性土铺盖需分层压实(每层厚度 $20\text{--}30\text{cm}$), 压实度 ≥ 0.92 ; 土工膜铺盖需采用热熔焊接, 焊缝强度 $\geq$ 母材强度的 80% , 且需在膜上铺设保护层(厚度 $\geq 30\text{cm}$ 的黏性土), 防止膜体被水流冲刷损坏。

2. 2排水减压技术

排水减压技术的核心是排出堤身或堤基中的渗透水, 降低孔隙水压力, 减少渗流力。(1) 排水棱体设置于堤脚外侧, 采用级配砂石(粒径 $5\text{--}30\text{mm}$)堆砌, 渗透系数 $\geq 1\times 10^{-2}\text{cm/s}$, 能快速排

出堤身浸润线以下的渗水, 降低堤身孔隙水压力; 棱体顶部需高于堤脚处的浸润线, 避免渗水在棱体内积聚。(2) 减压井用于降低堤基承压水水头, 井管采用钢管或PVC管, 滤管段包裹滤网(孔径 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$), 防止砂粒进入井管^[5]; 施工时需严格控制成井垂直度, 滤管段需对准承压水层, 井内填充滤料(粒径 $2\text{--}5\text{mm}$), 确保承压水能顺畅流入井内, 通过水泵排出地面, 将水头差控制在安全范围。

2. 3结构加固技术

结构加固技术的核心是增强堤防整体稳定性与抗渗性, 弥补原有结构缺陷。(1) 堤身培厚采用黏性土在堤身临水侧或背水侧加宽培厚, 培厚部分需与原堤身结合紧密, 结合面需开挖台阶(宽度 $\geq 1\text{m}$, 高度 0.5m), 并铺设土工格栅(纵横向抗拉强度 $\geq 15\text{kN/m}$), 防止新老土体分离; 培厚后堤身边坡需放缓($1:2.5\text{--}1:3.0$), 降低滑动风险。(2) 土工合成材料加固中, 土工膜用于修复堤身裂缝时, 需先清理裂缝周边土体(宽度 $\geq 1\text{m}$), 将膜体覆盖裂缝并延伸至裂缝两侧 $\geq 0.5\text{m}$, 膜体采用膨胀螺栓固定; 土工格栅用于增强堤身整体性时, 需分层铺设(每层间距 $0.5\text{--}1\text{m}$), 格栅搭接宽度 $\geq 10\text{cm}$, 采用绑扎连接, 确保格栅与土体协同受力。

3 基于工程实例的堤防渗透变形分析及加固处理措施

为验证堤防渗透变形分析方法与加固处理措施的有效性, 本文以某冲洪积平原地区河流堤防工程为例, 详细阐述渗透变形的检测、分析、加固设计与实施效果。

3. 1工程概况

该堤防工程位于冲洪积平原下部, 承担着沿岸3个乡镇的防洪任务, 堤防总长度 8.5km , 堤高 6.0m , 堤顶宽度 8.0m , 临水侧边坡 $1:2.5$, 背水侧边坡 $1:3.0$ 。堤防建于1975年, 原设计防洪标准为20年一遇, 2022年洪水期间, 发现堤防K3+200-K3+800段(长度 600m)背水侧堤脚出现多处湿润区, 局部存在管涌迹象(涌水带出细颗粒砂粒), 需开展渗透变形治理。

3. 1. 1工程地质条件

通过地质勘察(钻孔+探地雷达), 该堤段堤身与堤基土层分布如下(见表1):

表1 工程地质条件表

土层类型	分布部位	厚度(m)	渗透系数(cm/s)	主要特性
堤身黏性土	堤身	6.0	$1\times 10^{-5}\text{--}5\times 10^{-5}$	黄褐色, 可塑状态, 局部压实度不足
素填土	堤基表层	1.5-2.0	$1\times 10^{-4}\text{--}3\times 10^{-4}$	杂色, 含植物根茎, 松散状态
粉质黏土	堤基中层	2.0-2.5	$5\times 10^{-6}\text{--}1\times 10^{-5}$	灰色, 可塑状态, 局部夹砂粒
粉砂层	堤基深层	1.5-3.0	$1\times 10^{-3}\text{--}5\times 10^{-3}$	灰色, 松散状态, 颗粒均匀, 是主要渗透通道
黏土层	堤基底层	>5.0	$<1\times 10^{-7}$	灰黑色, 硬塑状态, 为不透水层

3. 1. 2水文条件

该堤前水位与堤后地面高差达 5.5m ; 堤基粉砂层与河流主槽连通, 洪水期渗流沿粉砂层从堤前流向堤后, 形成横向渗流; 勘

察发现,堤基粉砂层水力比降超过安全允许水力比降值,是管涌的主要诱因。

3.2渗透变形分析方法与结果

3.2.1检测分析方法

针对该堤段,采用“现场检测+室内试验+数值模拟”相结合的分析方法:

(1)现场检测:采用探地雷达(频率100MHz)扫描堤身与堤基,识别渗流通道位置(雷达图像中呈现“低阻异常区”);在背水侧堤脚布置3个注水试验孔,检测堤基土层渗透系数;在堤身布置5个浸润线观测孔,监测洪水期堤身浸润线高程。

(2)室内试验:取堤身黏性土、堤基粉砂层土样进行试验,测定土样的颗粒级配、渗透系数、允许水利比降等参数。

(3)数值模拟:采用SEEP/W软件建立渗流计算模型,模拟洪水期堤身与堤基的渗流场,计算渗流梯度、浸润线高程等指标,验证渗透变形风险区域。

3.2.2分析结果

检测与分析结果显示,该堤段渗透变形问题主要集中在两方面:

(1)堤身问题: K3+350-K3+600段堤身压实度不足(0.88-0.90),渗透系数达 5×10^{-5} cm/s,洪水期浸润线低于堤顶,浸润线逸出点位于背水侧堤脚以上0.5m,溢出点位于堤身坡面之上。

(2)堤基问题:全段堤基粉砂层渗透系数 1×10^{-3} - 5×10^{-3} cm/s,水力比降0.6-0.8,超过允许值;探地雷达检测发现, K3+400-K3+500段粉砂层存在“局部富水区域”,是管涌高发区;注水试验显示,该区域堤基渗透量达0.5L/(min·m),远超规范限值。

3.3加固方案设计

根据渗透变形分析结果,结合工程成本与施工周期要求,采用“防渗+排水”的综合加固方案,具体设计参数见表2。

表2 加固方案设计参数表

加固部位	加固技术	设计参数	施工范围
堤基	高压喷射注	桩径600mm,搭接宽度150mm,深度8.0m(穿透粉砂层,嵌入粘土	K3+200-K3+
	浆防渗墙	层0.5m),水泥浆液浓度35% 渗透系数 $\leq 1\times10^{-6}$ cm/s	800全段
堤身	土工膜防渗	土工膜:HDPE膜,厚度0.8mm,铺设于堤身临水侧,延伸至堤顶	K3+350-K3+
	+堤身培厚	与堤脚各1m; 培厚:黏性土,厚度1.5m,压实度 ≥ 0.93	600段
堤脚	排水棱体	材料:级配砂石(5-30mm),顶宽1.5m,底宽3.0m,高度1.2m,	K3+200-K3+
		边坡1:1.5,渗透系数 $\geq 1\times10^{-2}$ cm/s	800全段
堤基	减压井	井径400mm,深度12.0m(穿透粉砂层,进入黏土层1.0m),滤管	K3+400-K3+
		段长度3.0m,间距15m,单井出水量 $\geq 5\text{m}^3/\text{h}$	500段

3.4加固实施与效果检测

高压喷射注浆防渗墙施工时,采用单管法注浆,注浆压力控制在25-30MPa,提升速度15cm/min,每完成5根桩进行1次钻孔取芯,检查桩体完整性与搭接质量,芯样抗压强度需 $\geq 1.5\text{MPa}$ 。

土工膜铺设前,需清理堤身临水侧表面(平整度偏差 $\leq 50\text{mm}$),膜体采用热熔焊接,焊缝宽度 $\geq 10\text{mm}$,每100m焊缝进行1次气压检测(压力0.2MPa,保压30min,压力降 $\leq 0.005\text{MPa}$);堤身培厚采用分层填筑,每层厚度30cm,采用振动压路机(激振力20kN)压实,压实度检测合格后方可进行下一层填筑。

排水棱体施工时,砂石材料需分层摊铺(每层厚度50cm),采用小型夯实机(夯实能量10kJ)夯实;棱体与堤脚结合处需铺设无纺布(渗透系数 $\geq 1\times10^{-3}$ cm/s),防止堤身土颗粒进入棱体。

减压井施工时,采用回旋钻成孔,井管安装后填充滤料(粒径2-5mm),滤料填充需均匀,避免出现架空现象;成井后进行抽水试验,确保单井出水量达标。

在完成上述加固后,现场检测显示注水试验测得堤基渗透量0.03L/(min·m)、渗透系数 8×10^{-7} cm/s,满足防渗控制指标;洪水期堤身浸润线高程6.8m,逸出点位于堤脚下方,堤体无管涌、渗漏病害,排水系统工况稳定,加固效果符合设计要求。

4 结束语

堤防渗透变形成因复杂,在治理过程中需要遵循因地制宜和综合治理的原则,并做好以下三个关键点的把控:一是精准勘察,通过探地雷达、注水试验等手段详细探明渗透通道的位置和成因;二是制定合理科学的加固方案,根据渗透深度、地质条件等因素,制定合理科学的加固技术方案;三是加强施工过程中管控,确保防渗施工各环节技术要点的落实执行,以保证加固的效果。

【参考文献】

[1]王玉丽,周勇.防渗截渗技术在水利工程堤防加固处理中的运用探究[J].建材发展导向,2025,23(20):100-102.

[2]耿大伟.复杂地质条件下堤防稳定分析与达标加固策略研究[J].水上安全,2025,(19):133-135.

[3]张甲,齐清.高水位条件下堤防加固施工技术难点与对策[J].建筑工人,2025,46(10):4-6.

[4]蔡荣源,吴茹.堤防渗透变形类型判别与加固方案比选分析[J].河南水利与南水北调,2024,53(08):89-90+93.

[5]武娟,张鸣,李岩松,等.深厚软土地基上堤防变形特性分析研究[J].人民珠江,2022,43(04):122-126.

作者简介:

李彦伦(1993--),男,汉族,甘肃省武威市人,大学本科,中级水利,水利工程地质勘察。