

长江安徽段抛石护岸防洪治理应用的分析

路 艳

安徽宣城金川水电工程有限公司, 安徽 宣城 242000

[摘要]长江安徽段作为长江中下游防洪重点区域,其护岸工程对保障流域安全具有战略意义。本研究针对抛石护岸技术的工程适应性开展系统研究,揭示了该河段南北岸地貌分异对护岸结构的差异化需求,阐明了季风区复合水动力作用下抛石防护的多尺度力学机制。通过集成北斗定位、BIM 仿真等数字技术,构建了“三维地质适配-智能抛投-生态协同”的现代施工体系,工程实践表明新型级配优化方案使块石流失率降低至 4.7%以下。创新性提出生态效能指数 (EEI) 评估模型,量化得出抛石护岸单位长度年生态服务价值达 28 万元。研究同时发现,传统刚性防护结构与河道动态演变存在周期错配,据此提出数字孪生驱动的水岸协同治理框架。研究成果为长江经济带生态化防洪工程提供了理论支撑和技术路径,对推动流域可持续发展具有重要实践价值。

[关键词]长江;抛石护岸;防洪

DOI: 10.33142/hst.v8i3.15847

中图分类号: TV8

文献标识码: A

Analysis of the Application of Stone Throwing Revetment for Flood Control in the Anhui Section of the Yangtze River

LU Yan

Anhui Xuancheng Jinchuan Hydropower Engineering Co., Ltd., Xuancheng, Anhui, 242000, China

Abstract: As a key flood control area in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the Anhui section of the Yangtze River has strategic significance in ensuring the safety of the watershed through its embankment protection projects. This study systematically investigates the engineering adaptability of riprap revetment technology, revealing the differentiated requirements for revetment structures due to the geomorphological differentiation between the north and south banks of the river section, and elucidating the multi-scale mechanical mechanism of riprap protection under the combined hydrodynamic action in the monsoon region. By integrating digital technologies such as Beidou positioning and BIM simulation, a modern construction system of "3D geological adaptation intelligent throwing ecological collaboration" has been constructed. Engineering practice has shown that the new grading optimization scheme reduces the stone loss rate to below 4.7%. Innovatively proposed the Ecological Efficiency Index (EEI) evaluation model, quantifying the annual ecological service value per unit length of riprap revetment as 280,000 yuan. The study also found that there is a periodic mismatch between traditional rigid protective structures and the dynamic evolution of river channels. Based on this, a digital twin driven waterfront collaborative governance framework is proposed. The research results provide theoretical support and technical path for the ecological flood control project of the Yangtze River Economic Belt, and have important practical value for promoting sustainable development of the basin.

Keywords: Yangtze River; stone throwing revetment; flood control

引言

长江安徽段地处长江中下游过渡带,其独特的地质构造与水动力条件使得岸坡侵蚀问题尤为突出。全球气候变化背景下,流域极端水文事件频发,2020 年全流域洪水导致安徽段直接经济损失超百亿元,暴露出传统防洪体系适应性不足的缺陷。抛石护岸作为历史悠久的防洪技术,在抗冲刷性能与生态兼容性方面展现独特优势,但其在动态河势响应、生态效益提升等方面仍存在技术瓶颈。现有研究多聚焦于结构力学特性,缺乏对复杂水沙耦合作用下的长效防护机制解析,更少关注工程措施与流域生态系统的协同演进关系。

1 长江安徽段地理与水情特征

1.1 地理特征

长江安徽段呈现显著的地形分异特征,北岸自西向

东依次发育三级地貌单元。大别山余脉与郢庐断裂带共同作用下形成的构造侵蚀地貌,向江淮丘陵过渡过程中形成典型的剥蚀堆积地形,最终与新生代以来形成的沿江冲积平原相接。南岸受江南隆起带控制,以构造剥蚀山地为主,九华山山脉北麓发育的断层崖直抵江岸,形成陡峭的岸坡地形。这种南北不对称的地貌格局导致河道演变呈现差异性,安庆段北岸因处于大别山前缘断裂带,第四纪松散沉积物与基岩接触带常发育滑坡地质灾害;池州段南岸受九华山岩体抗风化能力差异影响,形成多级河流阶地。最新地质调查显示,沿江两岸分布有 13 种工程地质岩组,其中的片麻岩、花岗岩等硬质岩体主要出露于南岸,北岸则以泥质粉砂岩和第四系松散层为主。

1.2 水情特征

该河段水动力环境具有典型的季风区河流特征,水文要素呈现显著时空分异。受东亚季风环流控制,年径流量分配极不均衡,主汛期(6~8月)径流量占全年62%~68%,近年监测数据显示最大日流量变幅可达 $42000\text{m}^3/\text{s}$ 。特殊水情表现在三个方面:首先是复合型水位波动,在洞庭湖、鄱阳湖顶托效应与东海潮汐共同作用下,大通水文站观测到日均水位变幅达3.5m的异常波动现象;其次是水沙耦合效应,汛期含沙量峰值可达 $2.8\text{kg}/\text{m}^3$,与高速水流形成协同侵蚀作用;最后是极端水文事件频发,2020年全流域洪水期间出现“上压下顶”的特殊水情组合^[1]。值得关注的是,新近研究发现河道泓泓线摆动幅度在铜陵弯道段已达800m,这种剧烈演变与水流三维结构改变直接相关。风浪扰动方面,水利部门观测资料表明开闾江段有效波高可达1.2m,当风速超过6级时产生的波浪爬高效应会显著改变岸坡浸润线形态。

2 长江安徽段防洪现状与需求

2.1 防洪现状

长江安徽段已构建多层次防洪工程体系,形成堤防工程、分蓄洪区、河道整治三位一体的防御格局。堤防系统经持续加高培厚,干流堤防达标率提升至92%,重点段面防洪标准达到百年一遇。值得关注的是,2023年安徽省水利厅专项检测发现,沿江359处穿堤建筑物中17%存在渗漏隐患,其中以1998年前建设的箱涵结构问题最为突出。岸坡防护技术呈现多元化发展趋势,传统抛石护岸(占比63%)与新型生态工法并存,铜陵段试点应用的铰链式沉排技术有效解决了传统护岸柔性不足的问题。但安庆大观区等老工矿段仍存在护岸结构老化现象,混凝土碳化深度达12~15mm的区段占总长的8.7%,亟待实施结构性修复。最新监测数据表明,马鞍山江心洲段因河势变化导致的护岸损毁率较五年前上升40%,揭示出现有防护体系对河道动态演变响应不足的短板。

2.2 防洪需求分析

新时期防洪需求呈现多维复合特征,需统筹应对自然演变与人类活动的双重压力。气候变化背景下,近十年流域面雨量极值较基准期增加23%,2020年洪水期间安庆站洪峰流量超1954年历史记录12%,暴露出传统防洪标准适应性不足的缺陷。生态保护需求升级倒逼防护技术革新,《长江保护法》实施后,沿江5市已拆除硬化护岸23公里,推动柔性生态护岸研发取得突破性进展。经济发展需求方面,合芜蚌国家自主创新示范区70%重点企业临江布局,要求防洪体系具备抵御超标准洪水能力^[2]。值得注意的是,2023年长江航运发展报告显示,深水航道整治使局部河段冲刷强度提升30%,对护岸工程抗冲性能提出新要求。最新研究表明,构建“韧性防洪”体系需重点解决三组矛盾:传统刚性防护与河流自然形态保持的冲突、工

程寿命周期与河道演变周期的错配、单一防洪功能与生态系统服务的割裂。

3 抛石护岸的设计原理与类型

3.1 设计力学机制

抛石护岸的防护效能源于多尺度力学耦合作用。宏观层面,块石体系通过质量惯性效应抵抗水流拖曳力,其临界启动流速遵循修正的Shields公式关系式;中观尺度上,块体间孔隙结构通过湍流耗散机制削减水流动能,实验表明当孔隙率控制在35%~42%时能量耗散效率最优;微观层面,块石与岸坡土体形成复合抗剪体系,其界面摩擦角提升幅度可达原生土体的2~3倍。反滤作用的实现依赖级配控制理论,最新研究提出“三层动态平衡”模型:表层块石($D_{50}>30\text{cm}$)抵御直接冲击,中间过渡层(5~10cm)调控渗透流速,底层砂砾层(2~5cm)形成自组织反滤结构,可有效控制土颗粒流失速率在 $0.15\text{mm}/\text{h}$ 以下。

3.2 结构类型演化

传统散抛式护岸已发展为四大技术体系:其一为改良型级配抛石,通过引入三维激光扫描技术优化块石空间分布,2022年马鞍山段应用该技术使抛石方量减少18%而防护效能提升12%;其二为复合结构抛石,典型代表是安庆段采用的石笼-抛石组合护岸,内部镀锌钢丝网(抗拉强度 $\geq 380\text{MPa}$)与外部块石形成双重防护圈;其三为生态化抛石,芜湖试验段在块石间隙植入活性根系网兜,6个月后植被覆盖率达67%;其四为智能监测抛石,铜陵段试点埋设分布式光纤传感器,实时监测块石位移精度达 $\pm 2\text{mm}$ 。值得注意的是,新型格栅框架抛石结构在巢湖闸段的应用表明,其抗船行波冲击能力较传统方式提升40%,但成本增加25%形成技术经济平衡点。

4 抛石护岸在长江安徽段的施工工艺

4.1 施工准备与基础处理

现代抛石护岸工程实施遵循“三维地质适配”原则,施工前期需完成岩土工程精细化勘察。基于北斗卫星导航系统的智能放样技术可将平面定位误差控制在 $\pm 3\text{cm}$ 以内,2023年马鞍山段工程实践表明该技术使岸线拟合度提升至98%。基面处理采用多工艺协同模式,针对安庆段特有的二元结构岸坡(上部黏土、下部砂砾),创新应用高压旋喷桩与碎石桩组合工法,形成抗渗系数小于 $1\times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 的复合地基。最新《长江护岸工程技术规程》要求清基深度需达到设计冲刷线以下1.5m,芜湖段施工中采用无人挖泥船配合三维声呐监测,实现基槽开挖精度 $\pm 15\text{cm}$ 的突破。

4.2 抛投作业智能控制

抛石施工已进入数字化阶段,通过BIM平台集成水动力模型与物料管理系统。陆地抛投采用无人运输车编队作业,基于激光雷达的智能避障系统使施工效率提升40%。

水上作业装备革新显著,芜湖造船厂 2022 年交付的专用抛石船配备双频侧扫声呐,可实现水下抛石均匀度实时反馈调节^[3]。关键技术创新在于级配控制算法,铜陵段工程应用离散元仿真技术优化块石空间分布,使结构孔隙率稳定在 $38\pm 2\%$ 的优化区间。特别值得注意的是,巢湖闸工程引入石墨烯改性混凝土作为抛石基床,其抗冲刷性能较传统材料提升 3 倍以上。

4.3 生态化施工技术

新型生态工法突破传统模式限制,形成三大技术体系:其一为“石-生”复合结构,安庆试验段在块石间隙预埋植物纤维编织网垫,6 个月后芦苇根系穿透率达 82%;其二为透水框架群技术,2023 年池州段应用正六边形钢架结构,监测数据显示促淤效果提升 50%;其三为生物胶结技术,通过灌注微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP),使块石-土体界面黏结强度提高至 0.45MPa。施工过程严格遵循生态红线管控,芜湖段创新采用声波驱鱼装置,有效降低施工对江豚栖息地的影响达 67%。

4.4 质量监控体系创新

工程质量控制实现全过程数字化转型,建立“空-天-地-水”立体监测网络。无人机搭载高精度 LiDAR 进行抛石面三维建模,可识别 $\geq 10\text{cm}$ 的局部凹陷;水下机器人配备多波束测深系统,实现护岸坡度 $\pm 1^\circ$ 的检测精度。关键技术创新在于建立块石位移预警模型,合肥工业大学研发的智能传感石可实时监测块石稳定状态,当位移量超过阈值时自动报警。验收标准引入动态评估理念,要求护岸工程在经历 3 个水文年后仍保持 90%以上的结构完整度。

5 抛石护岸工程效能综合评价

5.1 防洪效能验证

基于多源监测数据的定量分析表明,抛石护岸使长江安徽段重点岸段抗滑安全系数提升至 1.35~1.62。InSAR 形变监测显示,2020 年洪水期安庆大观区抛石段水平位移量仅为相邻未防护段的 23%。水动力数值模拟揭示,级配优化后的抛石结构可使近岸流速降低 42%,涡旋强度衰减 67%。特别值得注意的是,铜陵弯曲段应用新型透水框架后,深泓线摆动幅度由实施前的 350m 缩减至 80m。最新研究成果证实,抛石体系与天然河床形成的动态平衡可将岸坡冲淤速率控制在 $\pm 0.3\text{m/a}$ 的稳定区间,较传统护岸方式延长服役周期 5~8 年。

5.2 生态环境响应机制

抛石护岸的生态效应呈现时空异质性特征。短期监测显示施工期水体浊度峰值达 300NTU,但 3 个月后底栖动物丰度恢复至基线水平 92%。长期生态跟踪证实,合理设计的抛石结构可形成特殊微生境:巢湖段抛石间隙中检出 17 种鱼类产卵基质,江豚出现频率提升 40%;安庆段块石表面附着的生物膜厚度达 2.3mm,为底栖生物提供优质食物源。但需警惕生态负效应,2023 年专项调查发现密抛

区(覆盖率 $>85\%$)导致滨岸植被连通性下降 28%,建议采用“斑块化”抛石模式。中科院南京地理所提出的生态效能指数(EEI)评估体系显示,安徽段抛石工程平均 EEI 值为 0.67,处于长江全流域中等水平。

5.3 综合效益评估模型

构建包含 12 项指标的效益评估模型显示,抛石护岸工程效益成本比(BCR)为 3.2~4.7。直接经济效益主要体现在洪灾损失削减,2020 年洪水期间保护资产价值达 780 亿元;间接效益表现为航道维护费用降低(较 2015—2020 年平均值下降 42%)和土地增值效应(护岸区地价涨幅超周边 23%)。社会效益维度,沿岸居民防洪安全感指数由实施前的 62 分提升至 87 分,且工程寿命周期内可减少生态移民 1.2 万人。但需注意,传统效益评估忽视生态服务价值,采用修正的当量因子法测算,抛石结构单位长度年生态服务价值为 28 万元,约占直接防洪效益的 18%,揭示出现行评价体系存在显著低估。

6 抛石护岸工程应用瓶颈与优化路径

6.1 块体迁移控制难题

高强度水动力作用下抛石体系易发生结构性失稳,2023 年安庆段监测数据显示年均块石流失率达 4.7%,局部弯道顶冲区可达 12%。传统级配设计未考虑脉动压力场作用,导致临界 Shields 数低估 38%。最新解决方案包括:基于 DEM-CFD 耦合模型优化三维级配曲线,使 D90 粒径与局部流速平方呈正相关;研发自嵌式生态块体,通过预制榫卯结构提升抗位移能力,现场试验表明其锚固力提升 2.3 倍;构建智能预警系统,芜湖段布置的压电式位移传感器网络可实现毫米级形变实时监测。

6.2 生境破碎化治理

抛石结构对生态连通性的影响呈现双刃剑效应。2022 年生态调查显示,连续抛石段两栖动物迁移阻力指数较自然岸线增加 57%。创新性解决路径包括:研发多孔生态砌块(孔隙率 $35\pm 5\%$),池州试验段应用后鱼类产卵场面积扩大 40%;构建阶梯式生态廊道,在垂直岸线方向设置宽度 $\geq 5\text{m}$ 的植被过渡带^[4];引入生物亲和性材料,马鞍山段采用 3D 打印珊瑚状块体,6 个月后底栖生物多样性指数提升 28%。值得关注的是,中科院合肥物质研究院开发的仿生根系固土技术,通过模拟芦苇根系形态增强块体-土体界面生态连接度。

6.3 全寿命周期成本优化

传统维护模式存在显著效率瓶颈,测算表明 2000 年前建护岸的维保成本占初始投资的 72%。根本症结在于:①刚性防护结构与河道动态演变不匹配;②人工巡检存在 30%以上的缺陷漏检率。突破性解决方案包括:建立数字孪生系统,铜陵段通过 BIM+GIS 融合技术实现维护需求预测准确率提升至 85%;推广自修复技术,巢湖闸工程应用微生物诱导碳酸盐沉淀技术,使维护间隔周期延长 3 倍;

创新管理模式, 安庆试点“工程保险+智能监测”模式, 通过风险转移机制降低年均维护支出 23%。

7 结语

抛石护岸结合三维级配优化和生态化改造, 可同时实现抗滑安全系数提升 35%、生物多样性指数增加 28% 的双重效益。研究构建的“地质-水文-生态”多维评估模型, 有效破解了防洪工程生态效益量化难题, 为绿色基础设施绩效评估提供了新范式。当前仍存在智能材料应用成本偏高、水沙运动长期反馈机制不明等问题, 建议后续研究重点突破自感知块体材料、河床演变预测算法等关键技术。未来防洪体系建设应注重工程措施与自然过程的动态适应, 发展基于数字孪生的智慧防洪系统, 推动防洪工程从单一安全导向向“安全-生态-经济”协同发展转型。

【参考文献】

- [1] 秦传华. 抛石护岸治理技术在长江马鞍山河段当涂段的应用[J]. 东北水利水电, 2024, 42(5): 55-57.
 - [2] 邓志荣. 水利工程中铰接式河道生态护坡技术的应用[J]. 水利技术监督, 2024(10): 255-258.
 - [3] 黄泽益. 混凝土护坡在城市河道治理中的应用[J]. 水利技术监督, 2025(1): 269-271.
 - [4] 李雪珍, 任国伟. 基于 AHP-FCE 综合评价模型的渠道生态护岸方案比选[J]. 水利科学与寒区工程, 2025, 8(1): 114-117.
- 作者简介: 路艳(1989.12—), 毕业院校: 合肥师范学院, 所学专业: 计算机网络技术, 当前就职单位名称: 安徽宣城金川水电工程有限公司, 就职单位职务: 项目经理, 职称级别: 工程师。