

公路路基工程边坡设计与稳定性分析方法研究

郑 敏

中南勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430074

[摘要]随着近些年高速公路建设里程、规模不断发展以及路基工程技术的不断精进，边坡设计与稳定性分析已然成为确保路基安全并延长工程寿命的重要环节。边坡稳定与否，一方面关乎施工期间以及运营阶段的安全状况，另一方面还会直接对工程的经济性以及维护成本产生影响。文章着重围绕边坡设计所遵循的原则、稳定性分析方法以及影响因素等展开阐述，尤其针对支护与加固措施、排水系统设计、监测预警等相关内容予以重点探讨，从而为公路路基工程的优化设计以及风险管控提供一定的参考依据。

[关键词]公路路基；边坡设计；稳定性分析

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18348

中图分类号: U417

文献标识码: A

Research on Slope Design and Stability Analysis Methods for Highway Roadbed Engineering

ZHENG Min

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: With the continuous development of highway construction mileage and scale in recent years, as well as the continuous improvement of roadbed engineering technology, slope design and stability analysis have become important links to ensure roadbed safety and extend project life. The stability of slopes is not only related to the safety conditions during construction and operation, but also directly affects the economy and maintenance costs of the project. The article focuses on the principles followed in slope design, stability analysis methods, and influencing factors, with a particular emphasis on support and reinforcement measures, drainage system design, monitoring and warning, and other related content, which provides a certain reference basis for the optimization design and risk control of highway subgrade engineering.

Keywords: highway subgrade; slope design; stability analysis

引言

公路路基属于道路工程建设的关键构成部分，其结构的安全性和稳定性与公路通行质量和能力息息相关。路基边坡充当承载和支撑的结构角色，它的稳定性会受到构造和岩土体特性、气象水文条件、施工荷载以及外界环境等诸多因素的作用影响。随着高速公路网络的快速发展，山区复杂地形地质条件下的路基边坡失稳破坏的情况时有发生，这给公路施工运营安全以及社会经济都带来了潜在的风险隐患。本文根据现有研究成果，结合工程实践加以总结归纳，较全面地探讨了公路路基边坡的设计原则、稳定性分析的具体方法以及主要影响因素，尤其针对支护与加固措施、排水系统设计、监测预警等相关内容，从而为公路路基工程边坡给予理论依据与科学技术层面的有力支撑。

1 边坡设计原则

公路路基工程边坡设计要遵循安全、经济且可持续原

则，在设计阶段，需要充分考虑边坡地形地质条件、气象水文条件、边坡高度和坡度、工程荷载及施工影响以及外界环境因素的影响，确保路基边坡在施工、运营阶段都能一直维持安全稳定状态。因此边坡设计应当依照国家和行业现行的相关规范来开展，比如《公路路基设计规范》《公路工程地质勘察规范》等，要清晰明确不同工况条件下的安全系数、允许的变形情况以及支护结构设计的具体要求，借此达成标准化管理以及科学设计的目的。边坡的形状、坡度以及支护方式需要依据具体的地形地质条件来进行优化调整，以便能够兼顾到安全性、经济性以及施工的可行性。在设计过程中，还应充分考虑排水方面的措施、生态绿化情况以及长期养护维护等诸多因素，确保边坡在满足安全要求的基础上还具备可持续性以及环境友好的特性。在实际的工程项目当中，设计人员要结合勘察所获得的数据以及现场的实际条件，针对边坡展开细致的分析，

进而形成完整并且具有可操作性的设计方案,以此为施工以及后期的维护工作给予可靠的依据。

2 边坡稳定性分析方法

2.1 极限平衡法

在边坡稳定性分析中,应用较多的是极限平衡法。其基于条分法,一般会把边坡划分成多个独立的滑动单元,依靠对各个单元进行力平衡或者力矩平衡方面的计算来确定其安全系数,并且能够联合不同的滑动面展开多方案的对比分析,从而为边坡设计以及加固措施的选择给予指导。该方法操作简单,可以提供所有可能危险滑行范围内斜坡中的应力-应变状态,在处理均匀土质边坡和顺层边坡时方法比较可靠,但在涉及复杂介质和边界的岩质滑坡体时,需要充分考虑结构面的组合关系和岩体完整性,建立符合实际条件的地质模型,依据地质勘察提供的滑面参数进行稳定性验算,计算结果与实际情况可能相差较大,往往需要与其他方法相互验证。

2.2 数值分析法

与传统的极限平衡法相比较,数值分析法通过构建边坡的三维或者二维力学模型,把复杂地形地质条件以及边界条件下可能危险滑行范围内斜坡中的应力-应变状态反映出来,可以更直观地揭示边坡破坏模式。常见的数值方法有限元法、有限差分法以及离散元法等,这些方法能够对边坡在施工期间、受到外部荷载作用的时候以及处于长期运营状态时可能出现的非线性变形以及破坏过程加以模拟。借助数值分析方法,可以对不同的设计方案予以对比优化,还能评估边坡在极端条件下的稳定性状态,为边坡防护以及加固措施给出科学方面的依据。数值分析法能够对复杂地质介质以及非均质土体边坡进行稳定性计算,其能够给出比极限平衡法更为细致的力学响应预测,不过它的计算过程相对来讲是比较复杂的,对于建模精度、参数选取以及计算资源的要求都颇高,因此该方法一般会和经验公式以及行业规范联合起来使用,以此来保证计算结果的准确性和可靠性。

3 边坡设计影响因素分析

3.1 构造和岩土体特性

边坡的稳定性受到构造和岩土体特性的影响颇为明显。各类不同的岩土体,它们在含水量、密实度、地层均匀性和工程力学性质等方面都存在着明显差异,这些因素直接决定了坡体的承载能力、抗剪强度以及潜在滑动面的具体分布状况。土质边坡往往呈现出塑性比较强、变形程度也较大的特点,然而岩质边坡却存在着裂隙、节理还有层理这样的结构,这就让其破坏的模式变得更加复杂起来。

地层的倾向、岩层的厚度、软弱夹层以及断层、破碎带等这类地质构造,都会对边坡的滑动方式以及滑动面的位置产生影响。在边坡设计阶段,务必要借助详尽细致的地质勘察工作以及岩土测试手段,获取边坡岩土体的各项设计参数,尽可能采用多种方法计算边坡稳定性,以此确保复杂地质条件下的边坡防护和加固措施合理可靠、经济适用。

3.2 水文与排水条件

水文状况以及排水系统的设计,对于边坡的稳定性至关重要。地下水位出现季节性变化、大气降雨和地表水下渗,都有可能致使边坡土体变饱和,孔隙水压力不断增大,进而大幅降低土体的抗剪强度,甚至诱发滑坡。尤其是在雨季或极端降雨条件下,边坡若没有采取有效的排水措施,在水流冲刷作用下易使坡体整体或局部发生失稳破坏。因此边坡设计务必要全面考虑水文情况、降雨强度、地下水位变化情况以及水流方向等因素,采用与之相适宜的排水系统设计,如截水沟、排水沟、排水管等,防止水流不断冲刷坡体。同时还需要针对不同季节以及极端气象条件下的水文情况开展模拟预测分析,优化调整边坡排水系统,确保其能够在长期运营过程中一直维持有效运行状态。排水系统设计是否合理可靠,这直接和坡体稳定性以及养护管理成本相关联,因此在路基边坡设计阶段应当充分考虑工程地质和气候水文方面的影响,必要时可现场实测水文数据。

3.3 工程荷载及施工影响

边坡稳定状况一方面会受到自然条件的作用,另一方面也可能受到工程荷载以及施工活动的影响。在施工过程中,机械振动、填筑材料自身重量以及施工设备所产生的荷载等,都有可能使得边坡岩土体内部的应力分布发生变化,进而致使局部产生变形或者存在潜在的滑移风险。尤其是在开展大体积填方施工或者是高边坡施工时,土体应力重新分布以及出现超载的情况,很可能会造成坡脚部位的压力变得集中起来,从而诱发滑坡这一险情^[1]。因此在针对边坡开展设计工作以及制定施工方案时,务必要全面考虑施工的先后顺序、施工过程中产生的荷载分布情况以及边坡支护的具体方案,确保边坡在施工阶段能够长期安全稳定。在施工期间,应当构建高边坡动态监测预警的相关机制,针对位移、裂缝以及地下水渗流等情况进行实时跟踪记录,并依据所获取到的监测数据,对边坡施工方案、加固措施、排水系统设计等做出相应的优化调整,从而避免因施工而引发的次生灾害发生。另外还需要综合考虑在未来运营阶段时车辆荷载、地震作用等因素对边坡稳定性的影响,形成一套贯穿施工阶段和运营阶段的稳定性分析

评价体系。

3.4 外界环境因素

外界环境因素属于影响边坡稳定性的外部条件范畴,其中包含气候变化、地震活动以及人类工程活动等方面。气候因素主要体现在降雨强度、冻融循环以及温度变化上,这些条件能够改变岩土体的含水量,冻融还会破坏边坡岩体结构,进而造成边坡发生滑动或滑塌破坏。地震作用会产生瞬时动荷载,诱发边坡岩土体在瞬间出现失稳破坏,在软弱地层或高填方边坡中,其影响更为突出。人类工程活动如开挖、爆破以及交通荷载等,同样有可能扰动边坡结构,引发局部滑塌等问题。因此路基边坡设计务必要充分考虑外部环境因素的影响,通过合理确定坡度、支护结构、加固技术以及排水措施等方式,提升路基边坡应对自然灾害以及人类工程活动的抗风险能力,并且在设计阶段把极端气候和地震工况的安全评估纳入其中,以此确保边坡在长期运营期间具备足够的安全冗余。

4 边坡防护与加固措施

4.1 支护结构类型与应用

边坡支护结构是保障边坡及其周边环境安全、防止滑坡和坍塌的关键技术体系,可归纳为“坡面防护”与“支挡加固”两类。“坡面防护”通常包含植物防护(三维网植草、客土喷播植草等)、圬工防护(喷混凝土、浆砌石护面等)、柔性网防护;“支挡加固”通常包含重力式挡墙、加筋土挡墙、土钉墙、预应力锚索(杆)+格构梁、抗滑桩、桩板墙等。针对不同边坡结构类型,应采用合适的支护结构,切实有效地提升边坡的安全系数。在选择具体的支护结构时,需综合考虑边坡的高度情况、所处的地形地质条件、施工时的环境状况以及经济方面的可行性等诸多因素^[2]。对于复杂岩质边坡或土岩混合高边坡,宜采用多种支护结构进行综合加固处理。通过合理组合不同支护形式,使其各自发挥最优作用,在满足边坡整体稳定性要求的前提下,实现技术可靠性与经济性的协调统一。除此之外,在支护结构的设计环节中,还应当充分考虑到其耐久性、易维护性以及施工的可行性等情况,确保在长期运营期间,该支护结构的性能一直保持稳定状态,尽可能减少后期养护成本以及潜在的安全风险。

4.2 边坡加固技术适用性

植物防护利用植被固土、减少冲刷,适用于坡度较缓、降雨适中的土质边坡,对环境友好。圬工防护利用混凝土或块石护面,防止冲刷,适用于强风化岩质或碎石土边坡,对环境不友好。柔性网防护主要用于防止落石,常用于岩

质高陡边坡。重力式挡墙广泛用于土质、土岩混合边坡;土钉墙、桩板墙常用于强风化岩质或碎石土边坡;加筋土挡墙适用于填方边坡;锚索(杆)+格构梁常用于顺层边坡、岩体破碎边坡;抗滑桩常用于滑坡、岩堆等工程治理。加固技术的选取需要综合考虑边坡岩体结构类型、地形地质条件、边坡高度、失稳机制以及施工可行性等因素,并且要对加固之后排水系统、生态环境以及景观所带来的影响做出评估^[3]。

4.3 排水系统设计与应用

路基边坡排水系统核心功能是快速排除坡面雨水及坡体内部的地下水,降低土体含水量、削减孔隙水压力,防止边坡出现冲刷、溜塌、滑坡等灾害,保障路基结构稳定性与道路运营安全。该系统需结合地形地貌、工程地质、气象水文条件、边坡坡度及高度、防护类型等进行针对性设计,预防为主,防治结合,因地制宜,经济适用。地表排水可采用截水沟、排水沟、边沟等设施,地下排水可采用渗沟、渗井、盲沟、排水孔等设施,形成立体、完善的排水系统。排水设施的布设位置、尺寸、数量、结构和材质等需经水文计算后确定。随着绿色公路理念的不断推进,路基边坡排水系统正逐渐向生态化、智能化方向快速发展。生态化方面,可采用生态袋等环保材料替代传统刚性护面,结合植草、喷播技术实现排水与生态防护的有机统一;智能化方面,在坡顶设置雨量自动化监测系统,在排水系统内布设水位、流量传感器,实时监测排水效果,为边坡监测预警提供数据支持。

4.4 监测预警

边坡现场监测主要是通过对位移和应力的实时监测来实现的。位移监测可采用北斗卫星系统,对坡面主要监测点进行高精度监控量测;也可采用钻孔位移计实时测量数据。应力监测可采用土压力盒等仪器埋设于边坡内部,以实时获取岩土体应力分布情况。现场监测结果可与极限平衡法、数值分析法计算结果对比分析,综合评价路基边坡的稳定性,以验证计算模型的准确性和可靠性。现场监测结果一旦超过临界阈值,系统应立即上报预警,以便各方及时作出应急响应,为路基边坡动态设计提供数据支持。

5 工程案例应用

大治市某山区在建高速公路右侧挖方边坡高度约58m,设计坡度为1:0.75、1:0.75、1:1.0、1:1.0、1:1.0、1:1.0、1:1.25。边坡地层结构为:表层为0.5~1.2m的植物土,黄褐、灰褐色,稍湿,结构松散;下部为白垩系下统大寺组的一套火山碎屑岩,岩性主要为凝灰质粉砂

岩, 呈灰色、灰黄色, 属较软岩~较坚硬岩。本边坡为顺切向坡, 节理裂隙较发育, 岩体较破碎~较完整、局部破碎, 强风化层厚 3.5~5.0m。挖方区地表水不发育, 地下水贫乏。根据边坡地质、水文条件, 设计采用了“锚杆框架梁+植物护坡”的综合防护与加固措施, 排水方案为截排结合, 坡顶开口线以上设置 0.5m 宽梯形截水沟, 拦截坡面雨水; 边坡分级开挖, 每 8m 设置一级平台, 平台内侧设置排水沟, 引排坡面雨水; 坡脚设置排水沟, 汇集坡面排水, 引入路基涵洞排出。采用北斗卫星系统, 对坡面主要监测点进行高精度监控量测预警。该方案实施后, 边坡开挖施工过程中未出现溜塌、滑坡等灾害, 保障了路基安全。

6 结语

公路路基边坡稳定性直接关系到公路的运营安全、使用寿命及工程造价。在复杂的地形地质与水文条件下, 科学开展边坡设计与精准进行稳定性分析, 是在安全、经济、环保的要求下, 保障全生命周期内公路工程质量安全的重要举措。本文结合公路路基工程特点, 较为系统地阐述边坡设计原则、稳定性分析方法, 分析了影响其稳定性的诸多因素, 重点探讨了边坡防护与加固措施、排水系统设计

与应用、监测预警等核心内容, 可为工程实践提供理论参考与技术支撑。分析指出, 极限平衡法、数值分析法等是当前较为科学、系统地计算边坡稳定性的定量评价方法, 分析结果的准确性、可靠性较高, 值得推广应用。在设计过程中, 需综合考虑边坡地形地质条件、气象水文条件、边坡高度和坡度、工程荷载及施工影响以及外界环境因素的影响, 优化调整支护结构、加固技术以及排水系统设计, 同步建立完善监测预警系统, 确保路基边坡在施工、运营阶段都能一直维持安全稳定状态。

[参考文献]

- [1] 吕婵妹.山区公路路基边坡稳定性分析及支护设计[J].交通世界,2023(18):95-97.
 - [2] 王前.公路路基边坡稳定性分析及锚固优化设计研究[J].交通科技与管理,2023,4(17):93-95.
 - [3] 王宗斌.山区公路路基边坡稳定性分析及支护设计[J].中国高新科技,2025(6):82-84.
- 作者简介: 郑敏 (1992.4—), 女, 汉族, 学士学历, 研究方向: 公路工程方向, 工作单位: 中南勘察设计院集团有限公司。