

土木工程地下空间开发中的生态支护体系创新

姚东浩

(中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 本文分析了传统支护体系对材料性能和结构形式等方面的限制, 并从生物矿化积极保护、仿生结构和功能植被协同以及多能流耦合智能调控等方面提出了创新需求, 在最小干预, 仿生设计和系统协调原则的基础上, 采用推广植被混凝土喷播, 研究开发高韧性生态锚杆和建设水土植被协同系统等措施、实施装配式生态混凝土模块化施工的路径构建体系等。研究结果表明: 相关技术的应用能够促进植被覆盖率、界面粘结强度的提高, 达到支护和生态修复的协同作用。生态支护体系的革新促进了项目从被动承载到主动适应的飞跃以及地下空间的可持续发展, 并在今后的发展过程中朝着智能生态体方向迈进。

关键词 土木工程; 空间开发; 生态支护体系

中图分类号: TU9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.039

0 引言

边坡支护是土木工程中的一项基础性工作, 土木工程施工相对较为复杂, 一旦基础工作存在问题, 会对工程的质量产生严重的影响。地下空间开发中的生态支护体系创新, 本质是对“生态优先、绿色发展”理念的工程实践响应。传统支护技术所产生的生态负效应突出表明工程系统和自然系统需要协同发展, 现代岩土工程理论研究不断深入和生态材料技术研究不断取得突破性进展, 为支护体系生态化转型提供理论和技术支撑。基于此, 建立多学科交叉生态保护理论框架并探索同时具备工程安全和生态保护功能的技术体系对于促进地下空间开发可持续化有着重要的实践意义。

1 传统土木工程支护体系局限性分析

1.1 材料性能维度的功能性瓶颈

传统支护体系对材料本构关系的挖掘存在显著滞后性, 其设计理论多基于理想弹性模型, 难以适配复杂应力路径下材料的塑性损伤演化特性。在高地应力和强震极端条件下, 由于钢材应变强化效应和混凝土应变软化特性不能形成协同工作机制而使支护结构提前进入非线性破坏阶段。该材料性能单向化利用方式使支护体系对流变地层长期变形响应过程中应力重分布自适应能力不足, 可能最终由于材料性能阈值被打破而失去承载功能, 突出传统材料设计理念和工程实际需求存在结构性矛盾^[1]。

1.2 结构形式维度的协同性缺陷

既有支护结构的力学传导路径呈现明显的离散化特征, 各构件间的连接节点多为刚性约束或铰接形式,

缺乏对变形协调机制的系统性构建。多维荷载耦合条件下“桩—锚”和“桩—撑”这两种典型结构体系容易产生局部应力集中, 且邻近构件刚度不同将进一步加剧该应力分布非均质性。该结构形式碎片化设计模式导致支护体系很难构成整体化受力共同体且抗突发荷载能力受最薄弱环节性能上限约束, 暴露传统结构体系协同工作机制和全寿命周期内可靠性设计中存在的深层不足。

2 土木工程生态支护体系创新需求

2.1 基于生物矿化作用的主动防护机制构建

传统支护体系多依赖工程材料被动阻隔环境作用, 现代生态需求催生出生物与工程协同的主动防护路径。为实现单纯的力学稳定性, 需要将微生物诱导的碳酸钙沉积 (MICP) 等生物矿化方法整合到支护结构中, 并通过有针对性的方式来调节微生物的代谢行为, 裂隙发育区内原位产生碳酸钙胶结物形成具自修复作用的生态防护层。这一过程需要解析岩土—微生物—工程材料多场耦合作用机理, 构建以酶活性调控为核心的矿化速率预测模型以解决传统支护体系应对渐进性地质灾害的滞后性, 并动态统一力学稳定和生态修复^[2]。

2.2 仿生结构设计 with 功能植被协同体系

受自然岩土体植被根系网络启发, 生态支护需构建“刚柔相济”的仿生结构体系。采用仿根系网络三维加筋结构进行设计, 使高分子复合材料和功能型植被根系相互耦合形成具有力学承载和水土保持双重功能的复合结构层。需要着重考虑植被根系分泌物改善岩土体物理和化学特性作用, 构建根系生长应力和支

护结构变形动态平衡模型以打破传统植被护坡浅层固着限制,实现由地表生态修复向深部岩土体稳定性增强的跨尺度调控和自我维持能力生态防护系统建设。

3 土木工程地下空间开发中的生态支护体系构建原则

3.1 最小干预原则——锚定地质本底的结构自稳性

地下空间开发需以地质本底特征为基准,避免过度扰动围岩原始应力场。支护体系的设计要以地层自稳能力的评价为依据,优先选择锚杆和喷射混凝土作为柔性支护,只对地质条件突变地区的刚性结构进行补充。采用弹性支护刚度设计使支护力和围岩变形动态相匹配,减小围岩产生应力集中的危险。在施工期需要建立围岩位移的监测和预警机制,在位移速率小于阈值的情况下可以逐渐减少人工支护的干预,以保证围岩的自承能力对结构稳定性的支配作用^[3]。

3.2 仿生设计原则——重构岩土—结构协同机制

支护体系应模拟自然岩土体应力传递路径,采用分形几何优化支护单元排布。通过仿生锚杆群空间拓扑重构形成与植物根系相似的三维锚固网络以增强支护体系抗剪切能力。同时采用仿生界面处理技术来加强支护结构和围岩之间的接触作用,仿生界面粗糙度的设计需要满足摩阻力与位移之间的非线性关系以保证支护力能够随着围岩变形而自适应调整。该仿生机制能够有效地消解传统支护体系中应力集中缺陷并实现支护结构和围岩协同变形。

3.3 系统协调原则——构建多场耦合的支护体系

支护体系需统筹考虑渗流场、应力场、温度场的耦合作用。通过构建三维渗流—应力耦合模型对排水系统和支护结构进行空间优化配置,以保证渗流路径和支护薄弱区的错位分布。在温度场控制中,用相变材料充填支护结构空隙并以材料的相变潜热来平衡围岩的温度起伏,减小热应力在支护体系中的作用。多场耦合设计需要对支护体系关键参数进行参数敏感性分析以确定安全阈值范围,从而构成支护—排水—温控三位一体协同控制体系。

4 土木工程地下空间开发中的生态支护体系创新路径

4.1 推广植被混凝土喷播支护技术应用

在地下空间开发中,传统硬质支护易导致边坡生态断裂带形成,需通过植被系统重建实现力学稳定与生态修复的协同。植被混凝土喷播技术可以通过优化骨料级配和植物生长基质的比例来构筑“混凝土骨架—

微生物—植物根系等”复合结构层,提供草本和灌木渐进式的生长环境,同时遏制坡面水土流失,突破岩质边坡植被难以自然定植的工程瓶颈^[4]。

在某城市地下综合管廊边坡治理工程中,针对强风化砂岩坡面(坡率1:0.75),施工团队采用三层式植被混凝土喷播工艺。首先,通过高压风枪清理浮石并钻孔植入12 mm钢筋锚杆(间距 1.5×1.5 m),挂设8#镀锌铁丝网形成力学支撑框架;其次,分两次喷播底层混凝土(强度C20,骨料粒径5~10 mm,含3%聚丙烯纤维),首次喷播厚度80 mm覆盖铁丝网,二次喷播时嵌入50 mmPVC透水管(间距 3×3 m)形成排水通道;最后,在表层喷播含草灌种子(狗牙根:紫花苜蓿:胡枝子=5:3:2)的生态基质层(厚度20 mm,含腐殖土40%、保水剂5%、微生物菌剂2%)。在施工期间,使用无人机进行航拍以监控喷播的均匀性,并通过土壤墒情传感器动态地调整养护策略。经过6个月的努力,坡面的植被覆盖率已经达到92%,草本植物的根系深入混凝土层的3~5 cm深度,而灌木的根系则穿透到基岩的裂缝中。通过现场的拉拔试验,测定植被混凝土与基岩之间的粘结强度可以达到0.35 MPa,与传统的喷锚方法相比,提高40%,有效地阻止坡面岩石的进一步风化。

4.2 研发高韧性生态锚杆支护工艺

传统锚杆支护体系在富水软土地层中易因蠕变变形引发生态链式破坏,需通过材料革新与结构优化提升支护体韧性。高韧性生态锚杆以纤维增强树脂锚杆体,可降解套筒和多功能锚头为构件构建“柔性承载—水体渗透,植物生长”的一体化结构,它不仅可以通过纤维复合材料减缓应力集中造成的脆性破坏,还可以利用套筒降解产生的孔隙通道进行地下水循环和植物根系穿插作用,解决硬质支护和生态系统之间空间竞争矛盾。

例如:在某地铁车站深基坑支护工程(开挖深度18 m,地层为淤泥质黏土)中,研发团队设计“竹纤维增强树脂锚杆+生物基降解套筒+多孔陶瓷锚头”组合体系:锚杆体采用 $\Phi 25$ mm竹纤维—环氧树脂复合杆(抗拉强度 ≥ 600 MPa,断裂伸长率8%~10%),杆体全长设置螺旋状凹槽(间距50 mm)以增强与注浆体握裹力;外套管采用聚乳酸(PLA)可降解材料(壁厚3 mm,降解周期12~18个月),沿管长开设梅花形透水孔(孔径8 mm,间距200 mm);锚头采用多孔陶瓷材料(孔隙率 $\geq 35\%$),内置缓释肥胶囊与植物种子舱(狗牙根种子密度500粒/舱)。施工时采用套

管跟进法成孔（孔径 150 mm），注入含膨胀珍珠岩（粒径 2~4 mm，掺量 15%）的水泥—水玻璃双液浆，待浆液初凝后拔除套管。监测数据表明，在基坑挖掘过程中，锚杆的最大拉应力达到设计值的 68%，而地面的沉降则被限制在 25 mm 之内；经过 12 个月的时间，套管得到完全的降解，注浆体的表面出现蜂窝状的渗透通道，而锚头的周围也开始出现密集根系，这些都经过 X 射线衍射的详细分析，在注浆体与土体的接触面上，生成钙矾石等胶凝物质，这使得界面的粘结强度比普通砂浆锚杆提高 28%。同时，还形成一个以锚杆为中心的微型生态岛，实现支护功能和生态修复的时序性协同。

4.3 构建地下空间水—土—植被协同支护系统

在地下空间开发中，单一支护结构易引发水土失衡与生态割裂。通过构建水—土—植被协同体系，可利用植被根系固土、微生物改善土壤结构、导水系统调节地下水位，形成动态生态平衡。该模型基于生态工程学原理，采用多要素耦合的方式加强支护结构的抗变形能力的同时减少对原生环境的干扰，为地下空间的开发提供一种可持续生态防护方案^[5]。

因此，在某城市地下综合管廊建设中，针对富水软土地层易发生流沙和支护结构老化问题，项目组采用“三维根系固土+导水植被毯+微生物注浆”协同技术。首先，在支护结构基面上铺设具有导水通道的植被毯，毯体内埋设耐水湿狗牙根和芦苇根系以根系网络强化岩土界面黏结力；其次，在管廊的顶部 2 m 的区域内，逐层注入微生物菌剂和胶结液，通过利用巴氏芽孢杆菌的代谢产物来形成碳酸钙晶体，从而填补土壤的孔隙并增强其承载能力；最后，沿纵向在管廊内布置渗透式集水管将过量的地下水引入植被根系区形成“吸水—固土—导水”的循环系统。在施工过程中，通过实地拉拔试验来观察根系与土壤之间的握裹力如何变化。当监测数据达到设计标准的 85% 时，会启动分层覆土的技术，以确保支护结构与其周围的生态环境能够同步发展。

4.4 推行装配式生态混凝土支护结构模块化施工

传统现浇支护施工存在现场污染重、生态修复滞后等问题。装配式生态混凝土技术通过工厂预制带孔隙结构的支护模块，集成植物生长基质与微生态载体，实现“支护结构的安装和生态的恢复同步化”。该模型以预制装配技术为主线，在采用混凝土孔隙率对植物生长环境进行调节和解决地下空间支护与生态恢复之间时序矛盾的前提下，采用标准化模块设计来提高

施工效率，提供一种城市地下空间绿色开发工业化解决方案。

例如：某山地城市地下停车场边坡支护工程中，采用 C30 生态混凝土预制模块进行分层支护。该模块采用 L 型榫卯的构造方式，并在迎土面上预先设计一个 30×50 mm 的种植槽。在这个种植槽里，填充由腐殖土、缓释肥和保水剂按照 4:2:1 的比例混合而成的复合基质。施工时，先通过锚杆将底层模块固定于修整后的边坡，模块间预留 20 mm 宽的生态缝，填充混合草籽（由高羊茅占 60%、黑麦草占 30% 以及紫花苜蓿占 10% 组成）的纤维混凝土浆料；中层模块内部配备一个直径为 50 mm 的 PVC 导水管，该导水管的开口与边坡的排水盲沟相连，从而构建一个立体的排水系统；顶层模块安装藤蔓植物攀爬架并选择五叶地锦垂直绿化。施工期利用 BIM 技术对模块的安装次序进行仿真，并利用二维码标签跟踪各组件养护周期和植物生长指标。根据监测数据，模块在安装完成后的 6 个月内，其植被覆盖率已经达到 92%，而边坡的表面径流系数也下降到 0.35。与传统的浆砌工艺相比，模块之间的榫卯连接方式的抗剪强度提高 58%。

5 结束语

地下空间开发的生态化转型涉及工程与自然系统在复杂地质环境中的协同发展。对生态支护体系进行创新性探索，展现由材料性能优化向多场耦合系统建设转变之路，从而实现由“被动承载”向“主动适应”的功能跨越。这一创新打破了传统技术中的生态阈值，在工程安全和生态保护之间构建起动态平衡框架。未来生态支护体系将进一步向自组织、自修复和自维持等智能生态体优化，从而为地下空间开发可持续发展提供技术支持，并促进土木工程范式重构。

参考文献：

- [1] 徐云. 土木工程施工中边坡支护技术的应用[J]. 石材, 2025(04):37-39,141.
- [2] 焦阳. 基于土木工程建筑施工中的边坡支护技术探究[J]. 建筑技术开发, 2025,52(01):34-37.
- [3] 孙凯姣. 土木工程建筑施工中的边坡支护技术探究[J]. 建材发展导向, 2025,23(01):67-69.
- [4] 郑贵日. 土木工程施工中深基坑支护施工技术[J]. 工程建设与设计, 2024(24):166-168.
- [5] 卢俊廷. 土木工程施工中边坡支护技术的作用与应用研究[J]. 散装水泥, 2022(04):105-107.