

公路高边坡稳定性分析与加固措施探究

陈彦希 雷 刚* 党子程 康 玉 刘方涛

宜宾学院 质量管理与检验检测学部, 四川 宜宾 644000

摘 要:随着交通基础设施建设的蓬勃发展,公路沿线高陡路堑边坡工程的数量显著增加。此类边坡的稳定状态对保障道路畅通和公共安全至关重要。为此,本文聚焦于影响公路高陡边坡稳定性的多重因素,深入探讨其加固方案及适用条件,旨在为边坡稳定性评价与加固实践提供理论依据和解决思路。在当前基建浪潮的背景下,系统梳理了公路高陡边坡稳定性分析及加固领域的相关理论成果,并综合采用文献研究与理论分析等方法,致力于构建保障高陡边坡安全稳定的理论基础。研究表明,实现边坡长期稳定的关键在于所采用的稳定性评价方法与加固策略与实际工程条件高度契合。高边坡稳定性分析与加固技术的应用可显著降低边坡失稳风险,提升道路通行安全性与耐久性,对保障交通网络畅通与人民生命财产安全具有重要现实意义。

关键词:公路高边坡;稳定性评估;加固措施;多重因素

0 引言

当前,我国交通路网正处于高速发展期,公路建设在复杂地质环境(特别是多山丘陵地带)的规模持续扩大,由此形成了大量高陡路堑边坡。根据GB50330-2013《建筑边坡工程技术规范》,将满足特定高度条件的斜坡界定为高边坡:土质边坡高度大于20米,或岩质边坡垂直高度大于30米。此类边坡既包括人工开挖形成的,也涵盖自然坡体。高边坡的稳定性问题,一直是公路建设与维护领域需攻克的核心难题。相较于常规边坡,高边坡一旦失稳,其破坏性后果更为严重,不仅会直接阻断交通干线,还易诱发次生灾害链,造成重大社会经济损失与深远负面影响。因此,系统解析其稳定性机制并实施有效加固,对保障其安全服役至关重要。尽管学术界已针对公路边坡稳定性开展了大量研究,涵盖了不同地貌特征下的分析等,但聚焦于高边坡这一特定对象,相关研究仍显不足。特别是对其失稳机制的系统性解析以及针对性加固技术的深入探索尚不充分,至今仍未建立完善的评估与加固技术体系。

1 公路高边坡稳定性影响因素分析

1.1 地形地貌因素

地形地貌是评价公路高边坡稳定性的基础性控制要素,其空间形态对坡体的力学响应与安全状态起主导作用。在诸多形态参数中,坡度(坡面倾斜度)是关键变量。一般而言,坡度越大,坡体内部剪应力越高,抗滑能力相应减弱,导致稳定性系数降低。坡高(边坡垂直高度)同样是核心控制参数。坡高的增加会导致其下滑力增大,内部应力场分布也更复杂,

从而显著增加了失稳风险。此外,坡形(坡面几何轮廓)亦是关键影响因素。坡形不仅控制了地表水流的汇集与排泄路径,也影响着岩土体内部的应力传递机制。以凹形坡为例,其地貌特征易形成汇水区,导致局部土体饱水、强度弱化,抗滑能力急剧衰减,进而诱发失稳;与之相对,凸形坡面有利于雨水快速排导,削弱了水致弱化效应,稳定性相对较好。

此外,需特别注意的是,大部分路堑边坡表层覆盖有碎石粉质黏土与碎石土,整体属土质边坡,自身稳定性较弱,可能发生坍塌甚至滑坡等失稳现象。

1.2 地质因素

地质条件的复杂性与多变性是决定边坡安全性的根本因素。岩土体固有的物理力学属性,如岩体的强度、完整程度及节理、裂隙的发育状况,直接决定了其抵抗变形与破坏的能力。例如,强度高、结构完整、节理不发育的岩体通常稳定性好;反之,则易发生失稳破坏^[1]。对于土体,其粘聚力、内摩擦角等参数的大小及含水量的动态变化,是直接控制其抗剪强度的关键指标;这些参数的劣化都可能显著降低边坡的稳定系数。此外,区域地质构造特征,如断层和褶皱,对边坡稳定性同样具有深远影响。断层作为岩体中的薄弱带,常成为应力集中和变形破坏的起始点,极易诱发边坡沿断层面的滑动。而褶皱构造会导致岩体内部应力分布高度不均,形成局部高应力区或拉应力区,从而增大边坡失稳的可能性。

1.3 水文地质因素

1.3.1 气象条件

在影响公路高边坡稳定性的气象要素中,

降雨是最为常见且影响显著的外部因素。降雨会直接增加坡面岩土体的含水量,加速其强度劣化,同时还可能引发地表冲刷和水分下渗。因此,暴雨冲刷极易对路基造成破坏,通常需预先采取导流与排水等措施加以防治^[2]。持续性强降雨会导致深层地下水位上升,改变原有的水力梯度,进而影响边坡稳定性^[3]。

1.3.2 水文条件

水作为一种广泛存在的环境介质,主要通过物理化学风化、增加容重和产生孔隙水压力等机制显著影响边坡稳定性。首先,水岩相互作用可诱发物理化学风化,破坏岩土结构完整性,削弱颗粒间的胶结与摩擦强度,致使材料整体强度劣化。其次,水分的渗入会增加坡体饱和区的容重,从而产生附加的下滑力。最后,赋存于岩土孔隙中的水体形成静水压力,而渗流过程则生成动水压力(渗透力);这两种孔隙水压力效应均会降低岩土骨架间的有效应力,弱化其抗剪强度。此外,地下水的持续浸润、周期性渗流及水位波动,不仅加速岩土体力学性能的衰减,所产生的扬压力更可能破坏原有的力学平衡,最终导致边坡稳定性显著下降。

1.3.3 地质构造

岩土体中的孔隙、裂隙等结构特征,控制了地下水的赋存与运移,进而间接影响边坡稳定性。这些结构为水的渗透提供了通道,其发育程度与分布特征决定了水的运移路径和渗透速率。当水沿这些通道渗流时,会加剧对岩土体的软化与侵蚀;同时,结构面本身的力学性质也可能因水的润滑等作用而降低,进一步影响边坡的整体稳定^[3]。

1.4 人为因素

人为活动是影响公路高边坡稳定性的另一重要因素。在建设阶段,不合理的削坡、坡顶额外加载、坡脚开挖等工程活动,都会不同程度地破坏边坡的稳定状态。具体而言:盲目削坡会破坏坡体原有的应力平衡,削弱其抗变形能力;坡顶加载会增大下滑力;而坡脚开挖则会直接削弱抗滑支撑,导致抗滑力显著下降^[4]。

例如,为开辟道路进行的开挖会直接改变坡体形态和应力分布。爆破作业产生的振动和冲击波会对岩体造成损伤,形成或扩大裂隙,破坏其完整性。在边坡附近进行的填筑作业会新增荷载,改变应力平衡,可能诱发变形失稳。进入运营阶段后,持续的车辆荷载(特别是重载车辆)及行驶振动,会对边坡构成持续的应力扰动,长期作用下可能诱发或加剧失稳风险。

2 公路高边坡稳定性评价方法

2.1 工程地质类比法

工程地质类比法是一种依赖经验的边坡稳

定性评价方法。它通过分析已建成且具有相似地质条件、几何形态或其他相关特征的边坡实例的稳定性表现,来推断待评价边坡可能存在的稳定性问题。这种方法因其概念直观、操作简便,常被用于项目早期的初步稳定性判断,能够快速提供方向性的认识。然而,其有效性的关键在于评估者积累的丰富经验和主观判断力,这使得该方法带有较强的主观色彩。由于自然界中很难找到两个在所有关键方面都完全相同的边坡,类比推断的准确性天然受到限制,难以提供精确的定量结果。因此,工程地质类比法虽是重要的参考手段,但结论通常较为定性,需结合其他方法综合考量。

2.2 极限平衡法

极限平衡法是公路高边坡稳定性分析中应用最为广泛的技术之一。其核心原理基于一个关键假设:当边坡失稳时,其潜在滑动面上的抗剪强度已达到极限状态。在此基础上,该方法通过将边坡体划分为若干条块,并依据静力平衡条件(如力的平衡或力矩平衡),计算出一个综合反映边坡稳定程度的安全系数。实践中,瑞典条分法、毕肖普法、简布法等都是其具体表现形式,各有其特定的适用场景与优缺点。极限平衡法的优势在于其概念清晰、计算相对简便,能够适用于各种岩土类型的边坡,其评价结果在工程实践中也常被认为具有足够的准确性,得到了广泛应用。然而,该方法固有的局限性亦不容忽视:它通常需要预先假定滑动面的形状,且在分析过程中忽略了岩土体真实的“应力-应变”关系,这可能导致对边坡实际力学行为的刻画不够精确。

2.3 有限元法

在公路高边坡稳定性评价领域,有限元法作为一种先进的数值模拟手段发挥着重要作用。该方法的核心思想是将连续的岩土体结构,借助网格划分技术,离散成有限个单元。通过建立并求解这些单元的平衡方程组,能够有效模拟和精确计算边坡内部的应力场与应变场分布^[5]。基于此应力应变分析结果,再结合岩土材料的强度破坏准则,即可对边坡的整体稳定状态进行更为精细和可靠的评估。有限元法的突出优势在于其强大的非线性模拟能力,能够真实再现边坡在荷载作用下的力学响应特征,并充分考虑岩土体的应力-应变关系。然而,该方法的应用也面临挑战:计算过程通常较为复杂、数据量庞大,不仅需要依赖专业的有限元分析软件,还对硬件配置要求较高。因此,其更适用于需要高精度分析的复杂边坡工程场景。

2.4 离散元法

离散元法 (DEM) 是一种基于颗粒介质力学理论的数值分析方法, 其核心思想是将边坡岩土体离散为由众多独立单元构成的集合体。通过精细化模拟这些离散单元间的复杂力学接触及其动态响应过程, 该方法能够有效捕捉边坡系统的力学演化行为。基于单元运动轨迹与空间构型演变的观测, 可有效识别边坡稳定性状态, 特别是其渐进破坏演化特征。该方法的突出价值在于能够清晰刻画边坡从初始变形直至失稳破坏的完整机制, 为深入揭示失稳本质提供了有力工具, 分析结果可靠性较高。然而, 与有限元法类似, DEM 同样面临计算资源消耗显著的挑战, 对硬件性能要求苛刻, 计算实施通常需借助专业仿真平台或软件。

3 公路高边坡加固措施

3.1 排水措施

在公路高边坡加固工程中, 排水系统扮演着基础性与关键性的角色, 其根本作用在于高效疏导坡体内部的水分问题。水分是导致边坡失稳的关键外部诱因, 它能够显著劣化岩土体的物理力学性质, 削弱其强度指标, 同时诱发不利于稳定的静水荷载与动水荷载效应。因此, 采取有效的排水工程措施, 控制岩土体含水率, 是增强边坡整体稳定性的重要策略。

完整的排水体系通常涵盖地表与地下两个层面。地表排水主要针对坡顶及坡面的入渗水源 (如降雨), 核心任务是拦截并导流地表径流。常见的工程措施包括布设截水沟、急流槽以及坡面排水沟等, 其目标在于快速疏导地表水远离坡体范围, 从而最大限度地减少水分下渗^[6]。而地下排水则致力于疏排坡体内部赋存的地下水, 常采用的手段有设置排水孔、仰斜式排水孔、水平排水隧洞或盲沟等。通过这些设施将地下水有序导出, 可有效降低地下水位, 消除或缓解水荷载对边坡稳定性的负面影响。

当公路高边坡排水系统设计存在不足时, 极易造成地表水渗入路面结构层内部, 或导致地下水通过毛细作用迁移至坡体深部。深入探究排水措施选型不当的根本原因, 可归纳为以下两方面: 其一, 设计人员能力局限, 部分设计人员专业素养不足, 难以对工程区域内的地下水资源分布特征及降水参数进行精确量化评估, 致使所选择的排水设施类型及其组合模式无法满足实际工程需求。其二, 水岩作用机制复杂, 水流对岩土体的侵蚀是一个动态变化过程, 涉及复杂的流固耦合效应与非饱和渗流理论等多学科交叉知识。准确理解和把握此类相互作用的内在机制与规律, 具有较高的难度。

3.2 支挡措施

支挡措施是公路高边坡工程中应用广泛且效果显著的加固手段, 其核心原理是通过构建特定的支挡结构, 直接抵抗或限制边坡潜在滑动体的位移, 从而提升整体稳定性。常见的支挡结构包括挡土墙与抗滑桩等。挡土墙作为一种传统而经典的支挡形式, 主要依靠自身重量及与土体间的摩阻力来平衡坡后土体产生的侧向土压力, 有效约束边坡变形^[7]。它适用于多种工况, 但往往伴随着较大的施工难度和较高的工程造价。相比之下, 抗滑桩则是一种更为深入基础的支挡结构, 它凭借桩身材料本身提供的抗滑能力以及与周围岩土体产生的摩阻力, 来稳定滑坡体或潜在滑动面。抗滑桩特别适用于治理已发生滑动或稳定性极差的边坡, 然而其施工工艺复杂, 成本投入也相对较高。

3.3 锚固措施

锚固技术是公路高边坡加固体系中不可或缺的关键一环, 其基本原理是通过在边坡内部或表面设置锚杆、锚索等专用构件, 将不稳定岩土体与深部稳定岩层或更稳固的基体牢固连接起来, 从而显著提升边坡的整体稳定性。

锚杆作为一种相对短小的锚固单元, 主要依靠其与周围岩土体产生的摩擦咬合作用来传递和分担坡体荷载, 增强局部稳定性。它具有施工相对便捷、适用性广的优点, 但其锚固深度有限, 能提供的锚固力也相对较小。而锚索则是一种更为长远的锚固结构, 它能够深入到边坡深部更稳定的岩土层中, 通过更大的摩擦力和嵌固力来提供强大的锚固效果, 特别适用于大型边坡或已发生滑动的滑坡体治理。

3.4 坡面防护措施

坡面防护作为公路高边坡加固体系中的重要组成部分, 其首要目标在于保护边坡表层岩土体免受风化剥蚀、雨水冲刷以及物理破坏, 从而维持坡面的整体性和稳定性。常见的坡面防护结构包括喷锚支护和挂网喷浆等。喷锚支护是一种综合性的防护手段, 它结合了喷射混凝土的覆盖封闭作用与锚杆的深层加固效果, 能够有效提升边坡表层的抗剪强度和整体稳定性。这种方法适用范围广, 但对施工技术要求高, 工程成本也相对较大^[8]。另一种相对简单的形式是挂网喷浆, 该方法先在坡面上铺设钢筋网, 再喷射一层混凝土进行覆盖, 主要起到防护和浅层加固的作用。挂网喷浆施工相对便捷, 成本较低, 适用于多种边坡类型。

4 结语

公路高边坡稳定性问题影响因素众多, 是一个复杂且系统的工程难题。合理选用评价方

法与加固策略是保障其安全的关键环节。本文深入剖析了影响稳定性的多重因素,探讨了多种分析方法,并结合实例论证了常用加固措施的适用性,表明排水、支挡、锚固及坡面防护等是实践中不可或缺的技术手段,其选型与成效须紧密结合具体工程条件。随着技术革新,未来该领域将迎来显著突破:数值模拟技术将以更高精度解析边坡力学响应;新型材料与工艺将推动加固结构向高效耐久方向发展;智能化监测预警体系也将持续优化升级,为高边坡的全生命周期安全管控提供有力保障。总之,公路高边坡稳定性研究与加固技术方兴未艾,唯有不断创新探索,方能满足日益增长的工程需求,并成功应对未来的技术挑战。

参考文献:

- [1] 史静,张浩,赵昕,等. 陕南某公路边坡稳定性及治理措施分析[J]. 岩土工程技术,2023,37(05):518-523.
- [2] 马荆利. 公路高边坡防护措施及稳定性分析[J]. 北方交通,2025,(04):49-52+57.
- [3] 李世文. 高速公路路堑高边坡稳定性分析及支护措施研究[J]. 公路工

程,2018,43(05):163-168.

[4] 杨伟,林义华,许媛. 某高速公路软质岩高边坡稳定性及防治措施分析[J]. 公路交通技术,2011,(01):14-16+25.

[5] 杨自广,王保武. 公路高边坡加固方案优化设计[J]. 中国高新科技,2023,(19):135-137.

[6] 宋思捷. 复杂情况下公路边坡的稳定性及抗滑桩加固分析[J]. 黑龙江交通科技,2022,45(04):49-51.

[7] 高兴杰. 公路边坡稳定性及抗滑桩加固分析[J]. 内蒙古公路与运输,2021,(05):33-36.

[8] 李发兴. 高速公路边坡工程处治设计原则与常用技术[J]. 工程建设与设计,2020,(07):133-134+138.

作者简介:陈彦希(2004.11—),男,汉,四川,宜宾学院,本科,研究方向:边坡稳定性分析

通讯作者:雷刚(1990.05—),男,汉,四川,宜宾学院,博士,研究方向:边坡稳定性分析

项目信息:本论文得到省级大学生创新创业训练计划支持项目(项目批准号S202410641155)资助