

河道护岸局部冲刷机理分析与影响因素研究

杜云皓 朱宇泽 陈怀民
淮安市水利勘测设计研究院有限公司
DOI:10.32629/etd.v7i1.22206

[摘要] 河道护岸工程是防洪体系的重要组成部分,局部冲刷导致的护岸破坏是威胁河道安全的主要隐患。本文系统分析了河道护岸局部冲刷的物理机理与核心影响因素,从水流结构、泥沙运动、护岸形态和河床边界条件四个层面揭示了冲刷的成因与演化规律。不同河道工况下冲刷机理差异显著,弯道横向环流与边界突变的漩涡掏蚀破坏力最强;冲刷深度受水流强度、床沙粒径和护岸几何形态的耦合控制,多因素叠加可产生显著的放大效应。据此提出了涵盖水流调控、土体加固、结构优化和边界整治的系统性防控技术体系,为河道护岸工程抗冲设计与病害治理提供理论依据。

[关键词] 河道护岸; 局部冲刷; 水动力学机理; 泥沙运动; 影响因素; 防控技术

中图分类号: TV87 **文献标识码:** A

Analysis of the Mechanism and Influencing Factors of Local Scour in Riverbank Protection

Yunhao Du Yuze Zhu Huaimin Chen

Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] Riverbank protection projects are an important component of flood control systems, and damage to bank protection caused by local scour is a major potential threat to river safety. This paper systematically analyzes the physical mechanisms and key influencing factors of local scour along riverbank protection structures and reveals the causes and evolution patterns of scour from four perspectives: flow structure, sediment movement, bank protection morphology, and riverbed boundary conditions. Significant differences exist in scour mechanisms under different river conditions. The transverse circulation in bends and vortex-induced scour caused by abrupt changes in boundary conditions exhibit the strongest destructive effects. Scour depth is jointly controlled by the flow intensity, bed sediment particle size, and geometric configuration of the bank protection structure, while the superposition of multiple factors can produce significant amplification effects. Accordingly, a systematic prevention and control technology framework encompassing flow regulation, soil reinforcement, structural optimization, and boundary improvement is proposed, providing a theoretical basis for erosion-resistant design and defect management of riverbank protection projects.

[Key words] riverbank protection; local scour; hydrodynamic mechanisms; sediment movement; influencing factors; prevention and control technologies

引言

河道护岸工程是保障防洪安全、控制河势演变和保护岸坡稳定的关键设施,其安全运行直接关系到沿岸人们生命财产和经济社会可持续发展。护岸局部冲刷涉及水流动力、泥沙运动和结构相互作用三个层面的复杂耦合过程,其机理认识尚不充分,影响因素众多且交互关系复杂,现行设计主要依赖经验公式估算冲刷深度,对冲刷机理的系统把握和影响因素的量化分析仍有较大提升空间。本文从冲刷机理和影响因素两条主线出发,系统梳理护岸局部冲刷的物理过程与演化规律,识别关键控制因素,并提出针对性防控对策,以期对护岸工程的抗冲设计与安

全运维提供理论支撑。

1 河道护岸局部冲刷概述

1.1 局部冲刷核心定义

河道护岸局部冲刷是指水流受边界条件突变干扰,近岸水流结构发生畸变,形成局部高速流、漩涡流与紊动剪切流,在护岸坡脚、岸坡表层及结构衔接处等特定区域产生的泥沙剥离、土体掏蚀和河床下切现象。该冲刷形式具有区域性强、发育速度快、累积破坏性大的特点,冲刷范围集中在护岸基础及近岸河床区域,极易造成基础悬空、坡面开裂和整体滑移坍塌,是护岸工程最主要的病害类型。相较均匀冲刷,局部冲刷无固定规律,受

河道形态、水流状态和护岸形式影响大，隐蔽性与突发性强，日常运维难以预判，对防洪安全和岸线稳定威胁突出。

1.2 局部冲刷破坏典型特征

护岸局部冲刷破坏可归纳为三类。一是坡脚掏蚀破坏，最为普遍，高速水流持续淘刷基础土体形成冲刷坑，导致基础埋深不足、局部悬空，引发结构倾斜沉降。二是坡面冲蚀破坏，紊动水流冲击坡面，冲刷表层防护与覆土，造成生态护坡土体流失、硬质护坡勾缝掏空，逐步形成空洞裂缝。三是结构衔接冲刷破坏，新旧护岸交接处或护岸与闸坝桥墩衔接处水流突变，产生回流漩涡集中冲刷薄弱区域，形成冲刷沟槽，最终导致结构断裂失效。总体而言，局部冲刷呈现“先局部后整体、先隐蔽后显性”的渐进式破坏特征^[1]。

1.3 局部冲刷发育阶段划分

护岸局部冲刷发育可分为三个阶段。第一阶段为初始启动阶段，水流剪切力超过土体或泥沙起动临界值，表层松散颗粒率先流失，冲刷范围小、深度浅，无明显病害，属于隐蔽性损伤。第二阶段为快速扩展阶段，表层流失后紊动增强，漩涡流持续掏蚀深层，冲刷坑加深扩大，基础逐步裸露，坡面出现细微裂缝，稳定性明显下降。第三阶段为失稳破坏阶段，冲刷坑触及核心受力区域，掏空范围超承载极限，水流冲击与自重作用下结构发生滑移、坍塌或断裂，形成不可逆病害，严重影响行洪与岸坡安全。

表1 护岸局部冲刷各阶段发育特征

阶段名称	核心特征	冲刷现象	病害表现	稳定性评价
初始启动阶段	剪切力超临界值	表层松散颗粒流失	冲刷范围小、深度浅	结构稳定，隐患隐蔽
快速扩展阶段	漩涡流持续掏蚀	冲刷坑加深扩大	基础逐步裸露，坡面裂缝	稳定性明显下降
失稳破坏阶段	超承载极限	坑体贯通	滑移、坍塌、断裂	结构失稳，不可逆

2 河道护岸局部冲刷动力学机理分析

2.1 平直河道护岸冲刷机理

平直河道水流整体流线平顺，护岸冲刷主要由近岸紊动剪切作用引发。水流脉动产生的随机流速波动形成紊动剪切应力，当该应力超过土体黏聚力与摩擦力时，表层颗粒起动流失。同时，床面粗糙与护岸平整度差异诱发局部次生紊流，长期作用下细微缺陷持续累积，形成浅层冲刷沟槽。平直河道冲刷强度整体较弱、速度缓慢，但具有全域持续性特点，长期作用导致坡面均匀磨损和坡脚缓慢下切，虽不瞬时引发结构破坏，但持续降低护岸使用寿命与安全储备。

2.2 弯曲河道护岸冲刷机理

弯曲河道是局部冲刷高发区，机理以横向环流与斜向冲击耦合为主。水流经弯道时离心力使主流向凹岸偏移，表层水流斜向冲击凹岸坡面，同时表层流与底层回流形成封闭横向环流，表

层冲刷凹岸、底层携沙向凸岸搬运。凹岸坡脚底层回流流速最大，持续掏蚀基础，快速形成深大冲刷坑。弯道曲率越大、流速越高，环流越强、冲刷越烈。多数弯道护岸坍塌源于凹岸坡脚的持续性环流掏蚀，是冲刷治理的重点难点^[2]。

2.3 河道边界突变处冲刷机理

河道断面突变、护岸衔接、水工建筑物交界等边界突变处，水流结构剧烈畸变，核心机理为水流分离与漩涡掏蚀。水流流经突变位置时流线被迫收缩偏转，分离区内形成大量漩涡，其强紊动能与负压吸附持续卷吸搬运土体，快速形成冲刷坑。同时断面收缩使局部流速突增，水流剪切力大幅提升，加速土体流失。边界突变区冲刷突发性强、发育快、深度大，是护岸基础悬空和结构破损的核心高发位置。

2.4 泥沙起动与冲刷演化机理

局部冲刷本质是水流动力与土体抗冲能力动态博弈的泥沙运动过程。当近岸瞬时剪切力超颗粒起动临界值时，泥沙脱离土体骨架进入悬浮推移状态。初始仅松散细颗粒流失，骨架完整；持续冲刷使孔隙增大、结构松散，渗流增强、细颗粒持续流失，抗剪强度与整体性大幅下降。冲刷坑形成后紊动放大、能量集中、速率提升，形成“冲刷坑—水流强化—再冲刷”的恶性循环，直至水流动力与土体抗冲及淤积能力达动态平衡，冲刷坑才趋于稳定。

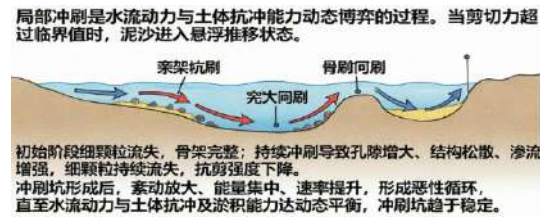


图1 局部冲刷正反馈演化机制流程图

3 河道护岸局部冲刷核心影响因素研究

3.1 水力水文因素

水力水文因素是诱发冲刷的主动力，决定冲刷强度与速率，核心包括流速、流态、流量和水流夹角。流速为最关键因子，冲刷深度与流速呈幂函数正相关，汛期高速水流是冲刷快速发育的主时段。流态直接影响冲刷形态，紊流、环流、回流和斜向流的破坏能力远强于平顺层流，漩涡流掏蚀是坡脚悬空的核心诱因。流量变幅越大，反复冲击与剪切加剧土体疲劳破损，降低抗冲性能。

3.2 岸坡岩土因素

岩土体性质决定土体抗冲能力，为核心被动因素，包括土体类型、密实度、抗剪强度和地层结构。砂土黏聚力极低，抗冲流速仅0.2~0.5m/s，极易流失；黏壤土抗冲流速0.5~1.0m/s；密实黏土可达1.0~1.5m/s，抗冲最优。密实度越低、孔隙率越高，整体性越差，水流易渗入引发颗粒崩解。若岸坡存在软弱夹层、透水层或松散填土等薄弱区域，冲刷优先发育形成沟槽空洞，复合地层岸坡冲刷风险可比均质岸坡提升2~3倍。

3.3 护岸结构因素

护岸结构形式、防护厚度、施工质量和完整性是控制冲刷的人工核心因素。浆砌石和混凝土硬质护岸整体性强、抗冲流速高,但刚性大、适应变形差,基础掏空后易整体断裂。格宾石笼和生态护岸柔性好,但表层强度低,高速水流下易覆土流失、骨料松散。勾缝不密实、基础埋深不足、衔接错位、厚度不均等施工缺陷会形成防护薄弱区,成为冲刷突破口。

3.4 河道形态与边界因素

河道平面形态、断面尺寸和河床糙率决定近岸水流运动规律与能量分布,间接调控冲刷位置与强度。河道弯曲度越大,凹岸环流冲刷越显著;顺直河道冲刷均匀、强度偏低。断面宽窄交替和深浅突变区域,水流急剧收缩扩散,紊动能集中,易诱发高强度冲刷。河床糙率过低使近岸流速偏大、冲刷增强;糙率过高则壅水形成回流漩涡,加剧局部掏蚀^[3]。此外,河道疏浚、岸线改造和涉水建设等人为工程会改变原有边界,打破水沙平衡,诱发新增冲刷病害。

4 局部冲刷防控优化技术与工程对策

4.1 水流动力调控技术

针对水流紊动、环流、局部高速冲击引发的冲刷问题,采用水流调控措施优化近岸水流结构,从源头削减冲刷动力。在河道弯道、断面突变等冲刷高发区域,布设导流墩、导流堤、消力槛等水工设施,引导水流平顺过渡,削弱横向环流与斜向冲击作用,分散局部集中水流能量。通过优化河道断面形态,实现断面渐变过渡,避免水流急剧收缩扩散,降低水流紊动强度。适度调整河床与岸坡糙率,在高速冲刷区增设粗糙防护层,消耗水流动能,降低近岸水流流速,抑制泥沙起动。水流调控可从根本上改善不良水流形态,减少局部高能水流区域,有效降低冲刷发育动力,适用于各类河道冲刷病害防控。

4.2 岸坡土体加固技术

针对岸坡土体松散、抗冲能力弱的问题,通过土体加固提升岸坡整体稳定性与抗冲性能。对于松散砂土、杂填土岸坡,采用注浆加固、换填压实技术,填充土体空隙,提升土体密实度与黏聚力,增强土体抗剪强度与抗冲刷能力。针对存在软弱夹层的岸坡,采用分层换填、地基夯实工艺,彻底清除软弱土层,替换抗冲性能优良的砂砾、黏土混合料,重塑稳定岸坡基底。同时,在岸坡表层铺设土工布、土工格栅等加筋材料,约束土体颗粒位移,防止细颗粒流失,提升岸坡整体性^[4]。

4.3 护岸结构优化与防护强化

结合不同河段水流工况,差异化优化护岸结构形式,强化薄弱区域防护能力。弯道、洪水主流区等强冲刷区域,优先采用混

凝土、浆砌石等高强度硬质护岸,加深基础埋深,杜绝基础掏蚀悬空,严格控制施工质量,保证结构衔接密实、坡面平整,消除防护薄弱区。平直河道、生态河段采用格宾石笼、生态砌块、植被护坡等柔性结构,兼顾抗冲性能与生态效益,通过柔性结构消能缓冲水流冲击。同时建立护岸常态化运维机制,及时修复破损裂缝、掏空区域,避免小范围冲刷缺陷持续扩展,保障护岸结构完整性与防护长效性。

4.4 河道边界形态优化治理

优化河道整体边界形态,重塑平顺水沙运动环境,规避边界突变引发的局部冲刷。对宽窄不均、弯曲紊乱的河道进行规整治理,平滑河道岸线,减小局部弯曲度,消除水流突变条件。整改断面急剧变化河段,采用渐变式断面过渡,保证水流流线平顺,减少水流分离与漩涡产生。规范河道疏浚、采砂、整治工程施工,避免人为破坏原有河道水沙平衡,严控疏浚深度与范围,防止河床过度下切导致近岸流速激增^[5]。

5 结束语

本文系统阐释了不同河道工况下护岸局部冲刷的水动力学机理,厘清了平直段、弯道段、边界突变段差异化冲刷破坏规律,明确了泥沙起动、坑体扩展、结构失稳的渐进式演化机制。从水力水文、岩土体特性、护岸结构、河道形态四个维度,量化分析了单一因素及多因素耦合作用对局部冲刷的影响规律,揭示了冲刷病害的核心诱因与放大机制。局部冲刷是水、土、结构、边界协同作用的结果,多因素耦合是病害加剧的关键。后续可结合数值模拟与模型试验,精准量化各因素敏感度,为河道护岸精细化设计与病害治理提供更精准的技术支撑。

【参考文献】

- [1]游婵林,余振.茆勒河道生态型护岸工程构建的实施方案分析[J].珠江水运,2026(2):148-150.
- [2]周银军,邓彩云,郭超,等.长江中下游干流河道崩岸系统防治技术探讨[J].中国水利,2025(22):52-60.
- [3]乔红杰,陈雪梅,张菁,等.水沙变化条件下长江澄通河段河道演变特征及趋势分析[J].水利水电快报,2025,46(5):14-21.
- [4]杨槩,王文仲,包敏.新生洲汉道河势演变对导流坝冲刷影响性分析[J].水利建设与管理,2025,45(12):45-53.
- [5]陈传辉,朱岩,孙启星.城市内河河道重力式挡土墙检测评估方法应用研究[J].浙江水利科技,2021,49(4):40-44.

作者简介:

杜云皓(1993--),男,汉族,江苏人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:水利工程。