

新型生态护坡技术在水利工程中的应用

王飞云

武义县宣平溪水电工程管理处, 中国·浙江 金华 321203

摘要: 在我国生态文明建设持续深化与水利工程高质量发展的双重背景下, 传统浆砌石、现浇混凝土等硬质护坡技术, 已无法满足现代水利工程结构安全、生态修复、景观协调、低碳可持续的综合建设需求。传统封闭型护坡存在生态割裂、水土交换阻断、易破损病害、资源消耗大等突出缺陷, 而新型生态护坡技术依托复合材料研发、结构形式创新与绿色施工工艺, 实现了工程防护与生态保育的有机融合, 成为水利边坡治理的核心发展方向。本文系统梳理植被混凝土护坡、生态混凝土护坡、蜂巢格室护坡、土工膜袋护坡、三维植被网护坡五大主流新型技术的作用机理、材料特性、施工流程与适用场景, 结合工程实践分析应用成效, 剖析当前技术推广中的标准缺失、质量管控薄弱、植被稳定性不足等问题, 并提出针对性优化策略, 为水利工程生态护坡设计、施工与运维提供理论参考和实践指导。

关键词: 水利工程; 新型生态护坡; 边坡稳定; 生态修复; 工程应用

Application of New Ecological Slope Protection Technology in Hydraulic Engineering

Wang Feiyun

Wuyi County Xuanping Creek Hydropower Project Management Office, China Zhejiang Jinhua 321203

Abstract: Under the dual background of the continuous deepening of ecological civilization construction in China and the high-quality development of water conservancy projects, traditional hard slope protection technologies such as rubble masonry and cast-in-place concrete can no longer meet the comprehensive construction requirements of modern water conservancy projects in terms of structural safety, ecological restoration, landscape coordination, and low-carbon sustainability. Traditional closed-type slopes exhibit prominent defects such as ecological fragmentation, obstruction of water and soil exchange, susceptibility to damage and disease, and high resource consumption. In contrast, new ecological slope protection technologies, relying on the development of composite materials, structural innovation, and green construction techniques, achieve the organic integration of engineering protection and ecological conservation, becoming the core development direction for the management of water conservancy slopes. This paper systematically reviews the mechanisms, material characteristics, construction processes, and applicable scenarios of five mainstream new technologies: vegetated concrete slopes, ecological concrete slopes, honeycomb grid slopes, geotextile bag slopes, and three-dimensional vegetated mesh slopes. Combined with engineering practice, it analyzes their application effectiveness, examines current issues such as lack of standards in technology promotion, weak quality control, and insufficient vegetation stability, and proposes targeted optimization strategies. The study provides theoretical reference and practical guidance for the design, construction, and operation and maintenance of ecological slopes in water conservancy projects.

Keywords: Water conservancy projects; New ecological slope protection; Slope stability; Ecological restoration; Engineering application

0 引言

水利工程是国家防洪减灾、水资源调配、水生态保护的基础性设施, 边坡护坡工程则是保障河道、堤防、水库、渠道整体安全的关键组成部分, 其核心功能是抵御水流冲刷、防止土体流失、避免边坡滑移坍塌, 维系水利构筑物长期稳定运行。长期以来, 我国水利护坡工程普遍采用传统硬质防护模式, 该类技术工艺成熟、短期抗冲性较好,

在过去水利工程建设中得到广泛应用。但随着“生态水利、绿色水利”理念全面普及, 传统护坡的弊端日益凸显: 密闭硬质结构完全阻断水土、水气交换通道, 破坏岸坡生态系统, 导致生物栖息地丧失、水体自净能力下降; 同时硬质结构变形适应性差, 易受冻融、沉降、水流冲击影响出现开裂、剥落、坍塌, 后期维护成本居高不下; 加之砂石、水泥大量开采使用, 进一步加剧山体、河道生态破坏, 与

低碳环保、生态优先的建设理念相悖。

在此背景下,融合岩土工程、材料科学、生态学的新型生态护坡技术快速发展,该类技术以“结构安全为基础、生态修复为核心、绿色低碳为导向”,摒弃传统全硬质封闭模式,采用多孔、透水、柔性复合结构,在满足边坡防护需求的同时,快速恢复植被与生态功能,真正实现工程建设与自然生态协同发展。目前,新型生态护坡技术已在中小河流治理、水库岸坡防护、堤防加固、生态渠道建设等工程中规模化应用,展现出显著的技术优势与推广价值。本文结合行业研究与工程实践,对新型生态护坡技术的应用进行全面分析,旨在推动其规范化、标准化应用,助力水利工程绿色转型。

1 传统护坡技术缺陷与新型生态护坡技术优势

1.1 传统水利护坡技术的核心弊端

传统护坡以浆砌石、现浇混凝土、预制混凝土块为代表,属于刚性密闭防护,其根本性缺陷集中在四方面:

一是生态功能完全缺失。硬质不透水结构彻底割裂边坡土体与水体、大气的物质能量交换,坡面无法生长植被,水生动植物失去生存空间,河道生态链断裂,水体自净能力大幅弱化,区域生物多样性锐减。

二是景观协调性极差。单一灰色硬质坡面线条生硬、外观呆板,与周边自然山水、绿地景观完全脱节,形成明显“工程疤痕”,尤其在城市河道、景观水库区域,严重破坏滨水景观整体性。

三是结构耐久性与适应性不足。刚性结构无法适应地基不均匀沉降与土体微小变形,易产生应力集中裂缝;长期受水流冲刷、波浪拍打、冻融循环作用,极易出现砌体松动、面层剥落、局部坍塌,工程使用寿命短,后期维修加固投入大。

四是资源消耗与环境破坏严重。施工需大量开采石材、砂石,消耗大量水泥,建材生产与开采过程碳排放高、生态扰动大,不符合绿色低碳工程建设要求。

1.2 新型生态护坡技术的综合优势

新型生态护坡是刚性防护与生态修复结合的复合型技术,相比传统模式,具备五大核心优势:

第一,生态修复能力突出。采用多孔、透水结构,保留水土交换通道,可搭载乡土植物生长,快速恢复坡面植被,重建动植物栖息地,提升水体自净能力,改善区域生态环境。

第二,结构稳定且适应性强。依托高强度复合材料、三维约束或柔性结构设计,既能抵御水流、波浪冲刷,又

能适应土体变形,有效避免裂缝、坍塌病害,边坡整体稳定性更强。

第三,景观融合度高。植被成型后坡面自然绿意,与周边环境浑然一体,打造“水清岸绿”的滨水景观,兼顾工程防护与景观美化功能。

第四,绿色低碳、经济性更佳。减少水泥、石材用量,降低资源消耗与碳排放;部分技术可机械化施工,缩短工期,后期植被自然养护,运维成本大幅降低,全生命周期经济效益更优。

第五,适用范围广泛。可根据边坡土质、坡度、水流条件、工程需求灵活选型,适配土质边坡、岩质边坡、高陡边坡、缓坡等各类工况,覆盖河道、堤防、水库、渠道等全场景水利工程。

2 水利工程主流新型生态护坡技术详解

2.1 植被混凝土护坡技术

植被混凝土护坡是工程防护与生态绿化一体化的核心技术,主要将水泥、腐殖土、保水剂、缓释肥、植物种子与外加剂按科学配比混合,形成兼具结构强度与植被生长条件的复合基材,通过喷播工艺覆盖于边坡表面,成型后实现“固坡+绿化”双重功效。

其技术机理为:基材中的水泥提供早期结构强度,抵御初期水流冲刷;基材保留20%~30%合理孔隙,既保证结构整体性,又为植物根系穿透、水气交换提供空间;保水剂与肥料持续供给水分养分,保障种子萌发生长;后期植物根系深入土体,与基材、原状土形成“根系-基材-土体”复合稳固体系,实现长期防护与生态修复。

施工流程:边坡清表整平→铺设排水盲管与反滤层→基材拌合→高压喷播施工→无纺布覆盖保湿养护→后期植被管护。该技术抗压强度控制在0.5~5MPa,兼顾强度与植被生长,适用于坡度 $\leq 60^\circ$ 的岩质高陡边坡、贫瘠土质边坡,多用于水库坝坡、山区河道等稳定性要求高的工程。

2.2 生态混凝土护坡技术

生态混凝土又称多孔混凝土,采用大粒径骨料、低水泥用量配比,成型后内部形成连续连通孔隙,孔隙率达15%~35%,是兼具结构强度与生态通透性的柔性护坡技术。

其核心原理为:多孔混凝土骨架形成刚性防护层,抵抗水流冲刷与土体滑移;连续孔隙实现透水透气,填充营养土后可种植草本、水生植物;植物根系贯穿孔隙,进一步提升边坡整体性,同时恢复坡面生态功能。该技术透水性强、抗冻融性能优异,能有效缓解坡面渗水压力,避免土体流失。

施工流程: 坡面修整→铺设土工布反滤层→现浇或铺设预制生态混凝土块→孔隙填充营养土→植物栽植与养护。该技术施工简便、景观效果好, 适用于坡度 $\leq 45^\circ$ 的平缓土质边坡、城市景观河道、湖泊岸线、生态渠道等水流流速适中的工程场景。

2.3 蜂巢格室护坡技术

蜂巢格室护坡是三维柔性约束护坡技术, 由高强度聚乙烯板材经超声波焊接形成蜂窝状网格结构, 展开后固定于坡面, 内部填充土体、砂石, 形成立体约束防护体系, 是松散边坡、高陡边坡治理的优选技术。

其加固机理为: 三维格室强力约束内部填料, 限制土体侧向位移, 大幅提升边坡抗剪、抗冲刷能力; 格室柔性结构可完全贴合坡面, 适应土体变形, 杜绝局部坍塌; 格室内种植乡土植物, 根系与格室、土体交织缠绕, 形成长效生态防护层。材料本身抗老化、抗腐蚀, 使用寿命可达50年以上。

施工流程: 边坡整平→铺设土工布→格室铺设锚固→展开成型→分层填料压实→植被播种养护。该技术对边坡适应性极强, 适用于坡度 $\leq 75^\circ$ 的松散砂质边坡、软弱土边坡、高陡堤防边坡, 广泛应用于山区河道、防汛堤防加固工程。

2.4 土工膜袋护坡技术

土工膜袋护坡是以高强度化纤织物膜袋为柔性模板, 现场灌注水泥砂浆或细石混凝土, 凝固后形成连续整体的柔性防护层, 兼具高抗冲性与施工便捷性, 尤其适配石料匮乏地区。

其技术特点为: 膜袋透水不透浆, 灌注时可快速排出多余水分, 加速浆料凝固; 成型面层整体连续、无缝隙, 抗水流冲刷、抗波浪冲击能力优异, 防渗性能突出; 柔性结构可贴合坡面曲面, 适应地基轻微沉降, 不易开裂破损。

施工流程: 坡面清理→膜袋铺设拼接→锚固固定→高压灌注浆料→自然养护→表层生态绿化。该技术施工速度快、机械化程度高, 适用于水库迎水面、河道堤防、引水渠等水流流速快、抗冲要求高的边坡工程。

2.5 三维植被网护坡技术

三维植被网护坡是经济型生态防护技术, 采用多层复合塑料立体网状材料, 固定于坡面后覆盖种植土、播撒草种, 形成“网体+土体+植被”的轻型复合防护体系, 造价低廉、施工简单。

其作用机理为: 立体网体锁住表层覆土, 防止雨水径流冲刷导致的水土流失; 网体孔隙留存水分与养分, 为植

物生长提供良好条件; 植被根系成型后, 与网体、土体紧密结合, 大幅提升坡面抗蚀能力。

施工流程: 坡面整平→网体自上而下铺设→U型钉锚固固定→覆盖营养土→喷播草种→保湿养护。该技术生态性好、造价最低, 适用于坡度 $\leq 60^\circ$ 、水流流速较慢的中小型河道、渠道背坡、水土保持治理工程。

3 新型生态护坡技术工程应用成效

3.1 工程安全成效

新型生态护坡技术从结构层面大幅提升边坡稳定性, 有效解决传统护坡易破损、易坍塌的问题。复合材料与立体约束结构, 可抵御3~8m/s水流冲刷, 适应冻融、沉降、波浪冲击等复杂工况, 大幅降低裂缝、滑移、坍塌等病害发生率, 延长工程使用寿命, 保障水利工程汛期安全运行, 减少后期抢险、加固投入。

3.2 生态环境成效

该类技术彻底打破传统硬质护坡的生态封闭性, 重建水土生态循环通道。坡面植被覆盖率可快速提升至80%~95%, 有效遏制水土流失; 植被与多孔结构为水生生物、昆虫、鸟类提供栖息地, 恢复区域生物多样性, 提升河道水体自净能力, 改善局部微气候, 实现工程建设与生态保护双赢。

3.3 经济社会效益

相较于传统硬质护坡, 新型生态护坡前期造价略有上浮, 但全生命周期成本显著降低: 一是减少建材消耗, 降低施工碳排放; 二是机械化施工缩短工期30%以上, 节约人工成本; 三是后期仅需简单植被养护, 运维成本降低50%以上。同时, 生态化岸坡有效提升滨水景观品质, 改善人居环境, 契合群众生态宜居需求, 彰显水利工程生态惠民价值。

4 技术应用现存问题与优化对策

4.1 现存主要问题

一是标准规范体系不完善。目前新型生态护坡缺乏统一的国家标准、设计细则、施工规程与验收规范, 材料配比、设计参数、质量管控无统一依据, 工程施工随意性强, 质量参差不齐。

二是材料与施工质量管控薄弱。护坡建材市场鱼龙混杂, 部分劣质产品强度、老化性不达标; 施工队伍专业能力不足, 存在基材配比失衡、铺设锚固不规范、植被选型不当等问题, 直接影响护坡效果与使用寿命。

三是植被长效稳定性不足。部分工程盲目选用外来植物, 忽视乡土植物适应性, 导致植被成活率低、后期退化

严重；单一植物种植易引发病虫害，难以形成稳定生态群落，长期防护效果大打折扣。

四是行业认知与推广阻力较大。部分建设、设计单位仍固守“重安全、轻生态”的传统理念，对新型生态护坡的稳定性、长效性存在顾虑；部分高端技术前期投入偏高，制约了在中小型水利工程中的推广。

4.2 针对性优化对策

第一，健全标准规范体系。加快出台国家及行业统一技术标准，明确各类新型护坡技术的材料指标、设计参数、施工工艺、验收标准与运维要求，实现全流程标准化管控，为工程应用提供制度依据。

第二，强化质量全过程监管。建立建材市场准入机制，严格检测进场材料质量，杜绝劣质产品；加强施工人员专业培训，落实旁站监理制度，重点管控基材配比、铺设厚度、锚固间距、养护流程等关键环节，确保施工质量达标。

第三，优化植被选型与群落配置。坚持乡土植物优先原则，选用耐旱、耐涝、根系发达、适应性强的本土草灌品种，采用“草本+灌木、深根+浅根”混合种植模式，提升植被群落稳定性与抗逆性；建立长期监测机制，及时补植退化植被、修复破损结构。

第四，降低应用成本与转变行业理念。加大产学研攻关，研发低成本高性能护坡材料与施工工艺，推广预制化、模块化施工，压缩综合造价；通过示范工程、技术宣讲等方式，普及新型生态护坡技术优势，转变传统建设理念，加快技术规模化推广。

5 结论与展望

5.1 结论

新型生态护坡技术精准契合新时代水利工程安全、生态、绿色、可持续的建设要求，有效弥补了传统硬质护坡生态缺失、耐久性差、环境破坏大的核心短板。植被混凝土、生态混凝土、蜂巢格室、土工膜袋、三维植被网五大

技术，各有技术特点与适用场景，可全面适配不同水利工程边坡防护需求，在提升结构安全、修复生态环境、节约综合成本、美化滨水景观等方面成效显著。

当前技术应用虽面临标准不完善、质量管控不严、植被稳定性不足、推广阻力大等问题，但通过健全标准体系、严控质量关口、优化植被配置、降低应用成本等措施，可有效破解发展瓶颈。新型生态护坡技术已成为水利边坡治理的必然发展趋势，具备极高的推广价值与应用前景。

5.2 展望

未来，新型生态护坡技术将朝着绿色低碳化、智能长效化、功能多元化方向持续发展：一是研发可降解、低碳型护坡新材料，进一步降低工程碳排放，实现全生命周期绿色环保；二是融合物联网、传感技术，构建智能监测系统，实现边坡沉降、冲刷、植被生长状态的实时监测与预警，提升工程运维智能化水平；三是拓展护坡复合功能，实现边坡防护、水质净化、景观休闲、生态科普一体化，打造多功能生态水利岸坡。

随着技术体系不断完善、行业理念持续转变，新型生态护坡技术将全面替代传统硬质护坡，成为水利工程建设的主流技术，为我国水生态环境保护、水利事业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献：

- [1] 王浩. 生态护坡技术在水利河道治理中的运用研究[J]. 水利技术监督, 2024(02):189-192.
- [2] 陈明. 水利工程边坡治理中新型护坡材料的应用探讨[J]. 工程技术研究, 2024(05):156-158.
- [3] 张建军. 蜂巢格室护坡在中小河流治理工程中的应用[J]. 水土保持科技情报, 2024(03):67-70.
- [4] 李博文. 植被混凝土护坡施工工艺及质量控制要点[J]. 水利建设与管理, 2025(01):45-48.
- [5] 刘佳. 模袋混凝土护坡技术在水库工程中的应用分析[J]. 海河水利, 2025(02):56-59.