

路基边坡稳定性分析与防护施工技术研究

赵沂伟

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051

[摘要]路基边坡稳定性关系着公路工程的安全运行,正确的稳定性分析以及合理的防护工程技术对预防滑坡有着重要意义。文章详细介绍了极限平衡法、数值算法、安全系数计算及稳定性判断的方法、边坡实时监测及数据分析方法等稳定性分析方法;针对防护型式确定,挡土墙及支护结构,锚杆及喷射混凝土,排水除湿措施,绿化防护等防护设计的关键技术进行了说明并提出改进措施。研究发现,结合理论计算、数值模拟、现场监测的方法,采取综合性防护措施,才能使路基边坡保持长久的稳定性。

[关键词]路基边坡;稳定性分析;防护设计;锚杆支护;生态防护

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19951

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Research on Stability Analysis and Protection Construction Technology of Roadbed Slope

ZHAO Yiwei

Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

Abstract: The stability of roadbed slopes is related to the safe operation of highway engineering. Correct stability analysis and reasonable protective engineering techniques are of great significance for preventing landslides. The article provides a detailed introduction to stability analysis methods such as limit equilibrium method, numerical algorithm, safety factor calculation and stability judgment, real-time monitoring of slopes, and data analysis methods; The key technologies for determining protection types, retaining walls and support structures, anchor rods and shotcrete, drainage and dehumidification measures, greening protection and other protection designs were explained and improvement measures were proposed. Research has found that by combining theoretical calculations, numerical simulations, and on-site monitoring methods, comprehensive protective measures can be taken to maintain long-term stability of roadbed slopes.

Keywords: roadbed slope; stability analysis; protective design; anchor rod support; ecological protection

引言

随着公路工程进入山区,路基边坡工程量日渐增大,路基边坡滑坡现象愈发严重。据调查统计,我国公路边坡病害占到全部地质灾害的30%以上,导致严重的经济损失与道路交通事故的发生,《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)要求,路基边坡必须进行专门的稳定分析,采取可靠的防护措施,保证工程建设期间以及营运过程中的安全。路基边坡失稳是由地质状况,水文条件,开挖方法等众多原因造成的,失稳的过程也很复杂并且存在多种防护方式。近几年来,由于数值计算技术、智能化检测技术和生态加固技术的发展,边坡稳定分析以及防护技术也在不断提高,边坡灾害防治水平大大提高,发生率也在逐年降低,但是对这些方面还要继续深入地研究,所以深入地研究路基边坡稳定分析及防护工程施工技术,对保证公路

工程的安全、降低由地质灾害所带来的损害、推动交通运输基础设施建设高质量发展有着极其重要的作用。

1 路基边坡稳定性分析方法

1.1 极限平衡法分析

极限平衡法是分析土坡稳定性的传统方法,它基于刚体平衡假设,以滑体沿潜在滑动面内抗剪力与下滑力比值来计算安全系数的一种方法。其原理是把滑体分成多棱柱状块体,并考察相邻条块之间的接触应力。利用静力学平衡方程得到安全系数大小。瑞典圆弧法认为滑面是一种圆弧面,适用于均一型土坡,计算简便,但是忽略了条块之间的作用力,在实际工作中比较实用;毕肖普方法考虑了条块间水平力的作用,计算精度较高,是目前工程设计中最常使用的方法之一,简布法适合任何形状滑面计算非圆弧滑动。极限平衡法的核心问题是找到最易失稳的

滑面，在工程上一般运用搜索的方式找到所有的滑面并寻找安全系数最小的滑面。此方法运用范围很广，在工程建设中经常使用，适用于对土质边坡以及破碎岩质边坡的稳定性分析。其计算得到的数据已经具有较多的实践经验，所得结果十分稳定可信赖，为边坡稳定性的基本计算方式。

1.2 数值模拟方法

数值模拟方法是建立边坡数值模型为基础，进行应力场、位移场及塑性区分布的模拟，使边坡稳定性问题得到更为合理的解答。有限元法是把边坡划分成多个单元，在求解整体刚度方程的基础上得到应力应变分布的结果，能够考虑复杂的地质情况以及施工工艺。FLAC3D 属于有限差分软件的一种，应用于岩土工程中可以很好地解决岩土体的大变形及破坏问题，尤其适合于复杂地质条件下对边坡进行稳定性分析时使用，特别是针对一些明显的非线性特性有较好的适应效果。离散元法适用于存在较多的节理裂隙的岩质边坡，通过对各个块体之间的接触与运动进行模拟，来探究岩体结构破坏的原因，从而真实地再现出了节理面、断层面等地质构造对边坡稳定的影响。数值模拟方法能包含岩土介质非线性、渗流作用、施工干扰等因素的影响，计算误差小于极限平衡法，但是计算参数对结果影响很大，需要通过室内测试、原位测试来选取合理的参数。

1.3 安全系数计算与稳定性判定

安全系数是判断边坡是否稳定的最主要标准之一，它是抗力与推力之比，根据《公路路基设计规范》，高速公路及一级公路边坡的安全系数在正常情况下不应低于 1.25，异常情况下不得低于 1.15。对于重要边坡工程如桥梁墩台处边坡、深填路堤边坡、有重要建构筑物影响的边坡等要加大安全系数，通常要求达到 1.30 以上，保证工程长久安全。安全系数的计算要考虑边坡高度，坡角，岩土体物理力学性质以及地下水状态等因素，在安全系数小于规程规定的情况下，应增设防护工程。而安全系数在 1.0~1.2 之间时，则边坡为极限稳定状态，要加强观察监测并对之进行必要的防护，安全系数小于 1.0 的时候就是不稳定状况下必须要及时加以加固^[1]。稳定性评价还需要

参考边坡变形监测数据以及宏观地质情况等各方面因素来共同分析评估，不能仅仅依据计算数值来作出结论，在复杂地质环境下，可以使用不同的方法互相对加以确定更为准确可靠。

1.4 边坡监测与数据分析技

边坡观测是对边坡进行动态观察以检验分析结论的有效方法。观测项目有地表位移、深层位移、地下水位以及支护系统的应力等。地表位移观测可以使用 GNSS、全站仪进行测定，精度可达到毫米级，可以随时了解边坡表面的变化情况；深层位移测量采用测斜仪来进行测量，可以精确确定出滑动面的位置，在进行边坡破坏方式的判断中有很大的参考意义；监测数据处理包含变形发展过程、速度的变化、相互关系的研究等，根据形成的变形预报方程式来判定边坡是否处于安全的状态。以物联网为基础的自动监控系统可以做到对信息进行实时收集以及警报，在达到一定数值的时候会自行发出警告，反应速度可以达到秒级别，大大提升了对边坡进行观察的速度、准确性。监测信息的研究需要和边坡的环境相结合，找出变形和影响的相关性以便做出相应的调整和预警。表 1 是几种测量技术的优点和特点。

2 路基边坡防护设计关键技术

2.1 边坡防护形式选择原则

边坡防护形式的选择应该以安全可靠、经济合理、环境友好作为原则依据。结合边坡类别、高度、地层情况以及环境保护的需求来决定。对土质边坡建议使用植被防护或者骨架护坡的方法，既达到了稳固边坡的目的又达到美化环境的效果；对岩石边坡可以采取喷锚防护或者是主动网防护的方式避免岩石风化剥落的情况发生，而对于高大边坡则要设挡土墙或者抗滑桩等加固措施给予足够的阻滑力等。除此之外还要考虑到施工条件与工期限制，尽可能在保障安全的基础上对方案进行优化，做到技术经济水平最优化。《公路路基设计规范》依据不同边坡类型提出了相应的防护措施的选择原则，在设计中要根据实际情况灵活运用，不能机械照搬，对复杂地质条件地段的边坡可以采取多种形式同时使用，取长补短，从而达到最好的防护效果。

表 1 边坡监测方法对比

监测方法	监测内容	主要设备	监测精度	适用条件
地表位移监测	水平位移、垂直位移	GNSS、全站仪	毫米级	适用于各类边坡
深部位移监测	坡体内部变形	测斜仪	0.1 毫米/米	确定滑面位置
地下水位监测	地下水位变化	水位计	厘米级	反映水文条件
支护结构监测	锚索轴力、钢筋应力	锚索测力计	0.5%F.S.	验证支护效果

2.2 挡土墙与支护结构设计技术

挡土墙属于传统的边坡支护结构形式，在边坡不高，地势允许的情况下使用，重力式挡土墙靠自重来保持稳定，墙的高度一般在 10m 以内，悬臂式和扶壁式挡土墙用于较高的边坡，则由底板和墙体共同承担土压力。挡土墙的设计需要计算倾覆、滑动、地基承载力以及墙身强度，其抗倾覆的安全系数不小于 1.6，抗滑力的安全系数不小于 1.3，地基的承载力必须达到持力层的要求^[2]，而抗滑桩是用来抵御滑坡推力的主要构筑物，靠的是桩身与周围的岩石和土体产生交互作用的摩擦力实现抗滑目的，适用于滑坡体较深的情形。抗滑桩的设计要明确桩径以及桩距还有嵌固长度等指标，其中桩间距通常以桩径的 3~5 倍为宜，嵌固深度应是桩长的 1/3~1/2 左右，桩身混凝土强度等级不宜低于 C30，桩顶设有冠梁加强整体性能。桩板墙是由一系列排桩加挡土板构成的一种支护形式，适用于环境条件有限的坡面防护工程。

2.3 锚杆（索）与喷射混凝土防护技术

锚杆（索）、喷射混凝土为岩质边坡加固常用手段，锚杆将拉力传给稳定的围岩体，可防止边坡滑移、变形的发生应用于破碎的岩层边坡上。锚杆长度不应小于 4m，锚杆间距应在 1.5~2.5m 之间，锚固力应经过抗拔实验来检测其强度，并且要大于 2.0 的安全系数，灌浆材料应为水泥砂浆，并保证其强度大于等于 M30，预应力锚索用于高大岩层边坡，通过对边坡施加预应力的方式主动固定边坡变形情况，其锚固长度应不少于 5m，预应力值选取设计锚固力的 50%~70%，预应力锚索的锁定力必须准确无误，误差不超过设计值的 5%，在张拉时必须逐级加载、稳压锁定。喷射混凝土能阻止岩面风化剥落，厚度一般在 8~15cm 左右，强度不低于 C20，与锚杆组合成锚喷支护系统，可以有效的改善岩质边坡稳定性。在锚喷施工时要注意喷射混凝土的配合比以及回弹率问题，保证好粘结强度以及支护质量。

2.4 排水与降水设计技术

排水和降水是最有效的减少边坡稳定性的措施。地面排水系统有截水沟、排水沟和急流槽等，用于阻截、导引坡面径流，截水沟在坡顶下方 5~10m 位置，阻截坡面以

上的汇水区，排水沟平行于坡面向下开挖，其底部坡度不应小于 0.5%，一般设计洪水重现期为 20 年~50 年之间，保证排水系统能满足暴雨条件的要求。地下排水措施有仰斜式排水孔、排水盲沟等，主要目的就是减少地下水位或孔隙水压力。仰斜排水孔是最常用的地下排水方法之一，在钻孔中以 5~10m 一个孔，角度约 5°~15°左右，孔径 90~110mm，能够有效降低地下水位 2~5m，大大增强了边坡的安全程度。降水工艺主要是针对施工阶段地下水的整治措施，通过井点降水、管井降水等方案使地下水位降至合理范围，为边坡挖掘提供有利环境，在降水工作的实施中应注意控制好地下水面的回落速度，减少由于降水过快带来的邻近地区的地基下沉问题。

2.5 生态防护与绿色边坡技术

生态防护及绿色边坡技术在保护边坡安全的前提下，兼具植被恢复的作用。客土喷播就是把种子、肥料以及土壤改良剂等混入一起，再用高压喷枪喷到坡面上去，用于岩质边坡以及土质边坡上，厚度约为 8~12cm，经过 6 个月的时间就能达到 90% 以上的植被覆盖率，从而起到了美化边坡的效果，减轻了水土流失的程度，植生袋和生态袋就是把植物生长所需要的基质装入到了一种可以分解的袋子里，然后像垒积木一样一层层堆放在边坡上面，适用于坡度大的地方或者是不易种植植物的地方，三维植被网有三维立体结构，可以很好地对土壤和种子进行固定，提高了其成活率，它的抗冲刷力是普通草皮的 2~3 倍，非常适合在水流冲刷严重的区域使用^[3]。生态保护应该采用本土化植物，增强植物的耐受力、稳定度，还要注意同周围环境相融合统一。表 2 列出了不同类型的生态保护技术的优势和使用范围。

3 路基边坡稳定性提升与优化策略

路基边坡稳定性的提高要贯穿在整个勘察、设计、施工、监测全过程。在勘察过程中要使用综合物探方式进行勘察以了解清楚地层情况以及岩土性质及地下水的情况等为稳定性分析提供基础。针对一些复杂地段边坡要加强勘察工作力度，在必要的情况下进行现场试验和实验室试验来校核参数正确与否，对于可能存在滑动的面要对其进行研究，清楚滑面的空间产状以及力学性质。在设计方面

表 2 生态防护技术对比

防护技术	主要材料	适用坡型	植被覆盖率	主要特点
客土喷播	草种、基质、粘结剂	岩质、土质边坡	90%以上	施工快捷、适应性强
植生袋	可降解袋、营养土	陡坡、难以绿化边坡	85%以上	保水保肥、成活率高
三维植被网	合成纤维网、草种	土质边坡、风化岩	80%以上	抗冲刷、固土效果好
生态袋	聚丙烯袋、营养基质	陡坡、坡面修复	85%以上	透水不透土、稳定性好

则要运用极限平衡法与有限元数值计算相结合的方法来进行计算并选择合理的设计安全系数及支护结构参数。以动态设计理念为指导,结合施工中暴露的地层情况随时调整支护方案,做到设计与施工相互匹配,减少由于地层的不确定性带来的工程质量隐患,运用信息化技术使设计方案更直观地展现出来,施工过程中要严格把控施工质量,锚杆灌浆、喷锚、挡土墙砌筑等工作都要符合设计要求,建立起全面监测体系对边坡变化以及支护结构受力情况进行动态观察,进行动态的设计反馈,在监测结果出现偏差时立即给予支护结构加强,保证施工中的安全^[4]。运营期间定期巡检边坡并对边坡问题及时处理,建立起完善的边坡全寿命期养护管理制度。利用 BIM 技术建立边坡工程项目信息系统,对勘测、设计、施工以及营运维护各环节的信息进行一体化管控,为边坡工程的长久安全提供技术支持,运用现代化信息技术加强对边坡的安全监管水平,在此基础上还要注重边坡灾害的风险防控及应急预案管理工作,形成逐级报警及应急联动机制,增强抵御边坡灾害的能力。

4 结语

路基边坡稳定分析及防护施工技术是保证公路工程建设安全的重要因素。本文详细介绍了极限平衡法、数值模拟法、安全系数及其稳定判断、边坡监测及数据分析等

多种路基边坡稳定分析方法;针对防护型式的选择、挡土墙、支挡结构的设计、锚杆、喷混植生等多种防护设计关键技术进行了深入的研究;最后提出了一些建立在理论分析、数值模拟及工程实测基础上的优化措施。研究发现,在对路基边坡进行稳定分析的过程中,把理论计算分析、数值仿真模拟及监测相结合,采取一套系统的防护措施,才能让路基边坡具备良好的长期稳定性。要继续开展智能监测、生态防护、BIM 技术等技术的应用,形成边坡工程全寿命周期安全保障体系,为公路工程建设作出贡献。

[参考文献]

- [1]余勇.公路路基施工中坡面稳定性分析与防护技术研究[J].汽车周刊,2025(9):91-93.
- [2]王增录,袁翔.高速公路路基边坡稳定性分析与安全防护技术[J].中国住宅设施,2025(6):187-189.
- [3]农明科.路基高边坡稳定性分析及防护措施研究[J].西部交通科技,2021(10):8-11.
- [4]李陆海.路基边坡稳定性影响因素及防治措施[J].工程技术研究,2017(6):61-62.

作者简介:赵沂伟(1993—),男,汉族,湖北宜都人,中级工程师,2018年于中国民航大学道路与铁道工程毕业,研究生,现从事路基路面工作。