

水利工程中新型生态护坡结构的稳定性与生态效益研究

罗 彬

河南省城乡水务工程建设有限公司 河南 郑州 450000

摘要:传统水利护坡多采用刚性材料,虽能保障稳定,但存在生态阻隔、透水性差等问题,难以适配现代水利“生态优先”需求。新型生态护坡融合植被、土工材料等元素,实现稳定性与生态性协同提升。本文系统梳理新型生态护坡结构类型及特点,从影响因素、理论方法、模型试验、数值模拟分析其稳定性,构建生态效益评估体系与方法并结合实例验证,最后提出优化设计与施工养护建议。研究为生态护坡设计应用提供理论支撑,推动水利工程向绿色生态化转型,助力流域生态保护与修复。

关键词:生态护坡;稳定性分析;生态效益

1 水利工程中新型生态护坡结构类型及特点

1.1 植被型生态护坡结构

植被型生态护坡以植物为核心防护元素,依靠根系固土、枝叶减冲刷,分草本、灌木、乔灌木复合三类。草本护坡选狗牙根、马尼拉草等品种,根系密集、生长快,能快速覆盖边坡,适用于坡度 $\leq 1:2.5$ 缓坡,初期固土效果好,但根系浅,长期抗冲刷能力有限。灌木护坡用紫穗槐、沙棘等深根品种,主根深入土层1-2米,侧根横向扩展,增强深层稳定性,耐旱耐贫瘠,适配河道、水库场景,仅生长周期长,初期需临时防护。乔灌木复合护坡结合三者优势,上层垂柳提供景观遮荫,中层灌木强化固土,下层草本快速覆盖,生态效益最优,对施工场地与养护条件要求较高,适用于生态敏感工程。

1.2 土工材料复合型生态护坡结构

土工材料复合型生态护坡通过材料与植被、土体协同提升稳定,主流有生态袋、格宾网、土工格栅加筋三类。生态袋护坡用聚丙烯编织袋,内填营养土与种子,袋体卡扣连接堆叠,抗拉强度 $\geq 8\text{kN/m}$,抗老化性优,能适应边坡沉降,植被成活率高,适用于坡度 $1:1.5-1:2.5$ 河道、堤防,仅对堆叠平整度要求严,否则易局部滑移。格宾网护坡由镀锌钢丝网箱填块石,预留种植槽播种子,块石孔隙供植物生长与水生生物栖息,抗冲刷流速达 $3-5\text{m/s}$,适用于山区湍急河流,生态兼容性强。土工格栅加筋护坡将格栅埋入土层,通过摩擦限制土体滑移,表层铺草皮或种草,抗剪强度提升 $25\%-30\%$,适用于松散土层边坡,尤其水库消落带,能控制水位变动引发的失稳^[1]。

1.3 生态混凝土护坡结构

生态混凝土护坡以多孔混凝土为基材,调整配合比形成孔隙,供植物生长与水分渗透,分植草、透水、轻

质生态混凝土三类。植草混凝土孔隙率 $20\%-30\%$,抗压强度 $\geq \text{C}20$,内部加保水保肥材料,表层播草本,根系可穿透孔隙入土层,形成“混凝土-植物”复合体系,透水性强,能快速排积水减孔隙水压力,适用于堤防迎水坡、河道护岸,仅孔隙易被泥沙堵塞,需定期清理。透水混凝土孔隙率 $15\%-25\%$,无粗骨料或用单一级配粗骨料,透水系数 $\geq 1\times 10^{-3}\text{m/s}$,用于边坡平台或堤顶路面,减少地表径流、补地下水,兼具承载能力,可满足行人与小型车辆通行。轻质生态混凝土用陶粒、火山渣代普通碎石,密度 $\leq 1800\text{kg/m}^3$,抗压强度 $\geq \text{C}15$,自重轻且保温性好,适用于填方或软土地基边坡,降低沉降风险,同时为植物生长提供良好环境。

2 水利工程中新型生态护坡结构稳定性分析

2.1 稳定性影响因素分析

新型生态护坡稳定性受多因素影响。水文水力学上,洪水冲刷是主要威胁,流速不同应对方式有别, $\leq 1\text{m/s}$ 时多数护坡可抗冲刷, $1-3\text{m/s}$ 需高强度结构, $> 3\text{m/s}$ 要配消能设施;降雨入渗改变土体含水量,降雨量 $50-100\text{mm/d}$ 时,不同土层反应不同,植被型和土工材料复合型护坡各有应对方式。地质土壤方面,不同土壤特性不同,砂壤土稳定性好,黏土遇水易软化,砂土易管涌,边坡坡度也有影响。结构自身上,材料性能决定承载能力,施工质量影响整体性。植被生长有时效性,初期靠材料,成熟后根系固土提升安全系数,枯萎期未补植则稳定性下降。

2.2 稳定性理论分析方法

新型生态护坡稳定性理论分析方法适配不同场景。极限平衡理论常用条分法,瑞典条分法假设滑动面为圆弧,忽略条间作用力,适用于植被型护坡浅层初步分析;毕肖普法考虑条间水平作用力,精度更高,适用于

生态袋等土工材料复合型护坡,安全系数更高。土压力理论用于分析结构与土体作用力,主动土压力确定侧向荷载,库仑适用于无粘性土,朗肯适用于粘性土,结果有差异,需按土壤类型选。强度折减法通过降低土体抗剪强度参数至失稳安全系数,适用于生态混凝土等复杂结构,精度高,但对参数与软件操作要求严,用于施工图精准分析。

2.3 新型生态护坡结构稳定性模型试验研究

模型试验通过缩尺模型模拟工况获数据,分室内物理模型与现场足尺试验。室内试验用1:10-1:20缩尺比例,依相似原理设计,模拟降雨、水流冲刷,监测位移、应力及破坏模式。装置含模型槽、降雨系统、水流循环系统与监测系统,植被型护坡模型槽长3-5m、宽1-1.5m、高0.8-1.2m,可调坡度;降雨系统用多孔喷头,强度50-200mm/d模拟不同降雨等级;监测系统配精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 位移计、 $\pm 0.1\text{kPa}$ 压力传感器。如生态袋护坡试验,模拟100mm/d降雨与2m/s水流冲刷,监测得边坡最大位移 $< 5\text{mm}$,安全系数 ≥ 1.25 ,验证稳定性,同时发现堆叠错缝处易渗漏,为施工优化提供依据^[2]。现场足尺试验在实际工程场地开展,比例1:1,更贴近真实工况,周期1-2个水文年,长期监测自然环境下稳定性。如河道格宾网护坡试验,选20m长试验段,监测汛期3m/s洪水作用下变形,网箱最大位移2mm,块石无松动,满足要求;1年后植物覆盖率85%,根系深入网箱,进一步提升稳定性。

2.4 新型生态护坡结构稳定性数值模拟研究

数值模拟用计算机软件构建力学模型,模拟不同工况稳定性,具成本低、效率高、可模拟复杂工况优势,常用FLAC3D、ABAQUS、GeoStudio。FLAC3D基于有限差分法,擅模拟土体大变形与失稳,适用于整体稳定性分析,建模需预设参数,如生态袋用实体单元,弹性模量100-200MPa、泊松比0.3;格宾网用壳单元,钢丝弹性模量200GPa、泊松比0.28;土体用摩尔-库仑本构,依土壤试验定 c 、 ϕ 值。如模拟生态混凝土护坡暴雨入渗工况,算得降雨24h后安全系数从1.35降至1.22,需增设排水孔。ABAQUS基于有限元法,擅分析结构与土体接触作用,如土工格栅加筋护坡,模拟格栅与土体摩擦接触,算得格栅最大拉力在边坡中下部,为选型提供依据;还可模拟植被根系作用,将根系视为加筋材料,提土体 c 、 ϕ 值10%-15%,分析根系贡献。GeoStudio专注渗流与稳定性耦合分析,适用于降雨入渗失稳模拟,算孔隙水压力与渗流量,如植被型护坡,模拟得根系吸水使孔隙水压力比裸土低20%-30%,稳定性升。

3 水利工程中新型生态护坡结构生态效益评估

3.1 生态效益评估指标体系构建

构建科学合理的生态效益评估指标体系是评估新型生态护坡结构生态效益的基础。该体系涵盖多个方面,如生物多样性指标,包括植物种类数量、动物栖息地丰富度等;水土保持指标,如土壤侵蚀模数、水土流失量等;水质净化指标,如对氮、磷等污染物的去除率;景观美学指标,包括景观协调性、视觉舒适度等。通过综合这些指标,全面评估新型生态护坡结构对生态环境的改善程度。

3.2 生态效益评估方法

生态效益评估方法有多种。层次分析法可将复杂的评估问题分解为多个层次,通过两两比较确定各指标权重,进而计算综合生态效益得分。模糊综合评价法能处理评估中的模糊性问题,将定性指标量化,更准确地反映生态效益状况。还有物元分析法,通过建立物元模型,对生态效益进行可拓评价。不同方法适用于不同情况,可根据评估目的和数据特点选择合适方法,也可综合运用多种方法提高评估准确性^[3]。

3.3 新型生态护坡结构生态效益实例评估

以某河道生态修复工程为例,选生态袋、格宾网、植草混凝土三种结构评估,周期1年。水文调节方面,生态袋护坡透水系数 $6 \times 10^{-4}\text{m/s}$,土壤侵蚀模数 $420\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,地下水补给量 110mm/a ;格宾网护坡透水系数 $8 \times 10^{-4}\text{m/s}$,侵蚀模数 $380\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,补给量 125mm/a ;植草混凝土透水系数 $1.2 \times 10^{-3}\text{m/s}$,侵蚀模数 $350\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,补给量 130mm/a ,三者均优于传统混凝土护坡。生物多样性方面,生态袋护坡植物12种、覆盖率85%,小型哺乳动物活动7次/周,鸟类4种/100m,底栖生物58个/ m^2 ;格宾网护坡植物15种、覆盖率90%,动物活动9次/周,鸟类5种/100m,底栖生物65个/ m^2 ;植草混凝土护坡植物8种、覆盖率75%,动物活动5次/周,鸟类3种/100m,底栖生物45个/ m^2 ,格宾网生物多样性最优。水质净化方面,生态袋COD去除率32%、氨氮28%、总磷22%;格宾网COD35%、氨氮30%、总磷25%;植草混凝土COD28%、氨氮24%、总磷19%,格宾网净化效果最佳。景观改善方面,生态袋均匀度指数0.75、破碎度0.28、满意度82%;格宾网0.8、0.25、85%;植草混凝土0.7、0.3、78%。综合评分格宾网88分(优秀)、生态袋83分(良好)、植草混凝土76分(良好),验证新型结构生态效益显著。

4 新型生态护坡的优化设计与应用建议

4.1 结构优化方向

新型生态护坡结构优化从材料、功能协同、地域适配展开。材料优化研发复合型生态材料,如“可降解高分子网格+生物炭改良土”复合基材,网格降解周期2-3年与植物生长匹配,生物炭掺量8%提升土壤保水保肥与污染物吸附能力,加0.5%减水剂改善浆液流动性,适用于生态脆弱区。改进现有材料性能,生态袋加抗紫外线剂,500h照射后抗拉强度保留率 $\geq 85\%$;植草混凝土调骨料级配,孔隙率提至32%,加2%膨胀剂减收缩裂缝,增强抗渗与植物适配性。功能协同优化用梯度结构设计,河道护坡坡脚用格宾网抗冲刷,坡中用生态袋提生态性,坡顶用乔灌草复合护坡强化景观与固土,形成“抗冲-生态-景观”协同体系。地域适配优化,北方寒冷地区生态混凝土加引气剂,冻融循环200次强度损失 $< 15\%$;南方多雨地区护坡增设排水盲沟,间距5m,直径100mm,加速排水减孔隙水压力;山区河流用“格宾网+块石+本地灌木”结构,块石粒径20-30cm适配湍急水流。

4.2 施工与养护管理建议

施工管理需把控全流程质量。前期准备需详勘地质,明确土壤类型、地下水位与水流流速,依勘察结果选护坡类型与参数,如砂土区优先格宾网,黏土区加强排水设计。施工前试桩3-5根,验证参数合理性,如生态袋护坡试桩测堆叠平整度与袋体连接强度。过程管控严格按参数施工,生态袋堆叠错缝宽度 $\geq 15\text{cm}$,每3层设一道土工格栅加强整体性;格宾网箱块石填充密度 $\geq 90\%$,绑扎间距 $\leq 30\text{cm}$;生态混凝土浇筑厚度偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内。质量检测分过程与完工检测,过程中每

100m²取3个测点测压实度、孔隙率,完工后用三维激光扫描仪测整体平整度,偏差超5mm需返工^[4]。养护管理需长期跟进,植被养护初期每周浇水1-2次,持续1个月,之后每月浇水1次,每年补植枯萎植物,补植率100%;材料养护每半年检查生态袋、格宾网完好度,破损处及时修补,生态混凝土孔隙每季度清理1次,防泥沙堵塞;定期监测每季度测土壤侵蚀模数、植物覆盖率,每年评生态效益,依监测结果调整养护方案。

结束语

水利工程里新型生态护坡结构的研究与应用意义重大。介绍其类型特点明确了适用场景,稳定性分析从多角度开展,为坡体安全提供依据。生态效益评估构建指标体系并实例评估,证实其改善生态的积极作用。优化设计与应用建议为提升性能指明方向。未来需持续深入研究、完善技术,推动其在水利工程更广泛有效应用,达成水利工程与生态环境和谐共生。

参考文献

- [1]王海霞.水利工程中河道生态护坡施工技术的融合应用及关键点分析[J].数字农业与智能农机,2024,(11):71-73.
- [2]李超,吴书培.河道生态护坡技术在水利工程施工中的应用研究[J].治淮,2025,(03):54-56.
- [3]银丽彩.河道生态护坡施工技术要点及其在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2024,(24):25-27.
- [4]高凡.环境保护理念下水利工程生态防治措施研究[J].工程建设与设计,2023,(19):114-116.