

道路边坡失稳机理及综合防护技术研究

夏 恒

湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]道路边坡失稳是公路工程中常见的地质灾害类型,严重影响道路建设与运营安全。文中系统分析了道路边坡的失稳机理与综合防护技术。首先,对道路边坡进行分类并总结其典型失稳模式,剖析了边坡失稳的内在与外在影响因素,阐述了边坡变形破坏的阶段性演化过程及常见失稳机理。其次,从排水防护、支挡加固、生态防护三个维度梳理了综合防护技术体系及其协同应用方式。最后,从勘察设计、施工控制、监测预警和长期维护四个环节提出了边坡安全管理的优化措施。研究表明,建立全寿命周期的安全管理体系是保障道路边坡长期稳定的有效途径。

[关键词]道路边坡;失稳机理;防护技术;支挡加固;生态防护

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20199

中图分类号: TU4

文献标识码: A

Research on the Mechanism of Road Slope Instability and Comprehensive Protection Technology

XIA Heng

Hubei Road & Bridge Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Road slope instability is a common geological hazard in highway engineering, which seriously affects the safety of road construction and operation. The article systematically analyzes the instability mechanism and comprehensive protection technology of road slopes. Firstly, the road slopes were classified and their typical instability modes were summarized. The internal and external influencing factors of slope instability were analyzed, and the phased evolution process of slope deformation and failure and common instability mechanisms were elaborated. Secondly, the comprehensive protection technology system and its collaborative application methods were sorted out from three dimensions: drainage protection, support reinforcement, and ecological protection. Finally, optimization measures for slope safety management were proposed from four aspects: survey and design, construction control, monitoring and early warning, and long-term maintenance. Research has shown that establishing a safety management system throughout the entire lifecycle is an effective way to ensure the long-term stability of road slopes.

Keywords: road slope; instability mechanism; protective technology; support and reinforcement; ecological protection

引言

伴随着我国交通基础设施建设向山区、丘陵等地质条件复杂的区域延伸,道路边坡失稳问题也越来越严重,不仅会造成工程上的经济损失,而且会直接危及行车的安全。边坡稳定性受地质构造、岩土性质、水文条件、人类工程活动等因素的影响而变得复杂,它的失稳机理繁杂多样,破坏模式也多种多样。近年来,学术界与工程界围绕边坡稳定性分析与防护技术开展了大量研究,形成了涵盖排水工程、支挡结构、生态修复的综合防护技术体系,但仍存在重治理轻预防、重工程轻生态、重建轻管等问题。本文根据失稳机理的系统分析,整理出综合防护技术,从全生命周期管理的角度出发提出安全管理优化措施,以期给道

路边坡工程实践提供一定的参考。

1 道路边坡失稳机理分析

1.1 道路边坡类型及主要失稳模式

道路边坡是人工改变斜坡自然形态和稳定状态的结果,其变形破坏模式主要是由坡体地质结构所控制的。常见的路基边坡坡体地质类型有土质边坡、岩质边坡、岩土混合边坡、类土质边坡、类混合边坡五种。土质边坡主要由厚层土体组成,坡体均质性好,失稳模式主要为牵引式滑移、圆弧形滑动,滑动面多呈圆弧状切穿土体。岩质边坡主要由岩体组成,稳定性受岩层层面、软弱夹层和节理裂隙等结构面的组合控制,常常沿着控制性结构面发生滑动、崩塌或者倾倒,破坏具有突然性。岩土混合边坡是由

岩体和上覆土体共同组成的，失稳模式有土体内部弧形滑移和沿岩土界面或者软弱夹层的滑移变形，破坏形式比较复杂。类土质边坡是由深厚全、强风化岩构成的，其稳定性受原岩中结构面影响，破坏模式介于土质边坡和岩质边坡之间。类混合边坡指边坡上部为时效变形明显、可能沿渗漏面发生破坏的岩体。不同类型的边坡失稳模式差别很大，正确识别边坡类型是开展稳定性分析和防护设计的前提。

1.2 边坡失稳影响因素分析

影响边坡稳定的因素很多，正确分析这些因素是评价边坡稳定性和预测发展趋势的前提。影响斜坡稳定性的因素分为内在因素和外在因素两类，内在因素包括斜坡岩土类型、性质、地质结构等，对斜坡变形破坏的形式、规模及稳定性起着控制作用，外在因素包括水的作用、风化作用、地震、人为因素等，通过内在因素对斜坡稳定性产生破坏作用^[1]。岩土体物理力学性质决定边坡抗滑性能，软弱夹层和结构面的组合情况决定了边坡破坏的方式和程度。边坡变形破坏是由内因和外因共同作用所造成的，岩土体性质不良为内因，坡脚开挖、地表水下渗为外因。外在因素中水起着非常重要的作用，地下水不但会降低岩土体的抗剪强度，还会产生静水压力和动水压力，是引起边坡失稳的最常见外部因素。

1.3 边坡变形破坏演化过程

边坡的变形破坏不是瞬间完成的，它会从量变到质变地逐渐发展。具有蠕变特征的边坡，变形开始到整个滑动破坏过程一般可分为初始变形、等速变形、加速变形这三个阶段。初始变形阶段边坡在自重应力和卸荷回弹的作用下产生局部微裂隙、表部松动，变形速率低且逐渐衰减，坡面宏观特征变化不大。等速变形阶段，坡体沿着潜在滑动面不断蠕动，变形速率基本保持不变，坡面上出现明显的张裂缝，但是还没有完全贯通，坡体的整体稳定程度逐渐降低。加速变形阶段，坡体变形速率突然增大，累积位移、变形速率、加速度等监测指标出现明显变化，加速度在斜坡接近临滑阶段前后有较大的差别，临滑前突然增大。边坡变形破坏在降雨作用下，水进入软化接触面，降水入

渗使剪应力逐渐增大，潜在滑动面慢慢贯通，最后造成整体失稳。

1.4 常见失稳机理分析

边坡失稳机理由于边坡类型、地质条件以及引发因素的不同而表现出不同的特点。张拉-剪切复合破坏是土质及岩土混合边坡中常见的机理，由固结未完成的填土和软弱岩层组成的二元结构坡体，坡顶易出现拉剪应力集中形成裂缝，随着变形发展，滑坡中部锁固段剪断致使后缘拉裂面与前缘剪切面贯通，最终导致滑坡失稳。降雨入渗软化机理最为普遍，雨水入渗使岩土体含水率升高、基质吸力降低，开挖及降雨条件下，坡体应力状态改变，地下水位上升导致岩土体抗剪强度降低，最终诱发深层滑移破坏。岩质边坡稳定性受外倾结构面倾角大小及性状影响较大，外倾结构面倾角小于坡面倾角时，倾角越陡越不利于稳定，结构面有夹泥时失稳可能性明显增大。结构面对斜坡稳定性的影响主要取决于结构面的强度、展布范围和密集程度，软弱结构面抗剪强度最小，沿软弱面发生滑动的大型滑坡较为多见。卸荷松弛机理主要发生在路堑开挖边坡中，坡脚开挖导致侧向应力解除，坡体沿结构面发生松弛回弹。

2 道路边坡综合防护技术研究

2.1 边坡排水防护技术

水是引起边坡失稳最活跃的外部因素，完善排水系统是边坡防护的第一步。地表截水措施主要有截水沟、阻水堤，地下截水措施有充气截排水。挖方路段地表排水设施主要由截水沟、平台沟及边沟组成，边沟下设纵向盲沟；填方路段主要由排水沟和涵洞组成；填挖方段坡面常设置泄水孔排除地下水，排水洞、水平排水孔、盲沟及竖井皆可应用。截水沟要依照地形、地质状况沿着等高线设置，把拦截到的地面水顺畅地排向自然沟谷，防止坡面冲刷和雨水入渗。地下水丰富边坡的水平排水孔、排水洞能起到降低地下水位、减小孔隙水压力的作用。支挡结构后面应做好滤水层，必要时应做排水暗沟，以防止墙后积水导致水压力增大。地表排水和地下排水要统筹规划、协同布置，形成立体化的排水系统，从根本上消除水对边坡稳定性的影响。

表 1 道路边坡类型及其主要失稳模式

边坡类型	坡体结构特征	主要失稳模式
土质边坡	以厚层土体为主，均质性较好	牵引式滑移、圆弧形滑动
岩质边坡	以岩体为主，受结构面控制	沿结构面滑动、崩塌、倾倒
岩土混合边坡	岩体与上覆土体组合	土体弧形滑移、沿岩土界面滑动
类土质边坡	深厚的全、强风化岩	受原岩结构面控制的变形破坏
类混合边坡	上部时效变形明显的岩体	沿渗漏面破坏

2.2 边坡支挡加固技术

支挡加固是提高边坡稳定性的直接有效手段,主要包括挡土墙、抗滑桩、锚杆锚索等工程技术。挡土墙、抗滑桩对边坡岩土变形起到阻止作用,保证路基结构稳定。重力式挡土墙依靠自身重量来抵抗土压力,适合于高度不大、地质条件好的边坡;悬臂式和扶壁式挡土墙适用于高填方边坡。抗滑桩是穿过滑坡体深入滑床的桩柱,用以支挡滑体的滑动力,对边坡稳定起根本性作用,适用于浅层和中厚层滑坡^[2]。锚索框架梁、格构锚杆等主动加固技术把锚固力传到深层稳定岩体上,从而达到对坡体的主动约束,适合于岩质高边坡。微型桩和锚索组合结构依靠微型桩和锚索的共同作用,既有浅层快速支挡又有深层主动锚固的特点。高陡边坡、地质条件复杂边坡一般都需要使用多种支挡结构相配合的方式来构成多层支挡加固体系,使整个边坡处于稳定的环境中。

2.3 边坡生态防护技术

生态防护实现了边坡稳定和生态环境修复的双重目的。传统的边坡工程加固措施大多为砌石、喷射混凝土等灰色工程,破坏了生态环境的协调,伴随着环境意识的提高,生态护坡技术得到了广泛的应用。道路边坡植被修复常用的护坡技术有客土喷播技术、植被混凝土护坡技术、厚层基材工艺、液压喷播技术等。客土喷播既能实现边坡防护与绿化双重作用,又能模拟出各种自然土壤的状态,具有很强的适应性,适用于坡度小于 70° 的石质边坡,将客土、纤维、侵蚀防止剂、缓效肥料、种子按一定比例混合后喷播到坡面上。土工格室植草护坡是在坡面上固定土工格室并填入改良客土来给植被生长提供稳定的环境,适用于较陡的土质边坡。生态防护应根据边坡类型和坡率选择合适的方案,石质边坡可采用挂铁丝网客土喷播,土质边坡可采用挂三维网喷播。

2.4 综合防护技术协同应用

单一的防护技术很难解决复杂的边坡失稳问题,综合防护技术的协同使用是保证边坡长期稳定的途径。生态-结构联合护坡体系将传统防治结构与绿色生态防护相融合,这种“软”“硬”措施相结合的新技术更有利于边坡稳定。工程实践当中,排水工程、支挡结构以及生态防护要依照边坡具体状况展开有机融合。锚墩式锚索和主动防护网相结合,使两者受力、变形相互协调,发挥出主、被动锚-网结构的组合效应,形成安全可靠的联合支挡结构。排水系统和支挡结构的配合尤为重要,支挡结构要设置完善的排水设施来防止墙后积水造成水压力增大。植被对滑桩的稳定性、边坡防护的效果起着综合的作用,合理的植

被配置可以提高边坡防护的有效性、可靠性。集植被、高性能防护网、锚杆和排水管为一体的协同护坡系统,可以有效地防止边坡水毁和生态破坏。综合防护技术要遵照“排水先行、支挡为主、生态辅助”的准则,依照边坡的失稳机理和地质状况挑选合适的防护技术组合,达成工程安全同生态保护的统一。

3 道路边坡安全管理与优化措施

3.1 加强边坡勘察与设计管理

勘察和设计属于边坡工程安全的第一道防线。勘察工作要重视地质结构的细致描述,对结构面的物质组成、边坡地质结构类型、规模、密度、延伸情况进行详细、准确的描述,采用钻探、物探等方法查明岩土体性质和地下水分布。边坡高度和长度大,抗震效应分析、稳定性评价等勘察难点要用多种技术手段来解决,重视准确评价和量化评价。设计阶段要贯彻动态设计理念,把工程地质精细化勘察同动态设计、信息化施工融合起来,依照边坡失稳机理恰当选定坡率、支护方式和排水方案。设计方案要根据不同的边坡破坏形式来分类设计,达到安全性和经济性的一致性。

3.2 优化施工过程质量控制

施工质量直接决定防护工程最终的效果。边坡开挖应遵循分级开挖、分级支护的原则,每级边坡高度宜控制在八至十米,严禁一挖到底,严格控制开挖坡率,避免超挖或欠挖对坡体稳定性的不利影响。对软弱地基采取换填或者碎石桩等处理。支挡结构施工应保证材料质量及工艺符合要求,锚杆锚索钻孔、注浆、张拉等重要工序要实行全过程的质量控制。合理选用边坡防护形式、改进施工工艺、加强施工过程控制,是保证边坡防治效果的重要手段^[3]。雨季施工要做好临时排水措施,建立健全质量检查和验收制度,保证每一项工序符合设计和规范的要求。

3.3 完善边坡监测预警体系

监测预警就是对边坡动态的把握和防滑失稳风险的途径。多源协同监测网利用不同的监测手段,从边坡表面、深部结构和环境致灾因素三个方面开展立体化、全天候的监测。监测项目应有坡表位移、深部位移、地下水位、降雨量等主要指标。倾角计、视频监控、雨量传感器、声光报警装置、多点位移计等设备一起工作,可以形成全天候、全方位的安全监测网络。应当创建分级预警体系,依照技术标准和应急预案来确定定量化警戒阈值,从而形成起“阈值预警-分级推送”的闭环告警链。监测数据要及时进行分析处理,根据边坡变形演化规律来判定稳定状态和发展趋向,从而给应急处置提供决策支撑。

3.4 提升边坡长期维护管理水平

边坡长期维护管理属于保证服役期内安全稳定的环节。边坡坡面应保持平顺、坚实、无裂缝,对路堑高边坡应经常观察,发现问题及时处理。边坡加固的各种设施应经常检查、维修,以保证其完整性好。边坡因雨水冲刷易形成冲沟和缺口,应及时整修,修理时应将原坡挖成台阶后分层填筑压实。排水系统要定时清理,保证截水沟、排水沟、盲沟等排水设施畅通无阻^[4]。智能化监测和网格化人工巡检要相互补充、互相促进,智能监测重点在山体内部,网格化人工巡检重点在坡面表层。应建立边坡技术状况评定制度,按照评定等级制订不同的维护方案,用全寿命周期的维护管理把安全重心由事后治理转移到事前预防。

4 结语

道路边坡失稳是由各种因素共同起作用的复杂地质过程。本文系统整理出道路边坡主要类型和失稳模式,分析了内外因素对边坡稳定性的影响,论述了边坡变形破坏的阶段演化过程和常见失稳机理。从防护技术来说,排水、

支挡、生态三种技术各有侧重但互相补充,综合防护技术的协同使用才是实现边坡长期稳定的有效方法。从安全角度出发,勘察设计、施工控制、监测预警、长期维修等一起形成了全寿命周期的完整链条。在工程实践中进一步加强“以防为主、防治结合”的思想,把机理研究、技术应用和安全管理结合起来,不断提高道路边坡工程的安全水平。

[参考文献]

- [1]韩杰,吴炜骏.城市道路岩质高边坡失稳机理分析及加固措施研究[J].交通科技与管理,2024,5(2):72-74.
- [2]王文博.道路边坡地质灾害防治的锚杆框架支护技术研究[J].中国减灾,2024(11):52-53.
- [3]付万坤.红黏土-石灰岩复合地层边坡失稳机理与加固措施探析[J].石材,2026(5):64-66.
- [4]王朝刚.强降雨作用下高陡边坡滑移机理研究[J].江西建材,2025(12):242-244.

作者简介:夏恒(1986—),男,汉族,湖北武穴人,工程师,本科,研究方向:道路工程。