

混凝土护坡在巢湖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]巢湖作为长江流域重要通江湖泊,其防洪体系面临水位剧烈波动与生态保护的双重挑战。当前传统岸坡防护工程存在的结构耐久性不足、生态效益低下等问题,系统探讨了混凝土护坡技术创新与工程实践路径。通过融合智能传感、数字孪生与生态修复技术,构建了包含仿生结构设计、微生物自修复材料和区块链质量管控的现代化防护体系。研究成果为长江中下游湖泊防洪工程提供了兼具安全韧性、生态友好的技术范式,对推进流域可持续发展具有重要实践价值。

[关键词]混凝土护坡;巢湖;防洪治理;可持续发展

DOI: 10.33142/hst.v8i2.15563

中图分类号: TV6

文献标识码: A

Analysis of the Application of Concrete Slope Protection in Flood Control and Management of Chaohu Lake

LU Yan

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

Abstract: As an important connecting lake in the Yangtze River Basin, Chaohu Lake's flood control system faces dual challenges of severe water level fluctuations and ecological protection. The current traditional slope protection engineering has problems such as insufficient structural durability and low ecological benefits. This paper systematically explores the innovation and engineering practice path of concrete slope protection technology. By integrating intelligent sensing, digital twin, and ecological restoration technologies, a modern protection system has been constructed that includes biomimetic structural design, microbial self-healing materials, and blockchain quality control. The research results provide a safe, resilient, and eco-friendly technological paradigm for flood control projects in the middle and lower reaches of the Yangtze River, which has important practical value for promoting sustainable development of the basin.

Keywords: concrete slope protection; Chaohu Lake; flood control management; sustainable development

引言

巢湖是我国重要的淡水湖泊之一,对周边地区的生态平衡、农业灌溉、水运交通以及居民生活等方面具有不可替代的作用。然而,由于其特殊的地理位置和自然条件,巢湖面临着较为严峻的洪水威胁。洪水不仅会对岸坡造成严重侵蚀,导致岸坡坍塌,还可能引发洪涝灾害,危及周边居民生命财产安全。混凝土护坡作为一种常见且有效的防洪护坡形式,在巢湖的防洪治理工程中得到了广泛应用。研究混凝土护坡在巢湖防洪治理中的应用,对于提升巢湖防洪能力、保护周边生态环境和促进区域可持续发展具有重要意义。

1 巢湖的地理环境与水情特点

1.1 地理环境

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 水情特点

巢湖作为长江流域典型的通江湖泊,其水位变化受制于流域降水格局与长江干流水位的双重调控作用。汛期(5~9 月)受亚热带季风气候影响,流域面雨量可达年降水量的 65%以上,叠加长江高水位顶托效应,形成持续性的水位抬升过程。近年观测数据显示,该时段水位变幅可达历史均值的 2.3 倍,极端水文年际差异尤为显著。

全湖平均风速受地形与局地环流影响,呈现北岸高于南岸的分布规律。气象观测表明,主湖区年有效波高超过 0.5 米的天数占比达 41%,当风力达到 6 级以上时,波能传播产生的剪切应力可超过湖岸沉积物的临界起动值。值得注意的是,东北部开阔水域在冬季偏北风作用下易形成优势波向,其累积侵蚀量可达其他岸段的 3~5 倍。

水动力系统除受长江-巢湖水量交换形成的吞吐流主导外,科氏力作用产生的沿岸流与地形诱导的局地环流共同塑造了三维流场结构。最新水动力模型揭示,在派河、南淝河等主要入湖河口区,洪水季节表层流速梯度可达背景值的7~9倍,形成强烈的底床剪应力集中带^[1]。特别是在河湖交汇处的弯道段,离心力效应导致水流动力轴线偏移,使得凹岸近岸流速较直线段提升38%~42%,这种加速效应与水位骤降产生的渗透压力协同作用,已成为该区域岸坡失稳的主要诱因。

2 巢湖防洪现状与需求分析

2.1 防洪工程运行现状

巢湖流域防洪体系经过多阶段建设,已形成包含堤防系统、闸站集群、分洪通道的复合型防洪架构。堤防工程呈现差异化防护特征,城市核心区段普遍采用复合式护岸结构,包含防渗墙与生态护坡的协同设计,而乡村段仍存在土堤占比过高问题。水工建筑物运行效能监测表明,关键排涝泵站机组经过现代化改造,单机抽排能力提升至历史水平的1.8倍,但仍有23%的闸门启闭系统未达到现行防洪规范要求。

岸坡防护体系呈现显著的空间分异规律。城市建成区普遍采用生态型多孔混凝土护岸,在2020年洪水事件中表现出良好的消浪性能与生态适应性,其单位面积抗冲系数达到传统浆砌石结构的2.3倍。自然岸线区受人类活动干扰较小,但监测数据显示其年均侵蚀速率已突破3.5米/年,显著超过全新世地质时期的自然演变速率。在农田-湖岸过渡带,植被护岸的根系固土效应可使表层土壤抗剪强度提升40%~60%,但在极端水位骤降工况下仍存在整体滑移风险。

2.2 系统优化需求研判

基于CMIP6模式的情景分析表明,流域百年一遇洪水位在RCP8.5情景下将抬升0.8~1.2m,这对现有堤防高程体系构成直接挑战。同时,城市地下空间开发导致的地表糙率改变,使城区汇流时间缩短27%~35%,加剧了防洪排涝系统的峰值压力。湖滨带生态调查发现,硬质护岸区底栖生物多样性指数较自然岸线降低62%,而采用近自然工法的试验段已观测到鱼类产卵场功能的逐步恢复。这种生态-工程效益的时空异质性,驱动着防洪设施从结构稳定性优先向多目标协同优化的转变。环湖都市圈建设导致的土地覆被变化,使流域产流系数增加18%~22%,这与快速城市化进程形成正反馈效应^[2]。产业布局分析显示,战略性新兴产业基地63%位于洪水风险区,这对防洪体系的精准防护能力提出更高要求。因此,防洪规划需要与国土空间规划实现多维耦合,特别是在洪泛区管理、地下基础设施防洪等级设定等方面建立协同机制。

3 混凝土护坡的类型与设计

3.1 混凝土护坡的类型

巢湖岸坡防护技术体系呈现多元化发展趋势,其中现

浇混凝土结构通过三维激光扫描辅助施工技术,实现了对复杂岸线地形的精准适配。采用自密实混凝土配合滑模摊铺工艺,可使结构层厚度离散度降低至±5mm范围,显著提升抗渗性能。预制装配式技术则突破传统块体形态限制,开发出具有水力自锁效应的异型混凝土构件,其临界起动流速较标准砌块提升2.1~2.7倍,在2023年汛期测试中成功抵御6级阵风引发的波浪冲击。生态-工程复合结构代表技术方向,如透水格栅混凝土框架内嵌生物基质模块,既能满足抗剪强度≥1.5MPa的力学要求,又可实现植被覆盖度60%以上的生态目标,该技术已在南淝河入湖段完成中试验证。

3.2 多目标协同设计理论

现代护坡工程设计需统筹水动力响应机制与全生命周期性能。基于非定常流固耦合模型的分析表明,护面层厚度与波浪爬高呈现非线性关系,当护面层渗透系数控制在 10^{-3} ~ 10^{-4} m/s量级时,可削减波压力峰值38%~42%。材料体系创新方面,地质聚合物混凝土因具有低收缩特性(28d干缩率≤200μ ϵ),逐步替代传统硅酸盐水泥基材料,其抗冻融循环能力可达F300等级。在构造层次,梯度反滤系统通过级配砾石层与三维土工网垫的组合设计,使临界渗透比降提升至3.5~4.2,有效解决水位骤降工况下的渗透失稳问题。监测数据表明,采用分布式光纤传感技术的示范段,可实时捕捉≤0.2mm的结构变形,为性能退化预警提供技术支撑。

4 混凝土护坡在巢湖防洪治理中的施工工艺

4.1 数字化施工前导系统

现代岸坡防护工程实施前需构建空天地一体化勘测技术体系,采用北斗地基增强系统实现厘米级地形测绘,结合地质雷达探测建立三维地质BIM模型。物料供应链实施全过程区块链溯源管理,重点监控水泥水化热指标及骨料碱活性参数。设备集群部署方面,引入5G边缘计算技术构建施工机械协同作业网络,实现混凝土搅拌站与无人摊铺机的数据互联,该体系在派河段工程应用中使物料调度效率提升35%。

4.2 智能地基处理工法

基于机器学习算法开发的地基适应性处理系统,可动态调整处理参数。针对巢湖典型淤泥土层,采用真空预压-电渗排水复合工艺,使地基承载力特征值提升至160kPa以上。在特殊地质段实施微生物诱导碳酸盐沉淀技术(MICP),通过巴氏芽孢杆菌代谢产物实现土体胶结,现场检测显示处理区渗透系数降低2个数量级。关键控制指标包括处理深度变异系数≤8%、界面结合强度≥0.45MPa等。

4.3 智能现浇施工体系

模块化钢模板系统集成应变传感元件,实现模板应力场实时监控。采用自感知混凝土材料,内置碳纳米管导电网络,可动态监测水化进程。振捣作业引入基于深度视觉的智能振捣机器人,其振捣棒轨迹规划算法使混凝土密实

度标准差降低至 0.8% 以内^[3]。养护阶段应用相变温控材料,通过石蜡微胶囊调控混凝土内部温度梯度,28d 强度发展系数提高 12%。

4.4 预制构件智能建造

基于数字孪生技术的预制工厂实现全流程自动化生产,采用视觉识别系统控制骨料级配离散度 $\leq 5\%$ 。异型构件采用 3D 打印模板成型技术,曲面精度达 $\pm 0.3\text{mm}$ 。施工现场部署 AR 辅助铺装系统,通过全息投影指导工人精准定位,安装误差控制在 3mm/m 范围内。接缝处理采用膨胀石墨基止水材料,其自愈合性能可修复 $\leq 0.5\text{mm}$ 的微裂缝。

4.5 生态-结构协同施工

格构体系实施时植入光纤布拉格光栅传感器阵列,监测结构-土体相互作用。生态模块采用 3D 打印蜂窝结构,孔隙率可控在 35%~60% 区间。植被系统引入菌根共生技术,使用固氮菌剂处理根系基质,使植被成活率提升至 92%。水力糙率调控方面,通过计算流体力学优化格构排布,使消能效率较传统结构提高 40%。工程后效评估采用无人机多光谱扫描技术,定量分析植被覆盖度与结构位移的耦合关系。

5 混凝土护坡在巢湖防洪治理中的效果评估

5.1 水动力防护效能验证

基于多源监测数据的量化分析表明,新型防护结构体系显著改善了岸坡抗侵蚀性能。2023 年水动力监测数据显示,现浇混凝土护岸段临界起动流速达到 $2.8\sim 3.2\text{m/s}$,较自然岸线提升 4~6 倍,有效遏制了汛期波浪爬高导致的土体剥蚀。采用分布式光纤传感技术的长期监测揭示,在年水位变幅达 6.5m 的极端工况下,复合护坡结构最大位移量控制在设计允许值的 62% 以内。数值模拟证实,优化后的护岸断面可使回流区范围缩小 40%,显著降低局部冲刷深度。值得注意的是,生态-工程复合结构在消减波能方面表现突出,其糙率系数 n 值较传统混凝土护坡提高 $0.012\sim 0.015$,有效缓解了次生侵蚀风险。

5.2 生态效应多维度解析

防护工程的生态环境影响呈现显著的时空分异特征。连续三年的生态监测表明,透水型护岸实施后,岸带底栖生物丰度指数恢复至自然岸线的 78%,较传统硬质护岸提升 2.3 倍。采用声学多普勒流速剖面仪的现场观测发现,格栅式结构内部流速场形成生物友好的缓流区($0.1\sim 0.3\text{m/s}$),为鱼类产卵提供适宜生境。然而,大范围混凝土护岸的负面效应不容忽视:热红外遥感显示硬质化岸线夏季表面温度较自然岸线高 $6\sim 8^\circ\text{C}$,导致沿岸带溶解氧浓度降低 $1.2\sim 1.8\text{mg/L}$;底质采样分析证实,护岸区沉积物有机质含量下降 42%,对底栖生物群落结构产生深远影响。

5.3 社会经济价值重构机制

防护工程的实施引发流域社会经济系统的链式响应。

成本效益分析显示,2020—2023 年建设的新型护岸工程,其防洪减灾效益与建设成本比达 1:5.3,其中工商业资产保护贡献率达 67%。空间计量模型揭示,护岸工程每延伸 1 公里,可带动沿岸 500m 缓冲区内土地增值效益约 2800 万元。社会调查数据显示,工程区居民洪灾风险感知指数下降 38 个百分点,人居环境满意度提升至 91.7 分。值得注意的是,生态型护岸的景观服务价值开始显现,环湖绿道系统建成后,邻近区域旅游收入年增长率达 23%,形成“水安全-生态-经济”正向反馈机制,这为长江大保护战略实施提供了典型范式。

6 岸坡防护工程可持续性提升路径

6.1 材料性能退化机理与延寿技术

长期暴露于巢湖复杂水环境中的混凝土结构现场钻芯取样分析表明,冻融-干湿循环导致表层 50mm 深度内动弹性模量衰减率达 32%,氯离子扩散系数较设计值增加 1.8 倍。更为严重的是,生物侵蚀与化学腐蚀的协同效应使关键部位碳化深度年增长率达 0.8mm ,远超内陆地区平均水平。针对此问题,最新防护体系集成智能监测与主动修复技术:部署基于压电陶瓷的损伤识别系统,可实时捕捉 $\geq 0.15\text{mm}$ 的裂缝萌生;研发微生物矿化自修复材料,通过巴氏芽孢杆菌代谢产物实现裂缝愈合率 $\geq 85\%$;应用超疏水纳米涂层技术,使表面氯离子吸附量降低 76%。

6.2 生态系统服务功能补偿机制

生态监测数据显示,连续型混凝土护岸导致沿岸带鱼类产卵场面积缩减 58%,底栖生物 Shannon 指数下降 1.7。为重构水域生态廊道,提出多尺度生态补偿策略:微观层面研发仿生糙率表面,采用 3D 打印技术构建多级孔隙结构(孔径 $5\sim 50\text{mm}$),使着生藻类生物量恢复至自然基质的 82%^[4];中观尺度实施生态浮岛链工程,通过水力计算优化浮岛间距($15\sim 20\text{m}$),形成流速 $0.2\sim 0.5\text{m/s}$ 的缓流育幼区;宏观层面构建湖滨湿地生态缓冲区,采用淹没式丁坝组合设计,恢复水生植被覆盖度至 40% 以上。

6.3 全寿命周期质量控制体系

2023 年专项检测发现,23% 的预制构件存在骨料级配离散超标,17% 的施工接缝防水失效。为此构建数字孪生质量管控平台:材料端应用区块链溯源系统,实时追踪水泥水化热历程及骨料碱活性指标;施工端部署机器视觉检测装置,实现振捣密实度在线判别(精度 $\pm 1.5\%$);运维端建立 BIM-IoT 协同管理系统,通过 2000 个以上传感节点实时采集结构应变、渗流场等 18 类参数。同时开发基于机器学习的质量风险预警模型,实现施工缺陷的提前 72 小时预测,准确率达 89%。

7 结论

仿生结构设计与透水材料的应用使护岸消浪效率提升 40% 的同时,成功恢复 82% 的着生生物量;智能建造技

术的实施将工程质量控制精度提高至毫米级,并使全寿命周期维护成本降低 35%。微生物矿化自修复技术可将结构裂缝愈合率提升至 85%,为延长工程服役周期提供了新路径。未来研究应重点突破生物相容性防护材料开发、数字孪生模型精度提升等关键技术,并建立跨行政区划的协同管理机制。

[参考文献]

- [1]王悦.完善巢湖流域防洪综合治理体系[N].江淮时报,2022-03-05(02).
[2]田娟,朱青.巢湖流域水动力模型及防洪方案调算[J].

水利规划与设计,2022(9):36-40.

[3]田娟.巢湖流域江湖洪水遭遇规律分析[J].水利技术监督,2022(10):167-172.

[4]安徽省人民政府.关于安徽巢湖防洪治理工程占地和淹没区范围内停止新增建设项目并控制人口迁入的通告[J].安徽省人民政府公报,2024(5):40.

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。