

黄河下游堤防裂缝成因分析及应急抢险施工技术改进研究

王超 姜健

郑州黄河河务局中牟黄河河务局 河南 郑州 451450

摘要:黄河下游堤防是保障黄淮海平原安全的关键屏障,其安危直接关系到数百万人民群众的生命财产安全和经济社会稳定。裂缝是黄河下游堤防最常见的隐患之一,其出现不仅削弱堤身整体性,更为管涌、滑坡等恶性险情提供了诱发条件。本文立足于黄河下游堤防的特殊工程地质条件与水文环境,系统分析裂缝的主要类型与分布规律,从土体力学特性、水位变化、气候干湿循环、生物活动及施工质量等多维度深入剖析裂缝的形成机制。在此基础上,对当前应急抢险施工技术进行系统梳理,指出现有技术快速性、适应性和长效性方面的不足,进而提出涵盖快速勘测、材料改良、施工工艺优化及临时稳固与永久修复衔接等方面的技术改进策略,为黄河下游堤防裂缝应急抢险提供理论支撑与技术参考。

关键词:黄河下游;堤防工程;裂缝成因;应急抢险;施工技术改进

引言

黄河以“善淤、善决、善徙”著称,其下游河道在长期泥沙淤积作用下形成举世闻名的“地上悬河”。目前,黄河下游两岸的临黄大堤总长约 1370 公里,是保障华北平原安危的重要防洪工程体系。由于黄河下游堤防大多建于不同历史时期,堤身土料来源复杂、压实质量参差不齐,加之长期受水位涨落、降雨入渗、冻融循环及生物活动等多种因素作用,堤身裂缝问题普遍存在。裂缝不仅破坏了堤身的整体性和防渗性能,更重要的是,它降低了堤坡的稳定性,在汛期高水位条件下极易演变为管涌、滑坡甚至溃堤等重大险情。然而,当前对裂缝的处置多采用“发现一处、开挖回填一处”的零散应对模式,缺乏对裂缝成因的系统性诊断,也缺少针对黄河下游粉砂质堤身特点的专项应急抢险施工技术体系。

1 黄河下游堤防裂缝的主要类型与分布特征

1.1 裂缝的主要类型

黄河下游堤防裂缝按形态和成因可划分为多种类型。纵向裂缝是最常见的一类,其走向大体平行于堤轴线,多分布在堤顶或堤坡中上部,裂缝长度从数米到数十米不等,宽度一般 1~5 厘米,严重者可超过 10 厘米。横向裂缝则走向垂直于堤轴线,横穿堤身断面,是危害性最大的一类裂缝,因其贯穿堤身可能形成集中渗漏通道^[1]。龟裂缝多出现在堤顶表面和背水坡,呈不规则网格状,深度较浅,一般不超过 50 厘米,虽不及前两类严重,但大量龟裂会加速坡面水土流失和雨水入渗。此

外,还有因堤基不均匀沉降引起的弧形沉陷裂缝以及堤身与穿堤建筑物结合部位的接触裂缝。

1.2 裂缝的空间分布规律

从空间分布看,黄河下游堤防裂缝的分布呈现出明显的不均匀性和部位集中性。在堤段分布上,老口门段(历史上曾决口并堵复的堤段)、加高培厚接合部位以及不同时期施工的接头部位裂缝密度显著高于其他堤段。在垂直分布上,堤顶裂缝最为密集,尤其是堤顶内外两侧边缘附近;堤坡裂缝以中上部居多,坡脚附近较少。在时间分布上,裂缝的出现在每年汛后和冬春交替季节呈现两个高峰,前者与汛期高水位浸泡后的卸荷回弹有关,后者则与冻融循环和春季干旱密切相关。

1.3 裂缝的工程危害性

不同裂缝对堤防安全的影响程度差异显著。浅层龟裂缝主要影响堤顶和坡面的完整性,加剧雨水入渗和冲刷,长期作用会逐步演化成更深的冲刷沟槽。纵向裂缝降低堤身的整体抗剪能力,在偏高水位运行时可能诱发局部滑坡。横向裂缝的危害最大——当汛期水位上升后,裂缝可能成为贯通堤身的渗流通道,引发管涌和接触冲刷,若处置不及时,极有可能在短时间内发展为溃口险情。因此,对裂缝的成因判断必须精准,应急抢险措施必须快速有效。

2 黄河下游堤防裂缝的多因素成因分析

2.1 土体力学特性与压实缺陷

黄河下游堤防多为粉砂壤土和砂壤土填筑,其颗粒组成以粉粒为主(含量通常超过60%),粘粒含量偏低,塑性指数较小。这类土体具有显著的“水敏性”——干燥时强度尚可,但遇水后强度迅速衰减,变形模量明显降低。更关键的是,由于不同历史时期施工标准的差异,堤身压实度极不均匀^[2]。部分老堤段压实度仅达80%~85%,远低于现行规范要求,欠压实土体在自重和外部荷载作用下产生不均匀压缩变形,当堤身不同部位的沉降量差异超过土体的极限拉应变时,即产生纵向裂缝。这种因压实不均引发的裂缝往往在堤段接合部和加培界面最为集中。

2.2 水位变动与渗流作用

黄河下游河道汛期与非汛期水位落差巨大,某些河段水位年变幅可达8~12米。当水位快速上升时,堤身迎水坡受到水的浸泡,土体吸水膨胀并软化;当水位骤降时,堤身内部的孔隙水压力无法同步消散,形成较大的渗透压力和指向临空面的渗透力,引发堤坡的卸荷变形和拉裂。这种水位骤降诱发的裂缝通常沿着堤坡的卸荷裂隙面发展,形态多为纵向或弧形,且裂缝两侧常有明显的高差位移。此外,长期高水位运行期间,渗流出口处的渗透变形和管涌也会在其上方的堤身中引发沉陷裂缝。

2.3 气候干湿循环与温度效应

黄河下游属暖温带季风气候,年降水量集中且变率大,春季干旱少雨,夏季多暴雨,秋冬季气温变化剧烈。堤身土体在干湿循环过程中经历反复的胀缩变形——干燥收缩时产生龟裂缝和干缩裂缝,湿润膨胀时原有裂缝部分闭合,但反复循环导致土体结构逐步损伤,强度下降。与此同时,冬季的冻胀作用不容忽视:堤顶表层土体中的水分冻结后体积膨胀,春季解冻后融化收缩,这种冻融循环对堤顶表面的破坏作用每年都在积累,尤其在堤顶排水不畅的低洼地段,冻胀裂缝和翻浆问题突出。

2.4 生物活动与其他外部因素

黄河下游堤防沿线生物活动频繁,鼠类、獾类等穴居动物在堤身内掘洞筑巢,洞穴及其上方的土体极易塌陷形成裂缝。植物根系腐烂后留下的孔道也会成为集中渗流和裂缝发展的初始路径。此外,堤顶道路的车辆荷载、堤防附近取土和堆载、地震活动等外部因素也可能诱发或加剧裂缝的发展。这些因素虽然每次作用强度不大,但长期累积效应不可忽视。

2.5 施工接缝与历史遗留问题

黄河下游堤防经历了多次加高培厚,新老堤体之间的

结合面往往是结构薄弱面。若在加培时未对老堤坡进行足够的清基刨毛和洒水湿润处理,或新填土压实度不足,则新旧堤体之间难以形成有效结合,极易沿结合面产生纵向裂缝。穿堤涵闸、管道等建筑物与堤身的接合部位,由于刚性结构与土体的变形协调性差,加之回填土压实困难,也是裂缝的高发区。这些历史遗留的施工缺陷在后期运行中持续发挥作用,形成裂缝的薄弱基础。

3 当前应急抢险施工技术的主要不足

3.1 勘察手段与时效性矛盾

裂缝险情的应急抢险要求快速查明裂缝的走向、深度和发育情况,以确定抢险范围和施工方案。目前常用的开挖探坑和钻孔取芯方法虽然结果可靠,但耗时长、对堤身扰动大,且难以全面掌握裂缝的空间展布。尤其在汛期紧迫形势下,勘察耗时过长会直接延误最佳抢险时机。同时,对裂缝成因的现场快速判断多依赖经验,缺少标准化的快速诊断流程,容易出现判断偏差导致措施失当。

3.2 裂缝处理技术针对性不强

针对不同类型的裂缝,抢险处置措施应有所区别,但实践中常用“开挖回填”作为通用方法。对于浅层龟裂缝和宽度较小的纵向裂缝,开挖回填工作量大、施工周期长,并非最优选择;而对于深部横向裂缝,单纯的开挖回填若不配合灌浆封闭处理,难以彻底封堵深层渗流通道。此外,不同土质条件下的回填材料配合比、含水率控制及压实工艺缺乏针对性设计,回填后的新老界面结合质量难以保证,汛期再次开裂的风险较高。

3.3 抢险施工的组织与工艺短板

应急抢险施工的最大约束是“时间”,而现有的施工组织方式普遍偏慢。开挖回填工序多、湿作业时间长、土方平衡复杂,在大规模裂缝群发时难以快速铺开。部分堤段受场地狭窄和交通条件限制,大型机械无法进场作业,只能依靠人工,进一步降低了施工效率^[3]。同时,抢险过程中的排水、支护和防雨覆盖等辅助措施缺乏标准化配备,遇降雨天气时施工常被迫中断,延误处置时机。

3.4 临时措施与永久修复脱节

目前抢险实践中普遍存在“重临时处置、轻长远效果”的倾向。应急回填后未对处理质量进行有效检测,也未安排后续的定期观测,导致部分裂缝在后续汛期反复出现,甚至较前次扩大。临时抢护措施与永久修复工程之间缺乏明确的衔接程序和技术标准,裂缝处置长期停留在“反复抢、反复裂”的低效循环中。

4 应急抢险施工技术改进策略

4.1 快速勘测诊断技术的引入

为缩短勘察时间,应引入适用于堤防裂缝的快速无损检测技术组合。地质雷达(GPR)可快速获取裂缝深度和堤身内部疏松区域的信息,适用于浅至中等深度的裂缝探测;高密度电阻率法对含水裂缝和渗漏通道具有良好响应,可用于汛期判断裂缝是否形成渗流贯通。建议建立“快速普查—重点详查”的分级勘察流程:采用地质雷达对险情堤段进行快速扫描,初步判断裂缝位置和大致深度,再对重点裂缝辅以钻孔验证,大幅压缩勘察阶段的耗时。同时制定裂缝险情的标准化快速诊断表格,指导现场人员系统采集裂缝形态、水文条件、堤身结构等关键信息,减少主观判断偏差。

4.2 抢险材料的改良与多样化配置

针对黄河下游粉砂土特点,对抢险回填材料进行改良是提升处理效果的核心。对于浅层裂缝,推荐采用“水泥改性土”回填——在开挖后的裂缝中掺入3%~5%的水泥并加水拌合压实,利用水泥的胶凝作用提高回填土的早期强度和抗裂性能。对于深层裂缝和可能渗漏的横向裂缝,应优先采用“粘土水泥浆液”或“水玻璃-水泥双液注浆”进行灌浆填充,其流动性好、初凝时间可调,能在较短时间内封堵深层空隙。建议基层抢险单位在汛前按配方储备足够数量的改性土材料和灌浆材料,并明确各类材料的适用条件和施工技术参数,避免抢险时临时寻找材料。

4.3 施工工艺的快速化与标准化改进

改进施工工艺应从工序优化和机械化配套两方面展开。对于宽度较宽(>5cm)的浅层裂缝,采用“切割—清理—回填—碾压”流水作业法替代传统的大开挖方式,即使用切缝机沿裂缝两侧切割出规整沟槽,清理后分层回填改良土并采用小型振动碾快速压实,减少土方开挖量和回填量。对于不宜开挖的堤段和深部裂缝,采用“低压慢速灌浆”工艺——在裂缝两侧布设灌浆孔,自下而上分段灌注改性浆液,利用浆液的渗透和劈裂作用填充裂缝及其周边的疏松层^[4]。同时,配备轻便灵活的抢险施工装备(如履带式小型钻灌一体机、折叠式皮带运料机),提高狭窄堤顶作业面的施工效率。

4.4 临时稳固与长期修复的衔接设计

应急抢险不能止于临时处置,应建立“应急抢护—汛后加固—长效监测”的三阶段衔接机制。在应急阶段,处理方案即应预留后续永久加固的条件——例如,

开挖回填的沟槽断面形状宜设计为倒梯形,便于汛后加深处理;灌浆孔位布置应兼顾后期补充灌浆的需要,所有孔位均应编号并保留竣工资料。应急处理结束后,应对处理区域进行定期变形监测,汛后组织专项检测评估,根据评估结果确定是否需要进行永久性加固处理(如增设防渗墙、堤身加厚等)。通过制度化的衔接设计,避免“应急了事”和“重复抢险”。

4.5 健全分级响应与预案体系

不同规模、不同类型裂缝所需的抢险资源差异显著,应建立分级响应机制。将裂缝按宽度、深度、位置(是否临水)和发展趋势划分为三个响应级别:一般裂缝(宽度<3cm、浅层、非临水侧)由基层管理段按常规流程处理;较大裂缝(宽度3~8cm、中等深度)由县级防指启动专项抢险预案,调拨专业抢险队和储备材料;重大裂缝(宽度>8cm或横向贯穿、临水侧出现)由市级以上防指统一调度,启动多部门联合抢险。分级预案应明确每一级别的组织指挥体系、物资调配路径、施工技术方和信息上报程序,确保险情发生后能够快速启动相应级别的应对措施,减少决策层级延误。

结束语

黄河下游堤防裂缝受土体力学、水文气候、生物活动及施工质量等多重因素长期影响。本文系统剖析了裂缝的类型、分布规律及致因机制,指出当前应急抢险在勘察时效、材料针对性、工艺效率及长效性方面存在不足。据此,提出涵盖快速勘测、改良材料、高效工艺、应急与永久衔接及分级响应的综合改进策略。该策略旨在推动裂缝抢险由“被动应付”向“主动应对”转变,通过技术升级与管理优化,实现险情的快速诊断、精准处置与效果巩固。鉴于堤防安全事关重大,管理者与技术团队应树立系统视角,将裂缝视为反映堤身健康的关键指标,把每次抢险作为认识堤防、改进技术的契机,从而持续提升除险加固能力,确保黄河安澜。

参考文献

- [1] 张金良,李永强,王卫东.黄河下游堤防工程安全隐患类型与分布规律研究[J].人民黄河,2022,44(8):1-6.
- [2] 刘建伟,赵宇,陈刚.堤防裂缝成因及探测技术研究进展[J].水利水运工程学报,2023(3):89-97.
- [3] 王立成,孙涛,周明.地质雷达在堤防隐患探测中的应用效果分析[J].工程地球物理学报,2024,21(2):245-252.
- [4] 陈晓东,杨磊,张华.改性土在堤防裂缝快速回填中的试验研究与工程应用[J].岩土工程学报,2023,45(增刊1):156-161.