

市政边坡防护中新型材料与技术的创新应用探讨

周国润

五冶(广州)建设发展有限公司

DOI:10.32629/bd.v9i6.4500

[摘要] 随着我国城市化进程的不断加快,城市基础设施建设规模持续扩大,市政工程中的边坡问题日益突出。传统边坡防护方法在生态性、耐久性及施工效率等方面已难以满足现代城市可持续发展的要求。本文系统梳理了当前市政边坡防护面临的主要挑战,重点探讨了近年来在该领域涌现出的多种新型材料(如生态混凝土、土工合成材料、纤维增强复合材料、自修复材料等)与前沿技术(如植被混凝土、三维植被网、智能监测系统、BIM与数字孪生技术等)的创新应用。通过案例分析与技术对比,本文评估了各类新材料与新技术在提升边坡稳定性、改善生态环境、降低全生命周期成本等方面的综合效益,并对其未来发展趋势进行了展望。研究表明,融合生态理念、智能感知与绿色低碳的新一代边坡防护体系,将成为市政工程高质量发展的关键支撑。

[关键词] 市政边坡; 新型材料; 智能技术; 生态防护; 可持续发展

中图分类号: U418.5 **文献标识码:** A

Exploration of Innovative Applications of New Materials and Technologies in Municipal Slope Protection

Guorun Zhou

Wuye (Guangzhou) Construction Development Co., Ltd.

[Abstract] With the continuous acceleration of China's urbanization process and the continuous expansion of urban infrastructure construction scale, slope problems in municipal engineering have become increasingly prominent. Traditional slope protection methods can no longer meet the requirements of modern urban sustainable development in terms of ecology, durability, and construction efficiency. This paper systematically reviews the main challenges currently faced by municipal slope protection, focusing on the innovative applications of various new materials (such as ecological concrete, geosynthetics, fiber-reinforced composites, self-healing materials, etc.) and advanced technologies (such as vegetated concrete, three-dimensional vegetation nets, intelligent monitoring systems, BIM and digital twin technology, etc.) that have emerged in this field in recent years. Through case analysis and technical comparison, this paper evaluates the comprehensive benefits of various new materials and technologies in improving slope stability, enhancing the ecological environment, and reducing life-cycle costs, and looks forward to their future development trends. Research shows that a new generation of slope protection systems integrating ecological concepts, intelligent perception, and green low-carbon approaches will become key support for the high-quality development of municipal engineering.

[Key words] municipal slope; new material; intelligent technology; ecological protection; sustainable development

引言

边坡作为城市市政工程常见地质结构,其稳定性关乎公共安全、交通与城市景观。但受地质、降雨、人为扰动等因素影响,市政边坡易发生滑坡等灾害,威胁人民生命财产和城市运行。传统边坡防护多采用刚性结构,虽短期能控制变形,却存在

诸多弊端,如生态破坏严重、缺乏柔性、施工周期长、能耗与碳排放高、后期维护成本高且缺乏实时监测预警能力。在此背景下,探索新型边坡防护体系成为研究热点。近年来,随着多学科交叉融合,一批性能优越、环境友好的新型材料与智能技术被引入边坡防护实践,提升了市政边坡治理现代化水平。本文旨在系

统梳理这些创新成果,分析其应用效果与局限,为未来市政边坡防护技术发展提供理论参考和实践指导。

1 市政边坡防护面临的挑战

1.1 地质与气候条件复杂

城市区域地质构造多样,常存在软弱夹层、风化岩体、人工填土等不良地质体。同时,极端天气事件频发(如短时强降雨、台风),加剧了边坡失稳风险。传统防护结构对动态荷载响应能力不足,易在突发灾害中失效。

1.2 空间受限与施工干扰大

市政工程多位于建成区或人口密集区,作业面狭窄,施工机械难以展开。同时,施工过程需兼顾交通疏导、管线保护、噪声控制等多重约束,对防护技术的便捷性与低扰动性提出更高要求。

1.3 生态与景观要求提升

现代城市强调“公园城市”“海绵城市”理念,要求基础设施建设与自然环境和谐共生。传统灰色防护结构视觉单调、生态功能缺失,难以融入城市绿地系统,甚至成为“生态孤岛”。

1.4 全生命周期管理需求迫切

边坡防护不仅关注初期建设,更需考虑长期服役性能。传统方法缺乏健康状态感知能力,难以实现预防性维护,导致“小隐患酿成重大事故”的风险居高不下。

2 新型材料在市政边坡防护中的应用

2.1 生态混凝土(植被混凝土)

生态混凝土是一种具有连续孔隙结构的多孔混凝土,其内部孔隙率通常控制在15%至30%之间,既保证了一定的力学强度,又为植物根系的穿透与生长提供了通道。这种材料的核心优势在于实现了结构功能与生态功能的有机统一。在市政边坡工程中,生态混凝土多用于坡度小于45°的缓坡表面覆盖^[1]。施工方式灵活,既可现场喷射成型,也可预制构件拼装,随后在孔隙中填充富含有机质的营养基质并播种本地适生草本或灌木种子。尽管生态混凝土在生态修复方面表现优异,但其抗冲刷能力和早期强度仍有限,对于高陡或水流冲刷强烈的边坡,往往需要配合临时支护措施或与其他加固技术协同使用。

2.2 高性能土工合成材料

土工合成材料凭借其轻质、高强、耐腐蚀和施工便捷等特性,在市政边坡防护中展现出广泛应用前景。其中,土工格栅通过加筋作用显著提升土体的整体抗剪强度,广泛应用于加筋土挡墙和路堤边坡加固。近年来,玻纤格栅和玄武岩纤维格栅等新型产品因其更高的抗拉强度(可达200kN/m以上)和优异的耐碱性能,正逐步替代传统的聚酯类格栅。三维植被网则由聚乙烯或聚丙烯制成,呈立体网状结构,能够有效固定表层土壤、防止种子流失,并为幼苗提供稳定的萌发环境,常与液压喷播技术结合,用于裸露边坡的快速复绿。而土工格室通过形成蜂窝状约束单元,可填充种植土或碎石,构建出兼具结构稳定性和生态功能的柔性护坡系统,特别适用于坡脚防护和冲沟治理。

2.3 纤维增强复合材料(FRP)

纤维增强聚合物(FRP)材料,如碳纤维(CFRP)和玻璃纤维(GFRP),以其高强度、轻质、耐腐蚀及非磁性等独特优势,正在市政边坡锚固领域开辟新的应用路径。相较于传统钢材,FRP材料的抗拉强度可达其2至5倍,且完全不会发生锈蚀,尤其适用于高湿度、高盐分的滨海城市环境或地铁、隧道等对电磁干扰敏感的区域。在实际工程中,FRP锚杆可用于既有边坡结构的加固改造,也可作为新建支护体系的核心构件。尽管目前其单位成本仍高于钢材,但在全生命周期视角下,其免维护、长寿命的特点可显著降低后期运维支出^[2]。特别是在地铁出入口、桥梁桥台等空间受限且对结构可靠性要求极高的市政节点,FRP材料的应用不仅提升了边坡的安全冗余度,也避免了因钢筋锈胀导致的混凝土开裂问题,展现出广阔的发展潜力。

2.4 自修复材料

受生物自愈机制启发,自修复材料为解决边坡结构长期服役中的微裂缝问题提供了革命性思路。这类材料通过内置微胶囊、微生物或形状记忆合金等机制,在裂缝产生时自动释放修复剂,实现结构的“自我愈合”。其中,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术近年来备受关注。该技术将特定菌种(如巴氏芽孢杆菌)与营养源掺入混凝土基体中,当水分渗入裂缝激活微生物代谢时,会生成方解石晶体,从而封闭宽度达0.5毫米的微裂缝。实验室研究和小规模试点已验证其有效性,表明自修复混凝土不仅能延缓结构劣化进程,还可显著延长边坡防护工程的使用寿命。虽然该技术目前尚处于产业化初期,成本较高且长期性能数据有待积累,但其在提升市政边坡耐久性、减少维护干预方面的战略价值不容忽视,有望在未来成为高附加值市政工程的关键材料选项。

3 创新技术在市政边坡防护中的集成应用

3.1 智能监测与预警系统

随着物联网、北斗/GNSS定位、光纤传感等信息技术的成熟,边坡防护正从“经验判断”迈向“数据驱动”。智能监测与预警系统通过在边坡关键部位布设多种传感器,构建起“感知—传输—分析—预警”的闭环管理链条。例如,GNSS接收机可实现毫米级位移的实时监测,光纤光栅(FBG)传感器则能嵌入锚杆或混凝土内部,精准捕捉应变与温度变化。同时,无人机倾斜摄影技术可定期获取边坡三维模型,辅助识别表面变形、植被退化等宏观异常^[3]。更重要的是,借助人工智能算法对历史监测数据进行深度学习,系统可预测边坡失稳趋势,实现从“事后抢险”到“事前预警”的转变。深圳前海片区已建成覆盖数十个市政边坡的智能监测网络,成功预警多起潜在滑坡事件,充分证明了该技术在保障城市公共安全中的实战价值。

3.2 BIM与数字孪生技术

建筑信息模型(BIM)与数字孪生技术的融合,为市政边坡的全生命周期管理提供了强大的数字化支撑。在设计阶段,工程师可通过BIM平台进行三维建模、结构受力分析与施工工序模拟,优化防护方案并提前发现冲突;在施工阶段,BIM模型可集成进度、材料、质量等多维数据,实现精细化过程管控;进入运维阶

段后，基于实时监测数据构建的数字孪生体能够动态映射物理边坡的真实状态，支持远程诊断、风险评估与维护决策^[4]。雄安新区某综合管廊配套边坡项目即采用了BIM+GIS融合平台，不仅将施工效率提升20%，还使后期维护成本降低30%，充分体现了数字化技术在提升工程效能与管理水平方面的巨大潜力。

3.3 海绵城市理念下的雨水协同管理

在“海绵城市”建设理念指导下，市政边坡不再仅被视为被动的防护结构，而是主动参与城市水循环的生态节点。通过将边坡防护与雨水收集、净化、回用系统有机结合，可实现“源头减排、过程控制”的综合目标。具体实践中，可在生态边坡底部设置植草沟或雨水花园，利用透水铺装引导地表径流进入边坡蓄水层，并选择兼具固土与水质净化功能的植物种类（如芦苇、香蒲等）。这种“多功能边坡”不仅有效稳固了土体，还成为城市海绵体的重要组成部分，在削减峰值径流、降低内涝风险的同时，提升了区域水生态系统的韧性与服务功能，真正实现了基础设施与自然环境的协同发展。

4 综合效益评估与案例分析

4.1 技术经济性对比

表1 技术经济性对比

防护类型	初期成本(元/㎡)	使用寿命(年)	生态效益	维护频率	适用坡度
浆砌片石	300-400	20-30	差	低	<60°
混凝土挡墙	500-800	30-50	极差	中	任意
三维植草网+喷播	150-250	10-15	优	高(初期)	<45°
生态混凝土	400-600	25-40	良	低	<45°
土工格室+植草	250-350	15-25	优	中	<50°

注：数据来源于多个市政工程造价指标及文献调研。

可见，新型生态防护技术虽初期投入略高，但全生命周期成本更具优势，且生态价值显著。

4.2 典型案例：杭州亚运村周边市政边坡综合治理

为保障2022年亚运会期间的交通与环境品质，杭州对亚运村周边12处市政边坡实施了系统性整治。面对最大坡高18米、总长3.2公里的复杂工况，项目团队采取了分区分类、多技术融合的策略：在高陡段采用GFRP锚杆结合挂网喷射生态混凝土，兼顾结构安全与生态恢复；中缓坡段铺设土工格室并填充改良种植土，播种紫穗槐与狗牙根混合草种，实现快速复绿；坡脚同步建设植草沟与雨水调蓄池，强化雨水协同管理；全线布设FBG应变计与GNSS监测点，并接入城市基础设施智慧管理平台。实施一年后，边坡稳定性系数由1.15提升至1.45，植被覆盖率超90%，夏季地表温度较传统混凝土边坡低8-12℃，年雨水径流削减率达35%，水质污染物去除效果显著。运维人员通过手机APP即可实时掌握边坡状态，真正实现了“安全、生态、智慧”三位一体的现

代化治理目标，为同类工程提供了可复制、可推广的范式。

5 存在问题与未来展望

5.1 当前存在的主要问题

尽管新型材料与技术展现出巨大潜力，其推广应用仍面临多重障碍。首先，相关标准体系严重滞后，缺乏统一的设计、施工与验收规范，导致工程界对新技术持谨慎态度；其次，部分前沿材料（如自修复混凝土）缺乏十年以上的长期服役数据，难以获得业主和监管部门的充分信任；再次，生态、结构、智能等多系统集成涉及跨专业深度协同，项目管理复杂度显著提升；最后，在地方财政压力下，成本敏感性仍是制约生态技术大规模应用的关键因素。

5.2 未来发展趋势

面向未来，市政边坡防护将朝着更智能、更系统、更低碳的方向演进。一方面，材料研发将聚焦“感知—响应”一体化，如开发温敏膨胀止水材料或光催化自清洁涂层；另一方面，技术应用将强调“结构—生态—信息”深度融合，构建功能耦合、效能倍增的集成防护体系。同时，亟需加快制定《市政生态边坡工程技术规程》等行业标准，并将碳足迹评估纳入方案比选指标，推动固碳混凝土、生物基土工材料等负碳技术的应用。此外，探索社区参与式维护机制，鼓励公众共建共治城市边坡微环境，也将成为提升城市韧性与归属感的重要路径。

6 结语

市政边坡防护正经历从“刚性防御”向“柔性共生”、从“被动抢险”向“主动防控”的深刻转型。以生态混凝土、高性能土工材料、FRP锚固为代表的新型材料，显著提升了边坡的稳定性与生态兼容性；而智能监测、BIM、数字孪生等技术的深度融入，则赋予边坡“感知生命”与“自我管理”能力。未来，应进一步加强跨学科协同创新，完善标准体系，推动新材料新技术在市政工程中的规模化、标准化应用，为建设安全、绿色、韧性、智慧的现代化城市提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1]王增郎.浅谈市政道路高边坡防护施工技术[J].技术与市场,2021,28(12):72-73+76.
- [2]李婷婷.市政道路高边坡防护施工技术[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(三).[出版者不详],2025:485-488.
- [3]张鸿超.某市政道路高边坡防护施工技术分析[J].运输经理世界,2022,(16):7-9.
- [4]夏天,张亚伟.市政工程高边坡防护施工工艺[J].中国高新科技,2021,(04):47-48.