

文章编号: 1007-2993(2026)02-0185-08

复杂地质条件下城市快速干道高陡边坡生态护坡 技术应用研究

徐杨青^{1,2} 杨龙伟¹ 江强强¹ 李坚¹ 金拥军¹

(1. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北武汉 430064; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

【摘要】 城市快速干道的路堑边坡隐患威胁行车安全, 影响城市景观, 因此开展城市快速干道高陡边坡治理和生态防护研究尤为重要。以武汉森林大道高陡边坡为例, 基于现场地质调查和无人机航拍等技术手段, 结合研究区工程地质环境背景, 分析了该高陡边坡工程地质特征, 提出了支挡和生态修复的综合治理设计方案, 其中支挡设计包括锚索板肋式挡土墙、锚索排桩式挡土墙、重力式挡土墙和人字形格构, 生态修复设计则以厚层基材喷射技术、植生袋+挂网客土喷播绿化、绿色罩面网+爬藤植物+垂吊植物绿化以及栽植草灌植物绿化为主。实践表明, 该生态防护方案提高了高陡边坡稳定性, 达到预期生态复绿效果。基于此, 提出多维立体综合边坡生态防护技术理念, 建立城市快速干道高陡边坡生态修复评价体系。研究成果可为城市快速干道高陡边坡的工程加固和生态修复设计提供参考。

【关键词】 高陡边坡; 生态护坡; 支挡设计; 生态修复设计; 城市快速干道

【中图分类号】 P642.22

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0548

Application of ecological protection technology for high and steep slope of urban expressway under complex geological conditions

XU Yangqing^{1,2} YANG Longwei¹ JIANG Qiangqiang¹ LI Jian¹ JIN Yongjun¹

(1. Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd. of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430064, Hubei, China;
2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

【Abstract】 The hidden dangers of road cuts and slopes during the construction of urban expressways seriously threaten driving safety and affect urban landscape. Therefore, it is particularly important to strengthen the research on ecological protection of high and steep slopes on urban expressways. This research takes the high and steep slope of Wuhan Forest Avenue as an example, based on on-site geological investigation and drone aerial photography technology, combined with the engineering geological environment background of the research area, analyzes the geological characteristics of the high and steep slope engineering, and proposes a comprehensive ecological governance design scheme for support and greening. The support design includes anchor plate rib retaining wall, anchor row pile retaining wall, gravity retaining wall, and herringbone grid structure. The greening design mainly includes thick layer substrate spraying technology, planting bags + hanging net soil spraying greening, green cover net + climbing plants + hanging plants greening, and planting grass and shrub plants greening. Practice has shown that this ecological protection scheme has improved the stability of steep slopes and achieved the expected ecological greening effect. Based on this, this research proposes the concept of multi-dimensional comprehensive slope ecological protection technology and establishes an ecological restoration evaluation system for high and steep slopes on urban expressways. The above research results can provide reference for the engineering reinforcement and ecological protection design of high and steep slopes on urban expressways.

【Key words】 high-steep slope; ecological slope protection technology; retaining support design; ecological restoration design; urban expressway

0 引言

城市快速干道速度快、容量大, 提升了城市交通

运输能力, 保证了城市的快速发展。但是城市快速干道在建设中产生大量的填方和挖方高陡边坡, 致使原

基金项目: 国家自然科学基金(42007279); 中煤科工集团有限公司科技创新创业项目(ZZYF202313)

作者简介: 徐杨青, 男, 1965年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 2008fall@163.com

生坡体植被遭到破坏,形成了大小不一的裸露山体,在降雨和工程扰动等作用易诱发崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害,如不进行综合治理,则会严重威胁公路行车安全,破坏了局部地区生态环境^[1-2]。因此,如何加强城市快速干道高陡边坡生态防护,一直是工程建设领域的研究热点和难点。

广大专家学者对公路高陡边坡生态防护开展了深入研究,围绕高陡边坡失稳机理、稳定性评价、防治设计和生态复绿等方面取得了丰硕成果。在高陡边坡失稳机理方面,汪儒鸿等^[3]利用数值模拟方法对“上缓下陡”地形的土质公路高边坡进行分析,提出了该地形下的边坡关键块体的破坏模式。雷航等^[4]以四川盆地西部的公路高边坡为例,通过工程类比和数值模拟等方法,主要分析了红层公路滑坡演化过程和防治措施。在高陡边坡稳定性方面,巨能攀等^[5]以安徽汤屯高速公路为例,通过整合强度理论与变形理论方法,系统提出了公路高陡边坡稳定性评价及防治设计技术流程。吕敬富等^[6]基于三维数值模拟计算方法研究了隧道开挖、桩板墙加固对公路边坡稳定性的影响,并对比滑桩敏感性参数进行了分析。在高陡边坡设计方面,许浒等^[7]基于离散元-有限元耦合模型对渝黔线高速公路的高陡边坡落石运动轨迹进行了模拟,分析了引导式柔性缓冲系统受到落石撞击后的结构变形与损伤耗能效应。陈昌富等^[8]针对近10年来的山区公路边坡稳定性智能分析、计算评价、防护加固、滑坡智能预测、结构面智能识别及参数反演等方面进行了系统总结。在高陡边坡生态修复设计方面,王耀建等^[9]以深圳市梧桐山道立边

坡为例,综合使用了V形槽+挂双层网喷混植生等技术,有效地改善了边坡生态环境和自然景观。赵冰琴等^[10]系统总结了边坡生态修复技术,提出了从生境构筑方法的角度将工程扰动区边坡生态修复技术分为4类,并分析了各自的适用范围及优缺点。邓辅唐等^[11]从高速公路边坡生态恢复原理、植物选择、工艺措施和客观评价等方面系统总结了我国高速公路边坡生态防护技术。上述这些研究为城市快速干道公路高陡边坡生态护坡研究提供重要参考。

本文以武汉森林大道高陡边坡为典型研究案例,基于工程地质调查和无人机航拍等方法,分析该高陡边坡工程地质特征,制定支挡和复绿综合生态治理设计方案,提出多维立体综合边坡生态防护技术理念,建立城市快速干道高陡边坡生态修复评价体系,为类似的城市快速干道高陡边坡生态防护提供借鉴。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

武汉森林大道位于武汉市东湖经济开发区内,比邻东湖风景区,是高标准建设的城市快速干道和景观大道。该线路走向沿老武黄路自西向东,起于武汉三环线,止于武鄂高速,线路总长约18 km。森林大道建设过程中,在鸡公山附近因道路开挖形成高度10~30 m的路堑边坡(以下简称“森林大道高边坡”,见图1),为保障道路行车安全和城市景观建设需求,亟须对森林大道高陡边坡进行生态护坡治理。

1.2 工程地质条件

研究区地形地貌主要以冲洪积平原、剥蚀堆积平原及基岩剥蚀丘陵为主,高程范围在25~80 m,地



图1 森林大道高陡边坡群

Fig. 1 High and steep slope clusters on Forest Avenue

形起伏较大。覆盖层主要以新近填土、残坡积黏性土及黏土夹碎石等为主。基岩以泥岩、黏土夹碎块石和石英砂岩等为主,且节理较为发育。地下水主要以浅表填土层中的上层滞水和基岩裂隙水为主。此外,道路路堑工程建设改变了原有坡体的应力场分布和地下水渗流通道,加剧了岩体的破碎程度,为边坡失稳提供了工程外力条件。

由此可见,研究区存在不利于边坡稳定的地形、物源和水文地质条件,在人类工程扰动和强降雨等因素诱发下,研究区内极易诱发高陡边坡地质灾害,威胁公路行车安全,严重影响城市景观。由于研究区地处城市主干道,如何将高陡边坡防治与城市主干道景观设计需求相结合显得尤为重要。

2 边坡灾害演化特征

通过现场调查和无人机航拍等方法,查明了高陡边坡灾害空间分布情况,从高陡边坡的岩性特征和稳定性评价等方面出发,分析了边坡灾害形成机制,为后续生态防护设计提供依据。

在岩性方面,森林大道高陡边坡群主要地层以泥岩、黏土夹碎块石和石英砂岩等3种类型为主。对于泥岩边坡,其地表主要覆盖为素填土,由此形成了素填土-泥岩二元结构,属于典型的易滑地质结构。在连续降雨情况下,雨水易沿着素填土入渗,在素填土-泥岩交界处汇集形成了地下水,且泥岩呈现全风化-中等风化状态,具有弱膨胀性,在雨水浸泡作用下,岩体强度急剧降低,进而诱发滑坡。由此可见,泥岩边坡破坏主要呈现浅层表面滑塌模式。

对于黏土夹碎块石边坡,由于黏土具有弱膨胀性,遇水后发生膨胀软化、失水,导致坡体急剧开裂。

由于黏土夹杂碎块石,在雨水入渗的作用下,块石与黏土间的胶结力减弱,块石则会崩落运动,黏土吸水膨胀并软化,强度急剧降低,且土体容重增大,进而诱发边坡灾害。

对于石英砂岩边坡,由于坡体母岩主要呈现强风化状态,在雨水等外力作用下岩体呈现松散体,易于在坡体表面形成小型崩滑碎屑流灾害。

在稳定性方面,由于城市快速干道边坡开挖形成了坡比为1:0.75和1:1.00的人工高边坡,边坡高度为10~30 m。部分区域岩体中发育有多组节理,将岩土体切割成网格状。基于极限赤平投影和极限平衡法等开展计算,各边坡稳定性系数范围为0.99~2.57。根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013),一级边坡一般工况下的边坡稳定安全系数不小于1.35,地震工况下边坡稳定安全系数不小于1.15,而森林大道边坡群中大部分边坡稳定性不能满足规范要求,一旦环境条件发生变化,边坡可能发生失稳破坏,需要尽快进行综合治理。

森林大道高陡边坡发育有易滑地质结构,工程开挖卸荷改变了坡体应力分布状态,使之出现不平衡受力及滑动空间,进而诱发滑坡灾害。

3 治理方案

3.1 设计思路

为了保证公路行车安全,需要确保路堑边坡整体稳定,并对局部不稳定段进行防护治理。同时为实现城市主干道环境美观协调,需要对边坡进行复绿处理,复绿设计主要结合现场实际情况,选定合适的复绿植物,使其与支挡结构、坡体等充分融合。森林大道高边坡治理措施分布情况见图2。

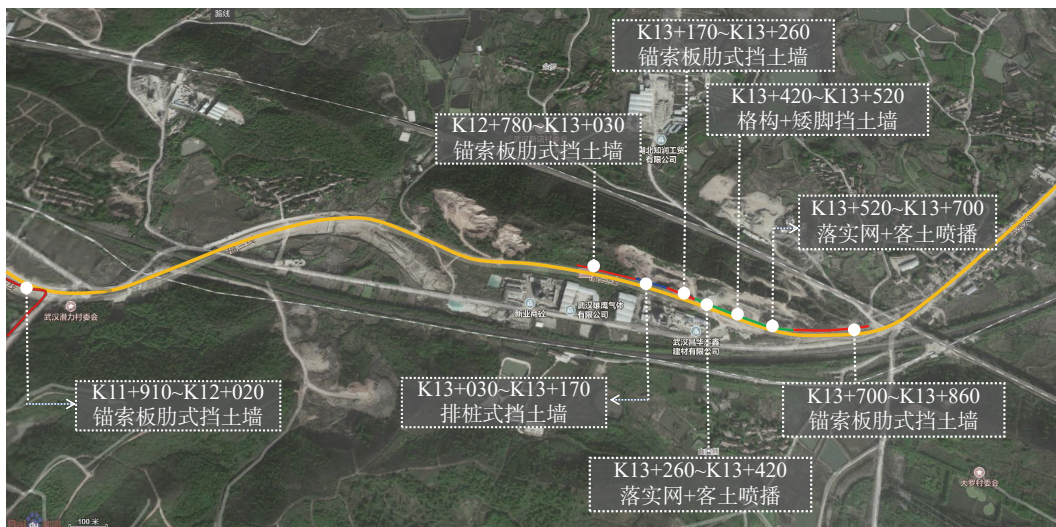


图2 工程治理措施分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of distribution of engineering control measures

3.2 边坡护坡设计

根据 3.1 节制定的生态护坡治理思路,详细构建了森林大道护坡设计的综合方案,主要可归纳为 3 类:支挡结构设计、坡面防护设计和排水工程设计。

3.2.1 支挡结构设计

(1)锚索板肋式挡土墙

锚索板肋式挡土墙结构主要由锚索和现浇带肋

钢筋混凝土板等组成,结构主要依托锚索的拉力来维持挡土墙的平衡(见图 3(a)),适用于需要较大高度支撑、空间条件受限、地质条件较差的部位。锚索采用无黏结钢绞线,其竖横间距为 3 m×3 m,倾角为 15°,单锚设计轴向拉力值为 300 kN,预应力锁定值为 150 kN。

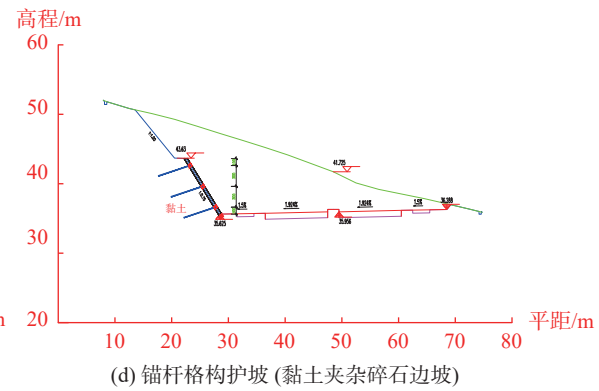
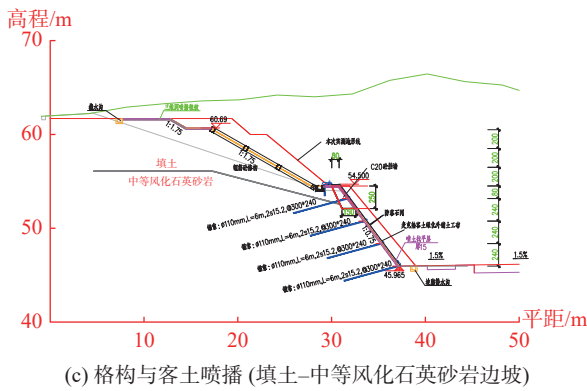
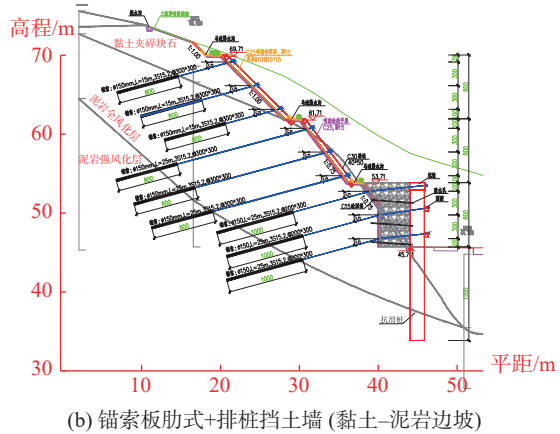
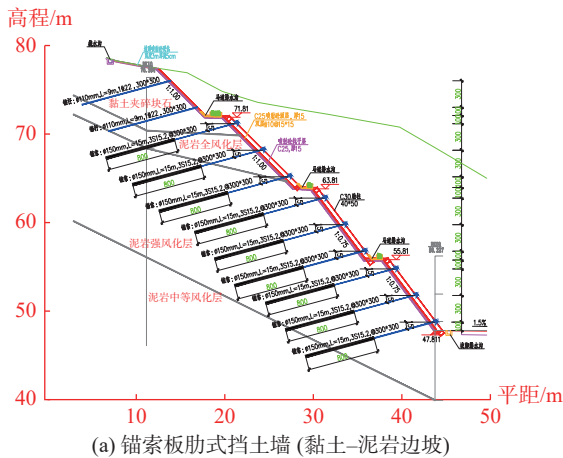


图 3 护坡设计典型剖面

Fig. 3 Typical section of slope protection design

(2)锚索排桩式挡土墙

锚索排桩式挡土墙是基于排桩(或称为桩列)与预应力锚索技术相结合的综合挡土结构(见图 3(b))。本项目中锚索排桩式挡土墙结构中的抗滑桩间距 2.5 m,采用旋挖成孔,桩身截面为圆形,桩径为 1.8 m,桩间土采用喷锚支护。共设置 3 排锚索,其中第一排锚索设置在冠梁上,有效提高了边坡稳定性。

(3)重力式挡土墙与人字形格构

本项目也采用了重力式挡土墙和人字形格构,其中重力式挡土墙主要由混凝土或石块等重型材料建造而成,墙高 2.5 m,面坡坡率为 1 : 0.75,背坡坡率为 1 : 0.2,墙顶宽度为 0.8 m,基础为强-中等风化石英砂岩,采用 C20 砼现浇。人字形格构梁由两个斜向构件组成(见图 3(c)),在顶部交汇形成“人”

字形,并在底部固定于基座上,可以有效分散荷载,提高格构梁的整体稳定性,人字形格构梁间距为 3 m(宽)×2 m(高),采用 C25 砼现浇,格构梁间主要通过培土植草来进行植被防护(见图 3(d))。

3.2.2 坡面防护设计

针对森林大道高陡边坡落石灾害,主要采用主动防护网进行处置。落石防护网为 STG-100 型主动防护网,防护网锚杆长度 6 m,间距 3 m(宽)×2.4 m(高)。防落石网内铺设加筋麦克垫与无纺布,并进行喷播绿化处理。

3.2.3 排水工程设计

降雨是森林大道高陡边坡失稳的重要影响因素,为拦截并导排边坡区域的地表水,在边坡坡顶设置截水沟,在坡脚处设置排水沟,截、排水沟中空净尺寸

为 600 mm×800 mm。在边坡马道上设置排水沟,排水沟中空净尺寸为 400 mm×400 mm。同时,在坡顶地势较低的位置上设置检修步梯,兼做坡道排水沟使用。在检修步梯的顶部、马道上和坡底设置集水井,汇聚截水沟来水并通过检修步梯排向坡底,马道中间和坡底集水井兼做消能池使用。上述边坡截排水措施可以显著减少降雨在坡面上的滞留时间,减小降雨工况对边坡的不利影响。

3.3 生态设计

在以锚索板肋式挡土墙、排桩式挡土墙、主动防护网等为主的高边坡综合治理设计的基础上,结合城市景观大道建设的需要,提出了厚层基材喷射技术、

植生袋+挂网客土喷播绿化、绿色罩面网+爬藤植物+垂吊植物绿化以及栽植草灌植物绿化为主的总体复绿方案,具体设计如下。

3.3.1 厚层基材喷射技术

厚层基材喷射植被护坡技术,是利用改进后的混凝土喷射机将搅拌均匀的厚层基材混合物按照设计厚度喷射到岩石边坡上,进而通过实现改善地上生物量的水文效应和力学加固效应来实现植被护坡的目的。本方案中主要是在主动防护网支护的边坡段上进行,通过坡面挂网、锚杆固定、客土喷播等技术手段来实现边坡复绿(见图 4)。



图 4 森林大道边坡主要支挡与复绿设计

Fig. 4 Main retaining and greening design for the slope of Forest Avenue

3.3.2 植生袋+挂网客土喷播绿化

植生袋与挂网客土喷播方案主要是针对采用板肋式挡土墙支护的边坡段,通过锚杆施工、堆放植生袋、网片覆盖、客土喷播等技术手段来进行边坡复绿。

3.3.3 绿色罩面网+栽种植物绿化

绿色罩面网采用自上而下进行铺设,采用垫片压住网子,并用螺栓套筒将膨胀螺栓的螺丝拧紧至垫片夹住罩网,使罩网紧贴坡面即可。然后在种植槽内回填种植土,其厚度不小于 40 cm。在植物选择方面,爬壁藤主要选用爬山虎、常春藤等品种,株间距为 20 cm;在种植槽内较宽处种植石楠树、紫荆、速生紫薇等乔灌木;全线段种植槽内色块苗木采用红叶石楠、金丝桃、金森女贞、大叶黄杨、小叶栀子花,绿化规格为 49 株/m²。

对于种植槽宽度大于 100 cm 的区域,采取上层植物为桂花、樱花、红叶石楠、紫薇,中层采用红叶石楠球、大叶栀子花球;对于种植槽宽度小于 100

cm 的区域,无法栽植乔木及灌木,只能通过种植红叶石楠球、大叶栀子花球及金森女贞球等球类植物,进而实现植物分布呈现立体种植,实现合理密植的效果。

3.4 边坡治理效果

通过对森林大道高陡边坡的工程地质条件和稳定性进行综合分析,结合城市干道生态景观建设要求,对森林大道高陡边坡采取了相应的支挡防护与生态复绿措施(见图 4)。通过精心培植与养护,各段边坡植被长势良好,达到了一定的绿化效果(见图 5)。通过对边坡进行监测,坡体及支护结构体系变形稳定,最大位移小于 20 mm,未见明显的增长趋势,边坡处于稳定状态。

4 多维立体综合边坡生态防护技术理念

城市快速干道是城市道路网的主要骨架,也是城市对外宣传的重要窗口,受沿线地形地貌影响,其在建设过程中不可避免地存在高填深挖路段,会对沿线的生态环境造成严重破坏,破坏原生植被生存条件,



图5 治理前后效果对比图

Fig. 5 Comparison of effects before and after governance

影响植物群落演替和生物多样性,压缩动物生存空间,此外还会加剧水土流失,易诱发崩塌、滑坡等地质灾害^[12-13]。当前运用较多的治理措施包括支挡设计和复绿设计,以此来提升边坡稳定性和修复生态环境。

在支挡设计方面,主要以提高边坡稳定性为主^[14],包括传统措施(抗滑桩、锚索(杆)、格构锚固、抗滑挡墙等)和新型绿色支护技术等为主,其中绿色支护技术体现“绿色、环保、低碳”等特点,主要体现在绿色装配式边坡支护结构,如绿色装配式土钉墙支护等,充分提高了支护结构的使用效率,有效地节约工期和控制成本。

在复绿设计方面,随着客土喷播和湿法喷播技术的普及,生态防护技术呈现多样化,主要方法有格构法、植被混凝土护坡、植生带、网袋法、液压喷播、厚基质喷层等技术^[15-16]。在植被选择方面,需要综合考虑系统多样性、满足工程可持续发展的宗旨,通常采用灌木与草本相结合的种植方式,着重工程研究区

乡土植物的选用,使之达到尊重自然、顺应自然和恢复自然的效果。

在众多城市高陡边坡生态护坡实践过程中,逐渐形成了安全、绿色和可持续发展理念,结合项目区域工程地质环境,合理选用支挡结构和生态修复措施,以期达到边坡防治安全和生态平衡要求^[17]。但是,在具体工程实践过程中,受工程周期和工程造价制约,高陡、破碎岩质边坡、矿山污染边坡等生态恢复较难,生态恢复效果最终出现“一年绿,两年黄,三年死光光”等现象,其核心本质是忽视支护与生态防护技术的综合使用,过于单一地使用某一复绿措施,这种单一复绿设计难以重建坡体土壤肥力,进而很难实现高陡、破碎岩质边坡的绿化。

鉴于此,本文以武汉森林大道高陡边坡为例,提出一种多维立体综合边坡生态防护理念,其技术路线如图6所示。在已有技术的基础上,将工程支护结构、植生袋护坡、植物混凝土、爬藤植物等多种技术

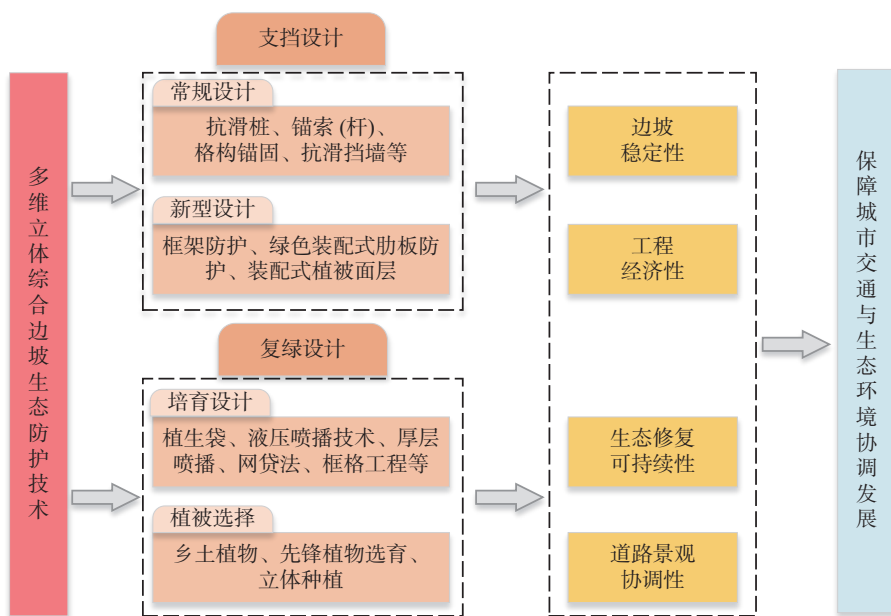


图6 多维立体综合边坡生态防护技术技术路线

Fig. 6 Technical route of multi-dimensional integrated slope ecological protection technology

相结合,形成优势互补的新生态防护技术,或者将上述多种技术进行组合创新形成新生态防护技术,如植生条带+厚层基材喷射技术、加筋土生态边坡、固废基材-土壤改良技术、原位土壤改良+植被重建技术等,有效实现城市道路高陡边坡安全、生态修复可持续性、景观协调性及工程经济性等多方面的综合需求,将生态防护技术拓展至边坡加固、水土保持、生态重建、水污染处理等诸多工程领域,即可称为多维综合边坡生态防护。

现有公路高陡边坡生态修复评价技术主要是通过常规的复绿效果和现场监测来进行评价,缺乏系统客观的评价方法。针对边坡生态修复综合评价体系,需要从多方面来进行评价体系的建立。在边坡机理方面,需要明确植物根系固坡机理,推导根系固坡作用下边坡稳定性变化情况,明确植物演替及生态修复过程中的影响因子及权重。在工程区域范围内,需要在区域小气候范围内开展碳汇计算研究,定量综合评价边坡生态修复效果。

综上,持续开展多维立体综合边坡生态防护和生态修复评价,对于高陡边坡生态防护应用研究成体系化至关重要,也是今后研究的重要方向。

5 结论

(1)森林大道高陡边坡群坡体岩性主要以泥岩、黏土夹碎块石、石英砂岩 3 种类型为主,部分区域岩体中发育有多组节理裂隙。边坡高度为 10~30 m,一般工况下边坡稳定性系数为 0.99~2.57,在工程开挖卸荷和强降雨的影响下,极易诱发滑坡灾害。

(2)森林大道护坡设计主要涉及到支挡结构设计、坡面防护设计和排水工程设计,复绿设计以 TBS 边坡绿化、植生袋+挂网客土喷播绿化、绿色罩面网+爬藤植物+垂吊植物绿化以及栽植草灌植物绿化为主,提高了边坡稳定性,确保道路车辆运行安全,增加了道路景观协调性,形成了美观的交通门户。

(3)多维立体综合边坡生态防护体系的核心要义是基于支挡设计和复绿设计相结合,实现边坡稳定性、工程经济性、生态修复可持续性和道路景观协调性,进而保障城市交通与生态环境协调发展。

参 考 文 献

[1] 潘树林,王 丽,辜 彬.论边坡的生态恢复[J].生态学杂志,2005,24(2):217-221.(PAN S L, WANG L, GU B. Analysis of recoverable method for slope ecotope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(2): 217-221. (in Chinese))

[2] 邓友生,孙雅妮,赵明华,等.微型桩-香根草协同护坡试验与计算研究[J].中国公路学报,2020,33(7):68-75.(DENG Y S, SUN Y N, ZHAO M H, et al. Experimental and calculation analysis of slope protection by collaborated micropiles and Vetiver[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 68-75. (in Chinese))

[3] 汪儒鸿,周海清,彭国园.结构性土坡变形破坏数值模拟方法的对比分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):47-52.(WANG R H, ZHOU H Q, PENG G Y. Comparative analysis on numerical simulation of methods used in structural soil slopes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 47-52. (in Chinese))

[4] 雷 航,刘天翔,程 强.红层地区公路高边坡变形机理及支护措施研究[J].公路,2019,64(12):47-53.(LEI H, LIU T X, CHENG Q. Study of deformation mechanism and support measures for high slope of highway in red bedding areas[J]. Highway, 2019, 64(12): 47-53. (in Chinese))

[5] 巨能攀,赵建军,邓 辉,等.公路高边坡稳定性评价及支护优化设计[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1152-1161.(JU N P, ZHAO J J, DENG H, et al. Stability evaluation of high slope for highways and optimized support design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1152-1161. (in Chinese))

[6] 吕敬富,杜江梅,罗泽军,等.岩口公路隧道高陡边坡稳定性及支护参数研究[J].现代隧道技术,2020,57(5):116-124.(LV J F, DU J M, LUO Z J, et al. Research on the stability and supporting parameters of high-steep slope of yankou highway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(5): 116-124. (in Chinese))

[7] 许 浒,邹 鹏,余志祥,等.山区公路高陡边坡引导式柔性缓冲系统的设计方法[J].中国公路学报,2022,35(9):235-246.(XU H, ZOU P, YU Z X, et al. Design approach of guided flexible protection system for high and steep slope of mountain highways[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 235-246. (in Chinese))

[8] 陈昌富,李 伟,张嘉睿,等.山区公路边坡工程智能分析与设计研究进展[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):15-31.(CHEN C F, LI W, ZHANG J R, et al. State-of-the-art of intelligent analysis and design in slope engineering of highways in mountainous areas[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 15-31. (in Chinese))

[9] 王耀建,王永喜,夏 兵,等.基于喷混植生的高陡岩质边坡生态修复新思路——以梧桐山道立交边坡为例[J].中国水土保持,2019(1):29-31.(WANG Y J,

- WANG Y X, XIA B, et al. New ideas on ecological rehabilitation of high and steep rock slope based on concrete spray-planting-turf[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(1): 29-31. (in Chinese))
- [10] 赵冰琴, 夏振尧, 许文年, 等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 130-137. (ZHAO B Q, XIA Z Y, XU W N, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 130-137. (in Chinese))
- [11] 邓辅唐, 吕小玲, 邓辅商. 高速公路边坡生态恢复研究进展 [J]. 中国水土保持, 2005(11): 48-50. (DENG F T, LV X L, DENG F S. Progress of study on ecological rehabilitation of expressway slopes[J]. Soil and Water Conservation in China, 2005(11): 48-50. (in Chinese))
- [12] 胥晓刚, 杨冬生, 胡庭兴. 公路区域生态破坏及植被恢复技术应用与研究进展 [J]. 中国园林, 2005, 21(1): 51-54. (XU X G, YANG D S, HU T X. Discussion on the road environment destruction and vegetation restoration[J]. Chinese Landscape Architecture, 2005, 21(1): 51-54. (in Chinese))
- [13] 王恭先. 滑坡防治方案的选择与优化 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3867-3873. (WANG G X. Choice and optimization of landslide control plan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3867-3873. (in Chinese))
- [14] 邹凤超, 彭国涛, 许小娟, 等. 边坡植被恢复技术体系及应用模式 [J]. 北方园艺, 2010(19): 127-130. (KUI F C, PENG G T, XU X J, et al. Study of technology system of slope vegetation recovery and its application models[J]. Northern Horticulture, 2010(19): 127-130. (in Chinese))
- [15] 刘必炜. 浅析绿色公路设计理念及应用 [J]. 福建交通科技, 2018(3): 50-53. (LIU B W. A brief analysis of the design concept and application of green highways[J]. Fujian Transportation Technology, 2018(3): 50-53. (in Chinese))
- [16] 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等. 黄土-泥岩接触面滑坡的特征与成因 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1167-1175. (WU W J, SU X, LIU W, et al. Loess-mudstone interface landslides: characteristics and causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1167-1175. (in Chinese))
- [17] 殷跃平. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 5-6. (YIN Y P. Geological hazard risk investigation and evaluation methods and its application practice[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 5-6. (in Chinese))

收稿日期: 2024-11-26