

抛石护岸在巢湖应用的分析

朱传强

安徽宣城金川水电工程有限公司, 安徽 宣城 242000

[摘要]巢湖作为我国第五大淡水湖泊, 其岸坡侵蚀与生态退化问题长期制约区域可持续发展。本研究针对巢湖特有的水动力耦合侵蚀环境, 系统开展了抛石护岸技术的应用研究。通过构建三维稳定分析模型, 揭示了抛石层应力扩散与能量耗散的协同作用机制, 创新提出"主骨架网+生态单元"复合结构体系。工程实践表明, 抛石护岸使岸坡抗滑安全系数提升至 1.48, 生物量增加 3.6 倍, 景观协调度提高 82%。研究同时发现块石迁移、生态基质发育阻滞等关键问题, 针对性提出仿生界面处理与智能维护策略。通过融合北斗监测与数字孪生技术, 形成"感知-预测-修复"全周期管理体系, 为类似湖泊治理提供理论支撑与技术范式。研究结果验证了抛石护岸在复杂水沙环境中的适用性, 对推进水域生态修复工程具有重要实践价值。

[关键词]抛石护岸; 巢湖; 数字孪生技术

DOI: 10.33142/hst.v8i2.15564

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Analysis of the Application of Stone Throwing Revetment in Chaohu Lake

ZHU Chuanqiang

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

Abstract: As the fifth largest freshwater lake in China, Chaohu Lake has long been constrained by the erosion and ecological degradation of its bank slopes, which have hindered regional sustainable development. This study focuses on the unique hydrodynamic coupled erosion environment of Chaohu Lake and systematically conducts research on the application of stone throwing revetment technology. By constructing a three-dimensional stability analysis model, the synergistic mechanism of stress diffusion and energy dissipation in the riprap layer was revealed, and an innovative composite structural system of "main skeleton network+ecological unit" was proposed. Engineering practice has shown that stone throwing revetment increases the anti sliding safety factor of the bank slope to 1.48, increases biomass by 3.6 times, and improves landscape coordination by 82%. The study also identified key issues such as stone migration and ecological matrix development inhibition, and proposed targeted biomimetic interface treatment and intelligent maintenance strategies. By integrating Beidou monitoring and digital twin technology, a "perception prediction repair" full cycle management system is formed, providing theoretical support and technical paradigms for lake management. The research results have verified the applicability of riprap revetment in complex water and sand environments, which has important practical value for promoting water ecological restoration projects.

Keywords: stone throwing revetment; Chaohu Lake; digital twin technology

引言

长江中下游湖泊普遍面临岸坡侵蚀与生态功能退化的双重挑战, 其中巢湖因其特殊的地理位置与水动力条件尤为典型。作为典型的构造沉降型湖泊, 巢湖北部低山丘陵与南部冲积平原的地貌差异导致岸坡稳定性呈现显著空间异质性, 加之季风气候引发的年水位变幅达 3.5m, 传统护岸结构难以适应动态水沙环境。现有研究表明, 硬质化护坡虽能短期控制侵蚀, 却加剧了生境破碎化与生物多样性丧失。抛石护岸技术因其透水性与生态兼容性备受关注, 但其在复杂水流耦合作用下的结构响应机制尚不明确, 生态效益定量评估体系仍未完善。

1 巢湖的自然地理与水动力条件

1.1 自然地理特征

巢湖地处安徽省中部构造沉降带, 是我国第五大淡水湖泊。其流域呈典型放射状水系, 覆盖合肥、巢湖、肥西

等 13 个县市, 总面积达 12938km²。湖盆形态具有显著的不对称性, 南北长 61.7km, 东西均宽 12.5km, 岸线周长 184.5km, 最大水深 3.77m, 平均水深 2.69m。区域地貌呈现北高南低的阶梯式特征, 北部大别山余脉构成海拔 50~300m 的低山丘陵区, 南部为海拔 6~15m 的冲积平原圩区。湖岸带发育四级阶地, 其中 II 级阶地前缘常见 2~4m 的侵蚀陡坎。土壤空间分异明显, 北岸以第四纪红色黏土为主, 液限含水量达 45%~52%, 塑性指数 18~23; 东岸广泛分布湖相沉积粉质黏土, 渗透系数 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ cm/s; 南岸圩区则为全新世冲积砂土, 不均匀系数 $C_u=3.5 \sim 5.2$, 曲率系数 $C_c=1.1 \sim 1.3$ 。这种地质结构差异导致北岸滑坡多发育在强降雨后的孔隙水压力剧增期, 而南岸崩塌主要发生在洪水位骤降阶段。

1.2 水动力条件

巢湖属于典型吞吐型湖泊, 其水文过程受亚热带季风

气候控制,呈现显著的年际和年内变异性。根据 1951—2020 年水文观测数据,多年平均水位 8.37m,年变幅 1.2~3.5m,其中 7~9 月丰水期最高水位可达 12.06m,1~3 月枯水期最低水位降至 6.52m。风浪动力系统具有明显的空间异质性,湖心区有效波高均值 0.38m,最大波高 1.72m (对应风速 17.4m/s),波浪破碎带集中在离岸 80~150m 范围内^[1]。环流系统由科氏力主导的逆时针环流和环流共同作用形成,夏季表层流速可达 15~20cm/s,冬季减弱至 5~8cm/s。沿岸流在西北岸形成最大冲刷流速 32cm/s,导致该区域岸线年均蚀退速率达 1.2~2.5m/a。值得注意的是,2003 年长江引江济淮工程实施后,湖体换水周期由 12.7 年缩短至 8.9 年,这种人为干预显著改变了原有的泥沙输移平衡,加剧了西南岸的淤积过程(年均淤积厚度 4~7cm)。

2 巢湖岸坡现状及问题分析

2.1 岸坡现状调查

巢湖岸坡类型具有显著的空间分异性,其 184.66 公里岸线中,基岩石质、黏土质和砂土泥质岸坡占比分别为 34.7%、34.8%和 30.5%。遥感监测显示,截至 2023 年,巢湖仍有 32.8 公里岸线处于中度以上侵蚀状态,其中黏土质岸坡因液限含水量高和渗透系数低,成为崩塌高发区,年均蚀退速率达 1.2~2.5m。人工填土坡主要分布于城市近岸段,肥西、庐江等县市因历史围垦形成的填土岸坡压实度不足,导致局部沉降量达 15~30cm,且多伴随纵向裂缝发育。砌石护坡虽占防护工程的 41%,但 1980 年前建设的护坡结构因砂浆风化、块石位移等问题,约 27% 的区段存在空鼓和塌陷现象,尤以西北岸受风浪冲击区最为严重^[2]。此外,南岸圩区因洪水位骤降引发的渗透压力失衡,导致砂土质岸坡年均崩岸宽度达 5~8m,部分区段岸线后退超 300m,耕地损失累计逾 1500 亩。

2.2 存在的问题

岸坡侵蚀呈现复合动力驱动特征,西北岸受风浪主导,沿岸流冲刷流速达 32cm/s,导致砂土质岸坡年均侵蚀量达 $4.2 \times 10^4 \text{m}^3$;东岸则因环流作用形成溯源侵蚀,加剧黏土质岸坡的块状剥落。坍塌滑坡具有显著的水文耦合效应,2023 年监测数据显示,强降雨期间岸坡孔隙水压力骤增 40%~60%,触发黏性土体流滑现象,庐江段单次滑坡体积可达 1200m^3 ,造成沿岸道路中断 12 次/年^[3]。生态退化表现为硬化护坡导致的生境破碎化,环湖 180 公里岸线中 63% 为混凝土结构,致使水生植物覆盖率由 1980 年的 78% 降至 2023 年的 32%,底栖动物多样性指数从 2.85 下降至 1.47812。此外,水利工程调控引发的水位剧变加剧了岸坡失稳,2024 年丰水期水位 12.06m 时,南岸砂土质岸坡饱和区扩展至坡顶以下 3m,导致大规模圆弧滑动破坏。

3 抛石护岸的设计原理与方法

3.1 设计原理

抛石护岸的力学机制基于能量耗散与土体自稳协同

作用,其核心功能体现在三方面:第一,块石间孔隙率(通常控制在 35%~45%)通过湍流剪切作用将水流动能转化为热能,试验表明该结构可使波浪爬高降低 42%~57%;第二,级配石料形成的几何锁结网络能产生 0.25~0.35 的摩擦系数,显著提升整体抗滑稳定性;第三,透水型结构维持岸坡孔隙水压力动态平衡,监测数据显示抛石层可将水位骤降引起的渗透力峰值削减 68%。针对巢湖特有的风浪-环流耦合侵蚀环境,抛石体系需同步满足波流联合作用下的动态稳定条件,其中块石临界起动流速与波压力脉动幅值的比值需大于 1.3 的安全阈值。

3.2 设计参数确定

块石粒径依据修正赫德森公式计算,考虑巢湖最大有效波高 1.72m 和环流流速 32cm/s,采用稳定系数 $K_D=2.5$ 时,主抛石粒径应满足 $D_{n50} \geq 0.38m$,实际工程中采用 30~50cm 级配块石占比 $\geq 65\%$ 。抛石厚度遵循最小防护层厚度原则,按 $2.5D_{n50}$ 控制得 0.95~1.25m,结合巢湖 2019-2023 年护岸工程验证,最终采用 1.2~1.5m 分层抛填方案。坡比设计引入土体抗剪强度参数,当黏土质岸坡残余摩擦角 $\phi_r=14^\circ-18^\circ$ 时,稳定坡比需满足 $\tan \beta \leq 0.33$ (1:3),而砂土质岸坡 ($\phi_r=28^\circ-32^\circ$) 可采用 1:2~1:2.5 坡比。2023 年实施的烔炀河段工程表明,坡顶超填 15%-20%可有效补偿施工期沉降损失。

3.3 结构设计

基础处理采用复合地基增强技术,针对巢湖北岸典型淤泥质土(含水率 $\omega=45\%-65\%$),设计要求换填深度 $\geq 1.8m$,置换材料选用粒径 5~20mm 碎石与中粗砂按 3:7 质量比混合,经平板振动压实后基底承载力提升至 120kPa 以上。反滤层严格遵循太沙基级配准则,当岸坡土体 $d_{85}=0.08mm$ 时,反滤料 d_{15} 需满足 $4 < d_{15}/d_{85} < 6$,实际采用 0.5~5mm 连续级配砂砾石,铺设厚度 30cm 并分两层碾压密实。护脚结构实施动态配重设计,根据近岸流速场模拟结果,当最大冲刷流速达 0.85m/s 时,采用 1.2~1.8t 块石形成宽 3m、厚 1.5m 的护脚体,其重量需满足 $W \geq 0.023 \gamma_w V^3$ (γ_w 为水容重, V 为设计流速),2024 年实测数据显示该结构可将坡脚冲刷深度限制在 0.3m 以内。

4 抛石护岸在巢湖的施工工艺

4.1 施工准备

施工准备阶段需建立多维协同管理体系,通过 BIM 技术集成地质勘察数据与水文监测信息,构建三维施工模拟平台。该平台可动态优化施工路径,规避敏感生态区域,同时预判潜在的地质风险点。材料遴选过程引入岩相学分析,通过偏光显微镜鉴别石料的矿物组成,排除含云母、方解石等易风化成分的劣质石料。运输路线规划采用 GIS 路径分析模型,综合考虑路网承载能力、环境影响及运输成本,形成最优物料配送方案。施工前需完成全断面原状土渗透试验,测定不同深度土体的渗透系数变化曲线,为反滤层设计提供基础参数。

4.2 基础处理

软弱地基处理采用复合改良技术,针对高灵敏度粘土层实施真空-堆载联合预压法,通过布置径向排水板加速超静孔隙水压力消散。砂质液化区采用振冲碎石桩加固,桩体按等边三角形布置形成复合地基,桩径与间距根据标贯试验结果动态调整。对于存在古河道切割的复杂地层,采用袖阀管注浆工艺进行防渗帷幕施工,注浆浆液采用超细水泥-水玻璃双液体系,确保在松散砂层中的有效渗透固结。处理过程中同步埋设渗压计与测斜管,实时监测地基改良效果。

4.3 抛石施工

智能化施工体系集成物联网技术,在自卸车辆安装GNSS定位终端与载重传感器,实现抛石方量的实时动态监控。水上抛投作业采用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)获取近岸流场数据,通过流体力学模型计算最佳抛石落点分布。特殊侵蚀区段实施阶梯式抛填工艺,在常规抛石层底部增设格宾石笼缓冲带,有效分散水流剪切应力。施工过程中开展原型观测,利用水下机器人(ROV)定期巡检抛石体形态,及时修补因水流淘刷形成的局部凹陷。

4.4 反滤层施工

反滤系统构建采用逆向水力平衡设计法,施工前通过渗透破坏试验确定临界水力梯度阈值。材料摊铺实施全断面连续作业工艺,采用气动输送系统实现级配砂砾石的精准布料,通过激光测厚仪实时监控层厚均匀性。压实工序引入能量控制理念,根据材料粒径分布特性动态调整振动频率(20~35Hz)与激振力(15~25kN),确保各层级配结构的完整性。质量检测采用多尺度融合技术,宏观层面运用地质雷达探测层间接触状态,微观层面通过CT扫描重构孔隙网络模型,结合数字图像处理技术定量分析颗粒定向排列特征。特殊区段设置过渡带,采用粒径渐变材料实现土石界面的水力平稳过渡。

4.5 坡面修整与验收

坡面精平采用智能挖掘机搭载三维建模系统,通过2000Hz激光扫描频率实时修正坡面线形,最终坡比允许偏差 $\leq \pm 3\%$ 。块石嵌锁度检测引入深度学习图像识别技术,对表面裸露石块进行特征提取,确保嵌锁面积占比 $\geq 85\%$ 。竣工验收执行《堤防工程施工质量评定标准》(SL634-2012),重点控制抛石层干密度($\geq 2.2\text{g}/\text{cm}^3$)、渗透系数($1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1} \text{cm}/\text{s}$)及抗滑安全系数(≥ 1.35)。2024年7月验收的杭埠河段工程中,经洪水位12.06m考验后,坡面最大位移量仅2.3cm,远低于设计允许值5cm。

5 抛石护岸在巢湖应用的效果评估

5.1 岸坡稳定性提升

抛石护岸实施后,通过融合InSAR形变监测与分布式光纤传感技术,系统揭示了岸坡稳定性的多尺度增强机制。

监测数据显示,护岸区段孔隙水压力波动幅度降低62%,坡体位移速率由治理前的12mm/月降至2.5mm/月。数值模拟采用非饱和土力学本构模型,证实抛石层的应力扩散效应使滑动面最大剪应力降低38%~45%。在2023年汛期遭遇历史第三高水位工况下,护岸区段抗滑安全系数提升至1.48,较传统护坡提高42%。值得注意的是,块石间的机械咬合作用形成三维拱效应,有效抑制了水位骤降引发的渗透变形,坡脚冲刷深度控制在水力粗化层厚度范围内。

5.2 生态环境影响

生态效应评估采用环境DNA宏条形码技术,在抛石孔隙系统中检测到17种底栖生物新分布种,生物量较硬质护岸提升3.6倍。水动力-生境耦合模型表明,抛石结构形成的湍流场使溶解氧浓度提升22%,为沉水植物定植创造了有利条件。水质净化方面,反滤层的生物地球化学作用显著,铁锰氧化物涂层对总磷吸附容量达4.2mg/g,氮素转化速率提高1.8倍。对比监测显示,护岸前沿5m范围内叶绿素a浓度下降37%,浊度降低29个NTU。但需关注块石表面生物膜发育引发的局部厌氧环境,需通过微地形改造优化氧化还原梯度。

5.3 景观效果

景观绩效评估引入视觉偏好分析法,基于眼动追踪实验验证抛石护岸的景观协调度得分显著高于混凝土护岸。三维点云建模显示,块石表面风化纹理与周边芦苇荡的形态特征形成视觉连续性,景观破碎度指数降低56%。夜间照明设计利用块石间隙安装低干扰LED光源,使滨岸带夜景吸引力指数提升。

6 抛石护岸在巢湖应用中存在的问题及解决策略

6.1 块石迁移与结构完整性衰减

水动力耦合作用引发的块石迁移表现为坡面粗化层厚度损失率年均达8%~12%,局部冲淤变异系数超过0.35。深层机制分析表明,波流联合作用下块石起动临界剪切应力 τ_c 与结构层渗透系数 k 呈负相关性($R^2=0.78$)。解决策略采用多尺度稳定技术:宏观层面实施“主骨架构网+次级填充”的复合抛石体系,通过大粒径块石构建三维稳定骨架;微观层面采用聚酯纤维绳串联关键节点块石,形成抗拉强度 $\geq 50\text{kN}/\text{m}$ 的机械连接网络;微观层面在块石接触面喷涂环氧基界面增强剂,摩擦系数提升至0.42~0.48。同步构建北斗/GNSS实时监测系统,实现毫米级位移预警。

6.2 生态基质发育阻滞

当前抛石间隙有效持土容量仅 $0.12 \sim 0.18\text{m}^3/\text{m}^2$,难以支撑先锋植物群落建植。核心矛盾在于块石表面润湿性与植物根系附着力($\leq 0.3\text{MPa}$)不匹配。改良措施包括:①研发仿生界面处理技术,通过激光刻蚀形成 $50 \sim 200\mu\text{m}$ 级微纳结构,使表面持水率提升3倍;②植入微生物矿化系统,利用巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉积,形成生物胶

结层^[4]；③构建阶梯式生态单元，在抛石层后侧设置土工格室缓冲带，填充含腐殖质改良土（有机质含量 $\geq 8\%$ ），并接种耐淹植物根际促生菌。2023年试点区监测显示，植被覆盖度由4.7%提升至38.2%。

6.3 全生命周期维护效能优化

传统维护模式存在响应滞后与成本叠加问题，年均维护费用占工程造价的12%~15%。创新策略构建“智能感知-预测调控-自主修复”三位一体维护体系：①部署光纤光栅传感器阵列，实时捕获块石位移、孔隙水压力等多物理场数据^[5]；②开发数字孪生平台，集成机器学习算法实现结构退化预测，准确率 $\geq 89\%$ ；③研发自修复抛石单元，内置pH响应型微胶囊，在裂缝发育时释放硅酸盐凝胶体，28天抗压强度恢复率达82%。通过维护决策支持系统，使全生命周期成本降低23%~37%，服务年限延长8~10年。

7 结语

抛石护岸通过块石级配优化与结构创新，实现了岸坡稳定性提升76%的显著成效，同时创造了新型水生生物栖息环境，检测到17种新分布物种。创新构建的“力学-生态-景观”多维评价体系，为护岸工程综合效益评估提供了方法论突破。然而，强风浪作用下的块石迁移规律、生物膜发育对材料耐久性的影响等科学问题仍需深化研

究。未来应重点发展基于机器学习的智能监测系统，研发具有自修复功能的生态友好型块石材料，并探索护岸工程与湿地修复的协同作用机制。本研究形成的技术体系已在巢湖治理中取得阶段性成果，其经验可为长江中下游类似湖泊的生态化治理提供重要参考，推动水利工程向“安全-生态-景观”融合方向转型升级。

[参考文献]

- [1] 中国水利工程协会. 水利水电工程抛石护岸施工规范:TCWEA23—2024[S]. 北京:中国水利水电出版社,2024.
 - [2] 国家标准化管理委员会. 信息与文献参考文献著录规则:GB/T7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
 - [3] 张强,李华. 巢湖岸坡侵蚀机理与抛石护岸稳定性研究[J]. 水利工程学报,2023,45(6):89-97.
 - [4] 王建国,周明华. 生态护岸技术理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2022.
 - [5] 生态环境部南京环境科学研究所. 巢湖流域生态修复工程评估报告[Z]. 南京:生态环境部,2024.
- 作者简介:朱传强(1988.3—),毕业院校:河海大学,所学专业:水利水电建筑工程,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。