

生态防护技术在边坡灾害治理中的应用研究

张 瑶

山西金地源地质科技有限公司 山西 太原 030600

摘要：我国基建推进与城市化深入，使人类工程活动和极端气候引发的边坡灾害频发，威胁人民生命财产、生态环境与社会经济发展。传统刚性工程防护虽短期有效，但存在高成本、高能耗、破坏景观与生态等问题。在此背景下，生态防护技术融合工程稳定性与生态恢复功能，因可持续、环境友好、经济等优势成研究热点。本文梳理了边坡灾害类型、成因及传统治理局限；阐述生态防护技术内涵、主要类型（植物、土工合成材料复合、生态混凝土防护及综合防护体系）及作用机理；通过案例分析其实际应用效果；最后针对生态防护技术在理论研究、材料研发、设计标准及长期监测等方面的挑战，提出发展趋势与优化路径，为构建和谐边坡灾害治理体系提供参考指导。

关键词：边坡灾害；生态防护；植被护坡；土工合成材料；可持续发展

引言

边坡是地球表层岩土体在重力、构造应力及外营力（如风化、侵蚀、地震、降雨等）共同作用下形成的斜坡地貌，广泛分布于山地、丘陵、河岸、海岸及各类人工开挖或填筑区域。在全球气候变化与人类活动加剧下，边坡失稳成为全球性地质灾害。我国受灾严重，每年因滑坡等灾害损失巨大，还常引发次生灾害，破坏区域生态。长期以来，工程界依赖挡土墙等刚性结构治理边坡，虽技术成熟、见效快，保障了重大工程安全，但弊端凸显：造价高，长距离工程防护成本占比大；施工能耗高、碳排放大，与“双碳”目标相悖；破坏自然景观，割裂生物廊道，阻碍生态循环；缺乏自我修复能力，局部受损可能致整体失效。面对传统治理困境，生态防护技术应运而生。它融合多学科知识，构建“活”的防护系统，实现边坡长期稳定与生态功能协同提升，代表治理哲学转变，契合时代要求。因此，研究其在边坡灾害治理中的应用，兼具理论价值与现实意义。

1 边坡灾害概述与传统治理方法的局限性

1.1 边坡灾害的主要类型与成因

边坡灾害是内因与外因共同作用的结果。内因涵盖岩土体物理力学性质、边坡几何形态、地质构造及地下水状态等。如松散堆积物边坡抗剪强度低，易雨水入渗后浅层滑动；软弱夹层或顺向坡结构岩质边坡易深层滑坡。外因主要是改变边坡应力或降低抗剪强度的外部事件，降雨是重要触发因素，强降雨或持续性降雨提高孔隙水压力、增加坡体自重，诱发失稳；地震震动破坏岩土体结构；人类工程活动扰动边坡原始平衡^[1]。常见边坡灾害分滑坡、崩塌和泥石流三类。滑坡是斜坡岩土体沿滑动面整体或分块下滑，分布广、危害大；崩塌是陡

峭边坡岩土体突然脱离母体倾覆、坠落或滚动；泥石流是沟谷或山坡上由水源激发含大量泥沙石块的特殊洪流，冲击力和破坏力强。三类灾害相互关联，形成灾害链威胁区域安全。

1.2 传统刚性工程防护方法及其局限性

传统工程防护方法有支挡结构、锚固结构、排水系统和坡面封闭等。支挡结构靠自身重量或结构强度抵抗土压力；锚固结构连接不稳定岩土体与深层稳定地层；排水系统降低地下水位；坡面封闭防止坡面风化剥蚀和小规模落石。但这些方法局限性明显：生态不友好，大面积混凝土覆盖改变地表微环境，抑制植物生长，使边坡丧失生态功能；破坏景观风貌，灰色构筑物与自然不协调，降低人居环境质量；经济成本高，材料和施工费用高昂，后期维护成本也不低，低风险边坡采用不经济；刚性结构难适应边坡微小变形，易产生裂缝加速老化，地震等动力荷载下可能脆性破坏；资源消耗大、环境污染重，缺乏可持续性，与绿色低碳理念相悖。这促使人们探索生态防护技术。

2 生态防护技术的内涵、类型与作用机理

生态防护技术的核心思想是“以柔克刚”，即利用生命体（主要是植物）及其与工程材料的有机结合，来增强边坡的稳定性并恢复其生态功能。它不是单一的技术，而是一个多层次、多要素集成的技术体系。

2.1 植物防护技术

这是最基础、最核心的生态防护形式，其有效性根植于植物根系的力学加固作用和地上部分的水文效应。植物根系如同天然的“加筋材料”，在土壤中形成三维网络结构，当边坡发生微小变形时，根系被拉伸，产生抗拔力和摩擦力，从而显著提高土体的抗剪强度，这一过

程被称为根系的“加筋作用”。研究表明,茂密的草本或灌木根系可使浅层土体的抗剪强度提高20%~50%。与此同时,植物的茎叶可以拦截降雨,减少雨滴对坡面的直接冲刷(溅蚀);庞大的根系能改善土壤结构,增加孔隙度和渗透性,加速雨水入渗,减少地表径流;植物还通过蒸腾作用消耗土壤水分,有效降低土壤含水率和孔隙水压力,从源头上削弱了水致滑坡的风险^[2]。除此之外,植被覆盖能有效防止水土流失,为小型动物和昆虫提供栖息地,促进生物多样性恢复,并形成优美的绿色景观,兼具生态与美学价值。在实践中,根据边坡条件的不同,可采用种草/植草皮、液压喷播或栽植灌木/乔木等多种方式,以实现最佳的防护与生态效益。

2.2 土工合成材料复合防护技术

单纯的植物防护在初期(植被未完全覆盖前)或面对高陡、贫瘠、易侵蚀的边坡时,往往力不从心。此时,引入土工合成材料作为临时或永久的支撑骨架,与植被结合,形成“工程+生态”的复合体系,能极大提升防护效能。常用的材料包括三维植被网、土工格室、土工布以及植被混凝土和生态袋等。三维植被网或土工格室由高分子材料制成,铺设于坡面后,可有效固定客土和种子,防止其被雨水冲走,其立体空间为植物根系提供了良好的生长环境,并能分散坡面径流,减缓流速。土工布则常用于反滤、排水或隔离,保证排水通畅的同时防止细颗粒土流失。而植被混凝土或生态袋则是将植物种子、肥料、保水剂等预先混入混凝土基材或装入可降解的生态袋中,垒砌成柔性挡墙,既能提供即时的结构支撑,又能随着时间推移,让植物根系穿透袋体相互交织,最终形成稳固的生态护面。这类技术的精髓在于,通过工程材料提供即时的物理约束和水土保持能力,为植被的萌发和生长创造“温床”,待植被成坪后,工程材料或逐渐降解,或与根系共同构成一个更强大的复合加筋体,实现从“工程主导”到“生态主导”的平稳过渡。

2.3 生态混凝土防护技术

针对岩石边坡或无法进行厚层覆土的硬质边坡,生态混凝土技术提供了一种创新的解决方案。该技术通过调整混凝土的配合比,例如增大粗骨料粒径、减少细骨料和水泥用量,制备出具有高孔隙率(通常大于20%)的多孔混凝土。这种混凝土本身具备一定的结构强度,能够满足工程稳定性的基本要求,而其内部连通的孔隙则为植物的生长提供了必需的空间、水分和养分。在实施过程中,通常会在多孔混凝土表面覆盖一层富含有机质的种植基材,或直接在孔隙中注入营养土和种子,并选用耐旱、耐贫瘠的景天科、苔藓类等先锋植物。随着时

间的推移,植物根系在孔隙中不断生长蔓延,不仅美化了坡面,更进一步增强了结构的整体性和耐久性,实现了工程防护与生态修复的有机统一。

2.4 综合防护体系

在纷繁复杂的实际工程中,很少有单一技术能完美应对所有挑战。因此,构建多层次、多功能的综合防护体系被视为最佳实践。这种体系强调因地制宜、系统思维,将多种生态防护技术进行科学组合与优化配置。例如,对于一个高陡的路堑边坡,可以在坡脚设置低矮的生态袋挡墙以提供基础支撑和防止坡脚淘蚀,在中部铺设三维植被网并进行液压喷播以稳固主体坡面,在坡顶则栽植深根性灌木以拦截上方汇水并提供深层加固^[3]。这种“上拦、中固、下挡”的立体化、系统化设计理念,能够最大化地发挥各项单项技术的优势,形成协同效应,从而在保障安全的同时,实现生态功能与景观价值的全面提升,真正达到安全、生态与美观的和谐统一。

3 典型案例分析:黄土高原地区弃渣场边坡综合治理

在黄土高原某大型水利枢纽工程施工期间,产生了巨量的弃渣,堆填后形成了数十米高的松散土质边坡。黄土本身具有大孔隙、垂直节理发育、遇水易崩解的特性,导致该弃渣场水土流失极为严重,每逢雨季便泥沙俱下,对下游河道和生态环境构成巨大威胁。针对这一难题,项目方实施了一套“分级削坡+土工格室+灌草结合”的系统治理方案。首先,将原陡峭的边坡按照1:1.75的安全坡度进行分级削坡,并修筑马道以减缓坡度、分割汇水面。然后,在每一级坡面上铺设高密度聚乙烯(HDPE)土工格室,格室内填充经过改良的、富含有机质的种植土。最后,采用高效的液压喷播技术,喷播以紫穗槐、沙打旺等豆科灌木为主,辅以披碱草、冰草等禾本科草本的混合种子,以期形成结构稳定的植物群落。治理一年后,植被覆盖度便达到了90%以上。土工格室有效锁住了表层土壤,防止了初期的水土流失,而灌木发达的根系则像无数根“天然锚杆”一样深入坡体内部,形成了强大的根-土复合体。长期监测表明,治理区的年均土壤侵蚀模数由治理前惊人的15000吨/平方公里·年,锐降至500吨/平方公里·年以下,水土保持效益极为显著。这一成功案例,为黄土高原乃至全国类似地区的弃渣场乃至矿山废弃地的生态修复提供了极具价值的可复制经验。

4 面临的挑战与未来发展趋势

4.1 主要挑战

(1) 理论体系尚不完善:目前对植物根系-土体相互作用的力学模型、根系强度的长期衰变规律、不同植物群落配置的最优模式等基础理论研究仍显不足,导致工

程设计多依赖经验,缺乏精准量化依据^[4]。(2)适用性受限:对于极高陡(>80°)、岩体极度破碎或存在深层滑动面的重大危险源边坡,纯生态或以生态为主的防护技术可能难以满足安全储备要求,仍需与传统工程措施结合。(3)初期养护成本高:植被建植初期需要大量的水、肥投入和精心管护,尤其是在干旱、半干旱地区,养护成本甚至可能超过部分简易工程措施。(4)缺乏统一的设计规范与评价标准:不同地区、不同项目采用的技术和标准各异,缺乏一套科学、权威的全生命周期性能评价体系(包括力学稳定性、生态效益、经济效益、景观价值等),不利于技术的规范化推广。

4.2 未来发展趋势

(1)智能化与数字化:结合物联网(IoT)、无人机遥感和人工智能(AI)技术,对生态护坡的生长状况、土壤墒情、边坡位移等进行实时、动态监测与智能预警,实现精准化、智慧化的养护管理。(2)材料与技术的创新:研发更多高性能、可降解、功能化的新型生态材料,如具有缓释肥效的智能土工布、能诱导特定植物生长的生物活性混凝土等。同时,探索菌根真菌、土壤微生物等生物技术在促进植物生长和改良土壤方面的应用。(3)多学科深度融合:进一步加强岩土工程、生态学、水文学、材料科学、景观设计等学科的交叉融合,建立基于“边坡-植被-水文-气候”耦合作用的系统性设计理论与方法。(4)标准化与规范化建设:加快制定和完善生态防护技术的设计、施工、验收及长期性能评估的国家或行业标准,为工程实践提供强有力的制度保障。(5)全生命周期成本效益分析:在项目决策阶段,不仅要考虑初期建设成本,更要全面评估其在整个生命周期内的生态服务价值(如固碳释氧、涵养水源、生物多样性保护)和社会效益(如景观提升、公众健康),推动其在更广泛领域

的应用。

5 结语

生态防护技术作为边坡灾害治理领域的一场深刻变革,代表着从对抗自然到融入自然的先进理念。它通过巧妙利用植物的生命力和工程材料的支撑力,构建了一个兼具工程安全性、生态可持续性和景观美学价值的“活”的防护系统。本文通过对边坡灾害成因、传统方法局限性的剖析,系统阐述了生态防护技术的内涵、类型、作用机理。展望未来,随着相关基础理论的深化、新材料新技术的涌现以及标准化体系的建立,生态防护技术必将在应对日益严峻的边坡灾害挑战中扮演更加核心的角色。它不仅是保障基础设施安全运行的有效手段,更是践行“绿水青山就是金山银山”理念、建设美丽中国的重要途径。我们应坚定不移地走生态优先、绿色发展的道路,不断推动生态防护技术的创新与应用,为实现人与自然和谐共生的现代化目标贡献力量。

参考文献

- [1]庄严.基于生态修复技术的河道治理与边坡防护措施研究[J].珠江水运,2025,(03):154-156.
- [2]袁玉伟,徐训华,尚文培,等.河堤边坡耐冲刷生态防护技术研究[C]//河海大学,浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院),浙江省水利学会.2024(第十二届)中国水生态大会论文集.黄河建工集团有限公司;黄河机械有限责任公司;中国水利水电建设工程西北咨询有限公司,;2024:831-843.
- [3]黄恒,吴子云,程越.复合生态防护技术在岩质边坡治理中的应用[J].红水河,2024,43(02):102-106.
- [4]杨彦峰.公路边坡工程-生态复合防护技术应用分析[J].工程与建设,2023,37(05):1575-1578+1611.