

堰堤防冲刷破坏机理分析与加固技术研究

李欢 顾滨

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7071

[摘要] 堰堤防冲刷工程作为国家防洪减灾体系的核心屏障,其安全稳定运行对于保障人民生命财产安全、促进经济社会可持续发展具有不可替代的战略意义。然而,在日益频发的高强度洪水和复杂水文条件下,水流冲刷已成为导致堤防工程失稳破坏的首要因素。文章探讨了堰堤防冲刷工程在现代防洪体系中的核心重要性,并深入剖析水流动力侵蚀、土体抗冲性能劣化、渗透-应力耦合作用以及结构物周边局部冲刷主要的破坏机理。在此基础上,梳理和评述主流的冲刷加固技术的优化措施。

[关键词] 堰堤; 防冲刷破坏; 破坏机理; 加固技术; 生态护坡; 智能监测

中图分类号: U416.1+4 **文献标识码:** A

Mechanism Analysis of Scour Damage to Dams and Research on Reinforcement Techniques by

Huan Li Bin Gu

Northeast Water Resources Survey, Design and Research Co., Ltd.

[Abstract] Abstract: As the core barrier of the national flood control and disaster mitigation system, the safe and stable operation of weir and embankment anti-scouring projects holds irreplaceable strategic significance for safeguarding people's lives and property, as well as promoting sustainable economic and social development. However, under increasingly frequent high-intensity floods and complex hydrological conditions, water flow scouring has become the primary factor leading to the instability and destruction of embankment projects. This article explores the core importance of weir and embankment anti-scouring projects in the modern flood control system, and delves into the main destructive mechanisms of water flow dynamic erosion, soil anti-scouring performance deterioration, coupled seepage-stress effects, and local scouring around structures. Based on this, it reviews and evaluates the optimization measures of mainstream scouring reinforcement technologies.

[Key words] Weir; protection against scouring damage; Damage mechanisms; Reinforcement techniques; Ecological slope protection; Intelligent monitoring

引言

近年来,水利部相继批准发布了《堤防抢险技术导则》(SL/T832—2024)和《堤防工程施工规范》(SL/T260—2025)等一系列行业标准与技术导则,这标志着我国堤防工程在设计、施工、管理和抢险等方面的标准化、规范化水平迈上了新台阶。这些政策与标准的出台,体现国家对于提升堤防工程安全保障能力、推进水利基础设施现代化的坚定决心。堰堤作为江河防洪工程体系中关键的组成部分,其在洪水作用下的稳定性,特别是抗冲刷能力,关系到整个防洪系统的成败。水流冲刷是导致堤防溃决的最主要、最常见的致灾因素之一。

1 堤防工程在防洪体系中的重要性

堤防工程,作为人类与洪水抗争历史中最古老、应用最广泛

的水利设施,在现代综合防洪体系中依然扮演着不可或缺的核心角色。其重要性不仅体现在对洪水的直接阻挡,更深植于社会、经济和生态等多个维度,是国家长治久安的重要基石。

1.1 堤防工程是保障人民生命财产安全的首要屏障

我国人口密集,经济发达地区多集中在江河中下游的平原及三角洲地带,该地带地势低洼,历史上洪灾频繁,故而沿江湖库岸线修建堤防工程,被称为“水上长城”,用以把汹涌洪水约束于既定河道,保护堤后广大人民群众的生命安全、财产安全。但若堤防在洪水冲击下发生冲刷溃决,后果极其严重:数万人流离失所,经济损失不可估量,社会秩序亦将大乱。因此,一个坚固可靠、设计合理的堤防体系,实为社会安宁、人民安居乐业最基本、最根本的前提。

1.2 堤防工程是维护国家经济社会稳定发展的关键基础

堤防保护的对象绝不只是居民区,更主要是农田、工业园区、交通干线(铁路、公路)、能源设施(电厂、输油管线)、通讯网络等国民经济重要领域,诸类设施的安全都与国家粮食安全、能源安全、产业链供应链稳定有直接关系。坚固、完善的堤防体系本身就是相关地区经济活动最可靠的保障,也是吸引投资、促进产业集聚的有力诱因,是区域经济社会实现可持续发展的“压舱石”。堤防工程管理水平的高低,直接影响着防洪减灾的最终效果,进而影响整个区域的经济脉搏与社会秩序。

1.3 堤防工程是维系区域生态系统平衡与健康的重要载体

传统的堤防工程设计多注重防洪功能,有时会对河流的自然形态和生态系统造成一定程度的割裂。然而,随着现代水利理念的发展,堤防工程正被赋予更多的生态功能。通过采用生态护坡、构建滨水湿地、预留行洪区等方式,现代堤防工程不仅能有效防洪,还能为动植物提供栖息地,保护生物多样性,维持河流的纵向与横向连通性,促进水体自净。一个设计科学、管理得当的堤防体系,能够有效协调防洪安全与生态健康之间的关系,成为人水和谐共生的重要纽带,是构建健康长江、幸福黄河等生态文明建设目标的重要组成部分。

2 堰堤防冲刷破坏机理分析

2.1 水流动力侵蚀机理

当高速水流流经堤防坡面或堤脚时,其巨大的动能会转化为对土体的剪切力和脉动压力。水流的紊动和在堤防局部不平整处形成的涡流,会极大地增强水流的剥蚀能力。一旦水流作用在土体颗粒上的剪切应力超过了土体自身的临界抗剪强度,土颗粒就会开始脱离母体,被水流带走,形成冲刷坑。水流速度、水深、堤岸几何形状和流速紊动强度是控制该过程的关键水力因素。特别是在堤防的弯道段、束窄段或有建筑物存在的河段,水流结构更为复杂,动力侵蚀作用也更为剧烈。

2.2 土体材料劣化与抗冲性衰减机理

堤防本身的材料性质是其抗冲刷能力的基础,堤防填筑土体的颗粒级配、黏聚力、内摩擦角、干密度及含水率等物理力学参数决定其抗冲性能。具体而言,颗粒级配不良、细颗粒含量过高的土体抗剪强度低,容易被水流冲走。长期自然条件下堤防土体经历干湿循环、冻融循环作用,这些过程会破坏土体原有结构,产生裂缝,降低密实度和整体性,导致抗冲性能的严重衰减。形成恶性循环的是堤防坡面植被的退化及动物打洞等生物活动,二者都会局部破坏土体结构,成为冲刷的薄弱点。

2.3 渗透-应力耦合作用下的渐进破坏机理

高水位洪水时期堤内外有明显的水位差,水在压力梯度作用下向堤身内部渗透,渗透水流在土体骨架中流动时会产生指向下游的渗透压力,降低土体颗粒间的有效应力,降低土体的抗剪强度,削弱其稳定性。这种效应在堤防的背水坡脚附近尤为明显。当渗透力足够大时,甚至可能导致土颗粒被带出,形成“管涌”或“流土”现象,从内部掏空堤身。外部水流的冲刷作用与内部渗透作用相互耦合,加速破坏进程:外部冲刷使得堤坡

变陡,增加了失稳风险;内部渗透软化了土体,降低了其抵抗外部冲刷的能力,形成恶性循环。

3 堰堤防冲刷加固技术优化探索

3.1 土工袋主动防护,构筑韧性前移防线

近年来超标准洪水发生频率增加,传统土石堤坝背水坡的抗冲刷、渗透稳定能力都受到极大的考验,业内已从“被动抢险”转向“主动防御”,即把土工袋从传统的应急抢险材料转型升级为可预先铺设的永久性韧性防护结构。具体而言,先厘清土工袋材料与堤坝土体相互作用的机理,确定高水力梯度下土工袋的透水保土反滤效能及颗粒运移规律,据此制定针对不同堤坝土质“量身定制”的袋体选型准则,从材料源头就筑牢防渗透破坏的第一道防线。在此基础上,技术人员应借助物理模型及数值仿真技术对超标准洪水漫顶场景进行精确模拟,系统研究土工袋防护层在坡面高速水流拖曳下的变形特性及冲刷防护性能,寻找最优的袋体堆叠与组合方式,稳定结构形态以化解水流冲击。与此同时,通过优化土工袋加固体的断面形态与厚度等设计参数,研发“土工袋主动防护面+刚性排水槽”的复合韧性提升结构,配套“装-铺-压”一体化快速施工与质量检测工艺。为进一步提升应急决策的科学性,应集成高精度传感器、无人机视觉测流等多源监测手段,构建起堤坝漫顶实时感知与智能评估系统,实现对漫顶流态、坝体应力的自动化连续观测与数据智能分析,从而达成从加固设计到安全监测的全链条技术闭环,提升堤坝抵御洪水漫顶及冲刷破坏的内在能力

3.2 根石精准加固,稳固水下隐蔽根基

堤防根石是保护大堤的第一道防线,其稳固程度关系到工程抗冲能力的强弱。传统土石结构的护岸、护脚容易受水流冲刷影响,导致根石走失、坦坡失稳,技术优化应重点聚焦于水下根基的精准加固。对此,可用尼龙网兜配合传统石料对根石加以加固,利用尼龙网兜良好的弹性及韧性将水流冲力合理分散,从而防止石块移位,切实降低根石走失的风险,辅以长臂挖掘机吊起网兜石料抛投入水,让“新住户”安家于坝头之下。与此同时,水下抛石施工工艺中,针对抛石施工位置位于水中、受水流和水深及河床形态等多种因素影响的复杂环境,建议使用水下地形测绘船对原始地面进行精准测绘,并依托石块运输设备的GPS定位装置和计重系统,实时、精确地控制石块投放的位置及深度,提高抛石精度及工程质量。施工现场管理层面上,应进一步引入移动视频站实现实时远程监控,潜在问题能被及时发现、迅速处置,施工效率及安全性均获提升。对于需要更高强度加固的险工险段,引入钢筋混凝土钻孔灌注桩作为堤岸加固的核心手段,通过对比多种刚性加固措施,综合考虑实用性与环保性,设计出兼顾抗冲刷性和倾覆稳定的护根排桩构型,为促进游荡性河道河势归顺、塑造适应多种流量的主槽提供可行方案。

3.3 复合桩墙成体,破解复杂地质难题

在软土深厚、渗透性极高的地质条件下进行堤防加固,实质上就是在“豆腐块”上筑起安全屏障,为破解这一难题,可引入高压旋喷桩施工工艺,针对传统旋喷钻头在高渗透性土壤中导

致水泥浆大量流失、在硬粘土层中成桩直径忽大忽小的痛点,研发半搅拌式高压旋喷桩钻头,通过在钻头两侧焊接钢质搅拌叶片,使其在钻进过程中对喷头周围土壤进行原位搅拌,先破坏土体结构以减少高压射流阻力,使固化剂能与土壤更加均匀地拌合,形成稳定的固体桩体。在此基础上,进一步对施工模式进行变革,通过与BIM技术深度融合,建立三维地质模型,根据不同区段的土质特点提前规划钻头类型和施工参数,形成“一段一策”的精准施工,使单桩施工效率大幅提升,减少水泥浆消耗。在地下隐蔽工程施工中,面对晦涩的设计图纸和复杂的结构形式,技术团队可通过BIM技术将设计图纸建模翻样,再结合3D打印技术制作实体沙盘,使施工内容、结构关系及成品效果一目了然,可视化技术交底让技术人员和工人师傅掌握技术重点与质量控制要点。针对堤防受洪水严重冲刷的险工段,建议采取双排刚性防冲墙的创新工艺,这种设计使防冲墙在洪水冲刷带走前方土体的情况下,依然能保持自身结构稳定,同时在墙体前方埋设由高镀锌铅丝石笼组成的各塌体,形成“刚柔并济”的防洪结构,在洪水冲刷时可有效抵御刚性结构前方的局部冲刷,为堤防安全提供双重保障。

3.4 装配式结构创新, 兼顾防洪生态景观

随着水利工程理念从单一的防洪保安向生态友好与空间复合转变,堤防加固技术也在材料与形式上不断推陈出新。在解决堤防防洪不达标问题的过程中,装配式结构因其施工便捷、与景观融合度高等优势得到推广应用。建议采用玻璃防浪墙、铝合金装配式防浪墙、挡水花池防浪墙等多种模式,在满足防洪要求的同时实现与城市景观的高效融合。其中,装配式防浪墙采用可移动、可拆卸的设计,地下打好地桩后,立柱安装上,铝合金挡板可快速装配于两柱之间,平时将挡板存放于库房,地面与地桩持平,既保障非常情况下的应急之需,又最大限度地减少对市民游憩活动的影响。在护坡技术领域,可尝试引入新型浆砌不露浆护坡技术,该技术通过精准选材与分层错缝砌筑工艺,配合高粘结性生态砂浆,促进石料内部的无缝咬合,杜绝传统工艺中砂浆外溢流失的问题,在增强结构整体性的同时预留植被孔洞,为生态修复创造条件。为强化堤防的长期稳定性,还可以在护岸顶部设计生态花坛,采用透水性良好的砖块围边,缓解强降雨时的地表

径流压力,通过植物根系固土减少护坡底部的冲刷风险。对于传统堤防护坡,蜂格护坡加固技术的应用则通过有限元法计算分析堤防抗滑稳定安全系数,综合考虑培厚、加高、坡比优化等因素,形成行之有效的加固方案,在提升抗冲能力的同时兼顾了工程的经济性与生态性。

4 结束语

综上,堰堤防冲刷工程是一个由多种内外因素共同驱动的复杂过程。对其机理的深刻理解是科学防治的基础。而相应的加固技术,经历从单纯依靠“硬抗”的传统工程手段,向融合新材料、生态学和信息技术现代化、系统化解决方案的演进。

面对气候变化带来的不确定性挑战,我国的堤防工程建设与管理必须与时俱进。未来的发展方向是:在技术上,要大力推进生态护坡等绿色技术与传统技术的有机结合,并积极拥抱分布式光纤传感、人工智能等前沿科技,构建“感知-预警-决策-处置”一体化的堤防智慧管理体系;在理念上,要摒弃“重建设、轻管理”的旧观念,树立全生命周期的风险管理理念,将精细化、标准化的日常养护与及时的除险加固并重;在策略上,要坚持流域系统治理的观点,将堤防工程置于整个江河生态系统中考量,实现防洪安全、供水安全与生态安全的统筹协调。

【参考文献】

- [1]杨兆鹏,刘虎,黄玉恒.黄河山东段堤防工程无损检测技术集成应用[J].长江工程职业技术学院学报,2026,43(01):23-26.
- [2]于文华.堤防工程施工期临时防汛结构应用总结思考[J].水利技术监督,2026,(04):259-262.
- [3]李勇.防洪治理工程堤防渗流稳定分析[J].陕西水利,2026,(02):73-76.
- [4]张啸,张昊.水利工程河道堤防护岸施工技术研究[J].流体测量与控制,2026,7(01):84-86.
- [5]戴康,俞琳娜,崔祥文.黄河下游堤防工程中土石结构稳定性影响[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(04):220-222.

作者简介:

李欢(1980—),男,汉族,湖北省鄂州市人,本科,高级工程师,水利水电工程水工结构勘察设计。