

堤防工程除险加固技术创新与可持续发展研究

郑 达

浙江富江建设集团有限公司 浙江 温州 325000

摘 要：随着全球气候变化加剧和极端天气事件频发，我国江河湖泊堤防工程面临日益严峻的安全挑战。大量老旧堤防因建设标准低、材料老化、管理维护不足等原因，存在渗漏、管涌、滑坡、崩岸等多重风险，严重威胁人民生命财产安全和区域经济社会稳定。本文围绕堤防工程除险加固中的关键技术问题，系统梳理当前主流及新兴的加固技术体系，深入分析其适用性、经济性与环境影响；在此基础上，提出以“韧性提升、生态融合、智慧运维”为核心的堤防工程可持续发展理念，并构建涵盖全生命周期管理、多目标协同优化和制度保障机制的可持续发展路径。研究表明，未来堤防除险加固应深度融合新材料、新工艺、数字孪生、人工智能等前沿科技，推动从“被动抢险”向“主动防御”、从“单一功能”向“多功能融合”的战略转型，实现工程安全、生态友好与社会经济协调发展的有机统一。

关键词：堤防工程；除险加固；技术创新；可持续发展；生态堤防；智慧水利

引言

堤防作为防洪减灾体系中最基础、最广泛的工程屏障，在保障沿江沿河城市、农田、交通干线和重要基础设施安全方面发挥着不可替代的作用。我国现有堤防部分建于20世纪50至80年代，存在设计标准偏低、施工质量参差、运行维护滞后等问题。近年来，受极端降雨、持续高水位、地质活动等多重因素叠加影响，多地堤防相继出现险情，如2020年长江流域特大洪水期间，江西、安徽等地多处堤段发生管涌、滑坡，暴露出堤防工程体系的脆弱性。传统的堤防除险加固多依赖加高培厚、黏土斜墙、混凝土防渗墙等手段，虽在短期内可提升防洪能力，但往往忽视生态环境影响、资源消耗高、后期运维成本大，难以适应新时代高质量发展的要求。《“十四五”水安全保障规划》明确提出，要“推进堤防达标建设与病险整治，强化生态化、智能化堤防建设”。因此，如何在确保工程安全的前提下，推动堤防除险加固技术向绿色、智能、韧性方向转型升级，已成为水利领域亟待解决的重大课题。

1 堤防工程主要险情类型与成因分析

1.1 渗流破坏

渗流破坏是堤防工程中最普遍且最具隐蔽性的险情类型，其表现形式包括散浸、管涌和流土等。这类险情的根本原因在于堤身或堤基土体渗透性能差异显著，加之原有防渗体系存在不连续或老化失效的问题，在高水位长期作用下，水压力促使水流沿薄弱路径渗透。尤其在砂性土堤基地区，由于土颗粒间孔隙较大，一旦渗流坡降超过临界值，细颗粒便会被水流带走，形成集中渗漏通道，进而迅速演变为管涌甚至穿堤漏洞，严重威胁

堤防整体稳定性。此外，部分早期堤防未设置有效排水减压设施，背水侧孔隙水压力无法及时消散，进一步加剧了渗流破坏的风险。

1.2 边坡失稳

边坡失稳通常表现为迎水坡或背水坡的滑坡、坍塌等现象，其成因具有多因素耦合特征。一方面，持续降雨或高水位浸泡导致土体含水量增加，有效应力降低，抗剪强度显著下降；另一方面，历史施工中若存在填筑不密实、分层不清或压实度不足等问题，将形成潜在滑动面^[1]。此外，部分堤段为节省用地而采用过陡坡比，或在堤顶、堤脚违规堆载、通行重型车辆，均会增大边坡下滑力矩。

1.3 崩岸与冲刷

在河流弯道、水流顶冲或河道束窄段，水流动力强劲，对岸坡产生持续冲刷作用，极易引发崩岸。水流不断淘蚀堤脚，使上部土体失去支撑，在重力作用下发生块体坍塌。这一过程在汛期尤为剧烈，而在水库调度频繁的区域，如三峡库区，水位周期性涨落导致岸坡反复干湿交替，土体结构劣化加速，崩岸风险显著升高。传统抛石护脚虽能短期缓解冲刷，但若缺乏系统性岸线防护规划，往往治标不治本，难以应对长期水动力演变带来的挑战。

1.4 结构老化与材料劣化

大量早期建设的堤防工程受限于当时的技术条件和经济水平，多采用就地取材的天然土料，缺乏系统的防渗、排水和结构强化设计。随着时间推移，这些材料在自然环境作用下逐渐劣化：黏性土干缩开裂，砂性土被生物（如白蚁）侵蚀形成空洞，冻融循环导致土体松

散, 植被根系穿透破坏防渗层等。这些缓慢而持续的退化过程虽不易察觉, 却在无形中削弱了堤防的承载与抗灾能力, 使其在遭遇极端水文事件时极易突发险情。因此, 对老旧堤防开展系统性健康诊断与寿命评估, 已成为除险加固工作的前提。

2 堤防除险加固技术体系演进与创新

2.1 传统加固技术及其局限

长期以来, 堤防除险加固主要依赖加高培厚、黏土斜墙、混凝土防渗墙及抛石护脚等传统技术。加高培厚通过增大堤身断面以提升防洪标准, 虽原理简单、效果直观, 但需大量土方并占用宝贵土地资源, 且易改变原有河道行洪边界。黏土斜墙或心墙利用低渗透性黏土阻隔渗流, 对土料质量和施工工艺要求较高, 雨季施工困难, 工期长, 且易因干缩或冻胀产生裂缝。混凝土防渗墙适用于深厚覆盖层地基, 能形成连续可靠的防渗屏障, 但造价高昂, 施工过程中需开挖深槽, 对周边环境扰动大, 且难以适应复杂地质条件。抛石护脚虽能抵御局部冲刷, 但块石易被洪水冲移, 稳定性差, 需频繁补充维护。总体而言, 这些传统方法虽在特定历史阶段发挥了重要作用, 但在生态友好性、资源效率和智能化水平方面已显不足, 难以满足新时代可持续发展的综合需求。

2.2 新型材料与工艺创新

近年来, 随着材料科学与工程技术的进步, 一系列新型加固材料与工艺逐步应用于堤防工程。

2.2.1 高性能防渗材料

高性能防渗材料如高密度聚乙烯 (HDPE) 膜和膨润土防水毯 (GCL) 因其极低的渗透系数、良好的柔韧性和便捷的施工特性, 被广泛用于堤身防渗层铺设, 有效替代了传统黏土防渗体。同时, 生态混凝土的研发与应用为护坡工程提供了新思路, 其多孔结构不仅具备足够的力学强度, 还能允许植物根系穿透生长, 实现工程防护与生态修复的双重目标^[2]。在注浆加固领域, 纳米改性水泥浆液通过掺入纳米二氧化硅或氧化铝, 显著提升了浆液的流动性、渗透深度和结石体强度, 特别适用于微细裂缝的封堵与土体固结。

2.2.2 绿色生态加固技术

绿色生态加固理念的兴起推动了植生混凝土、生态袋护坡及格宾网箱等复合结构的应用。这些技术将工程稳定性与植被恢复有机结合, 利用植物根系网络增强土体抗剪能力, 茎叶层则可消减波浪能量、减少雨水冲刷。例如, 在背水坡采用填充种植土的生态袋垒砌成缓坡, 既稳固了边坡, 又营造了良好的生态景观。更进一步, 部分项目尝试在堤后设置人工湿地缓冲带, 利用湿

地植物和土壤介质的滞蓄与净化功能, 在提升区域雨洪调蓄能力的同时, 改善水生态环境, 体现了从“硬质防御”向“柔性适应”的转变。

2.2.3 智能感知与预警技术

与此同时, 智能感知与预警技术的集成正深刻改变堤防安全管理模式。分布式光纤传感技术可沿堤全线布设, 实时监测温度、应变和振动信号, 精准识别渗漏点或结构异常; 合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 与无人机遥感则能大范围、高频次获取堤防表面形变信息, 弥补地面监测盲区。结合物联网平台, 各类传感器数据可汇聚至统一云平台, 构建“空-天-地”一体化的立体监测网络, 为险情早期识别与快速响应提供数据支撑。

2.3 数字化与智能化技术融合

数字化与智能化技术的深度融合, 正在重塑堤防工程的设计、施工与运维全过程。基于建筑信息模型 (BIM) 与地理信息系统 (GIS) 的集成平台, 可构建堤防三维数字底座, 整合地质勘探、水文气象、结构参数等多源异构数据, 支持加固方案的可视化比选与施工过程模拟, 显著提升设计精度与效率。在此基础上, 数字孪生堤防的概念应运而生——通过实时接入监测数据驱动虚拟模型动态演化, 不仅可复现当前工况, 还能基于水文预报进行多情景仿真, 预测潜在险情发展趋势, 为应急调度与抢险决策提供科学依据。人工智能技术的引入进一步增强了堤防风险管理的前瞻性。利用历史险情记录、实时监测数据及气象水文预报, 可训练长短期记忆网络 (LSTM)、随机森林等机器学习模型, 建立动态风险评估体系。该体系能够自动识别高风险堤段, 量化风险等级, 并生成分级预警信息, 实现从“经验判断”向“数据驱动”的转变。未来, 随着边缘计算与5G通信的发展, 堤防智能终端有望具备本地化分析与自主响应能力, 真正迈向“感知—分析—决策—执行”闭环管理的新阶段。

3 堤防工程可持续发展内涵与路径

3.1 可持续发展的多维内涵

堤防工程的可持续发展已超越单一防洪安全的范畴, 转而强调安全、生态、经济与社会价值的协同统一。安全性始终是核心底线, 要求堤防在设计洪水条件下保持结构完整与功能可靠; 生态性则强调最小化工程对河流自然形态、水文节律及生物栖息地的干扰, 促进水陆生态系统的连通与恢复; 经济性关注全生命周期成本最优, 避免因短期行为导致重复投资或高昂运维负担; 社会性则体现为提升公众安全感、改善滨水人居环境, 并通过开放共享的堤顶空间增强社区凝聚力。这四

个维度相互依存、相互制约,需在工程实践中寻求动态平衡。

3.2 全生命周期管理理念

推行全生命周期管理(LCA)是实现堤防可持续发展的关键路径。在规划阶段,应优先利用既有堤线,减少新增征地与生态扰动;设计阶段需综合考虑本地材料可用性、施工便捷性及后期维护需求,优选模块化、装配化结构形式;施工阶段推广干法作业与预制构件,降低能耗与碳排放;运行维护阶段则依托智能监测系统实施状态评估与预防性养护,延长工程服役寿命^[3]。通过贯穿“规划—设计—施工—运维—退役”各环节的系统性管控,可有效降低资源消耗与环境足迹,提升工程综合效益。

3.3 多目标协同优化框架

现代堤防工程日益承担起复合功能角色,需构建多目标协同优化框架以统筹多元诉求。以城市滨水堤防为例,可在确保防洪安全的前提下,通过缓坡设计、亲水平台、慢行步道等元素,将堤防融入城市公共空间体系。同时,结合海绵城市建设理念,在堤后绿地设置雨水花园、透水铺装等设施,增强区域雨洪调蓄与水质净化能力。这种“安全+生态+景观+休闲”的融合模式,不仅提升了工程的社会接受度,也创造了显著的生态与经济效益,实现了从“灰色基础设施”向“绿色基础设施”的功能跃迁。

3.4 制度与政策保障

技术创新的有效落地离不开健全的制度与政策支持。当前亟需修订完善《堤防工程管理规程》等技术标准,明确生态化、智能化堤防的设计参数与验收指标。在投融资方面,应鼓励采用政府和社会资本合作(PPP)模式,吸引社会资本参与长效运维^[4]。管理机制上,可推行“河长制”与“堤长制”联动,压实属地管理责任,形成跨部门协同治理格局。此外,加强公众参与亦至关重要,通过开展堤防安全科普、组织应急演练等方式,提升社区防灾意识与自救能力,共同筑牢水安全防线。

4 挑战与展望

尽管堤防除险加固技术取得长足进步,但仍面临多重挑战。现行技术标准体系尚未完全覆盖生态堤防、智能监测等新兴领域,导致设计与验收缺乏统一依据;水利工程与生态学、信息科学等学科的交叉融合仍显不足,制约了系统性解决方案的形成;部分项目存在“重建设、轻运维”倾向,智慧监测系统建成后因缺乏专业运维团队而沦为“摆设”;更为严峻的是,气候变化带来的水文不确定性日益加剧,传统基于历史频率的设计方法可能低估未来风险。面向未来,堤防工程发展应聚焦四大方向:一是构建更具韧性的工程体系,提升对超标洪水的适应与快速恢复能力;二是探索负碳技术路径,如应用固碳建材、在堤顶集成光伏发电设施等,助力水利行业“双碳”目标;三是深化人工智能与数字孪生融合,发展具备自主诊断、预测与调控能力的智能堤防系统;四是将堤防纳入流域尺度的“山水林田湖草沙”生命共同体进行系统治理,实现从局部加固到流域协同的范式升级。

5 结语

堤防工程除险加固已进入以技术创新驱动可持续发展的新阶段。本文研究表明,通过融合高性能材料、生态工法、智能感知与数字孪生等前沿技术,可显著提升堤防的安全性、生态性与经济性。未来应坚持“安全为本、生态优先、智慧引领、制度保障”的原则,推动堤防工程从单一防洪屏障向多功能复合型基础设施转型。唯有如此,方能在气候变化与高质量发展双重背景下,筑牢国家水安全防线,实现人水和谐共生的长远目标。

参考文献

- [1]姚文杰.水利工程中堤防除险加固质量控制[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(13):211-213.
- [2]刘浩.河道堤防应急除险加固工程施工管理问题探究[J].中华建设,2022,(01):98-99.
- [3]江东伟.河道堤防除险加固工程施工管控探究[J].江西建材,2019,(06):142+144.
- [4]周光椿.关于河道堤防除险加固工程的安全管理[J].长江技术经济,2020,4(S1):33-35.