

山区公路滑坡边坡稳定性及治理措施分析

吕小盆

西藏交通勘察设计院有限公司 西藏 拉萨 850000

摘要:一直以来山区公路滑坡对交通基础设施安全构成严重威胁。尤其西藏山区大高差的地貌、复杂活跃的地质构造、混杂多变的地层岩性等特征为其典型的工程地质背景,通过系统剖析地形地貌、岩土体性质及水文地质条件等影响因素,综合运用极限平衡法、有限元法及地质力学模型试验法开展稳定性分析,揭示滑坡边坡失稳内在机制。研究表明,排水工程、支挡工程及削坡减载与反压等治理措施,能有效改善边坡稳定性。这些成果为西藏山区公路滑坡灾害防治提供了理论依据与实践指导,对保障公路安全运营具有重要意义。

关键词:山区公路;滑坡边坡稳定性;治理措施

引言

随着山区公路建设规模不断扩大,滑坡灾害频发成为制约交通发展的关键因素。滑坡边坡稳定性受地形地貌、岩土体特性及水文地质等多因素耦合作用,传统经验分析已难以满足工程需求。为此,亟需深入研究滑坡机理,探索科学有效的稳定性分析方法与治理措施。本文结合工程实际,系统分析山区公路滑坡边坡稳定性影响因素,探讨不同分析方法的适用性,并提出针对性治理方案,旨在为山区公路滑坡防治提供参考。

1 山区公路滑坡概述

山区公路滑坡是一种复杂的地质灾害现象,其形成与山区特殊的地形地貌、岩土体性质、水文地质条件以及人类工程活动密切相关。山区地形起伏剧烈,山坡陡峭,为滑坡的发生提供了天然的地形条件。在重力作用下,斜坡上的岩土体始终处于不稳定的应力状态,一旦受到外部因素干扰,平衡就可能被打破。岩土体作为山区公路滑坡的物质基础,其性质对滑坡的发生和发展影响深远。软弱岩土体,如页岩、泥岩等,强度较低,抗剪能力差,遇水后易软化,导致其承载能力大幅下降。当岩土体中存在软弱夹层或结构面时,更会成为滑动的潜在通道。山区丰富的降水是滑坡形成的重要诱因。大量雨水下渗,第一,增加岩土体的重量,使下滑力增大;第二,水会填充岩土体的孔隙,降低颗粒间的摩擦力,减小抗滑力。暴雨或连续降雨后,滑坡发生的概率显著增加。公路建设过程中的开挖、填方等工程活动,改变了原始地形地貌和岩土体的应力分布。不合理的切坡、填方可能使斜坡失去原有平衡,引发滑坡。例如,在山坡坡脚进行开挖,削弱了坡体的支撑力;在斜坡上部进行填方,增加了坡体的重量和下滑力。车辆行驶产生的动荷载,长期作用于公路及周边岩土体,也会对岩

土体的稳定性产生影响,进一步加剧滑坡的形成风险。山区公路滑坡具有突发性强、危害大的特点。滑坡发生时,大量岩土体快速滑动,可能掩埋公路、桥梁,阻断交通,造成车辆损毁、人员伤亡。被破坏的公路不仅影响当地的交通运输,还会对山区的经济发展和居民生活带来严重阻碍。滑坡发生后,修复工作难度大、成本高,需要对滑坡体进行详细勘察和分析,采取有效的治理措施,恢复公路的通行能力。

2 山区公路滑坡边坡稳定性影响因素

2.1 地形地貌

山区公路沿线地形地貌对滑坡边坡稳定性有着直接且复杂的影响。在高山峡谷区域,公路往往依山傍水修建,高陡的山坡使得斜坡临空面高度大、坡度陡,这种地形条件下,岩土体所受重力沿坡面方向的分力显著增大,致使岩土体更易克服抗滑力产生滑动趋势。坡面形态变化也会影响应力分布,当坡面存在凸出或凹进的不规则形态时,容易在局部形成应力集中现象,加速岩土体的破坏变形。地形地貌决定了汇水区域与径流路径,地势低洼且排水不畅的地带,降水易积聚形成静水压力,进一步降低边坡稳定性;地形切割强烈、沟谷发育的区域,会削弱坡体的支撑作用,使坡脚易受水流冲刷,导致边坡失稳。公路建设过程中,若开挖形成高陡边坡,改变了原有的自然地形地貌,破坏了岩土体的应力平衡状态,边坡在自身重力作用下,极易发生滑动变形,尤其是在坡顶附近,拉应力集中,易产生拉裂缝,为滑坡的发生创造条件。

2.2 岩土体性质

岩土体性质是影响山区公路滑坡边坡稳定性的内在关键因素。岩土体的类型不同,其物理力学性质存在显著差异。例如,软岩类的页岩、泥岩等,抗风化能力

弱,遇水后易软化,强度大幅降低,其黏聚力和内摩擦角减小,导致边坡抗滑能力下降。硬岩类如花岗岩、砂岩等,虽强度较高,但在节理裂隙发育的情况下,会破坏岩体的完整性,形成潜在滑动面。岩土体的颗粒组成同样影响稳定性,细粒土含量高的岩土体,透水性差,在降水作用下易形成超静孔隙水压力,降低有效应力,进而削弱土体抗剪强度;粗粒土若级配不良,颗粒间的嵌固作用弱,在振动或水流作用下,易发生颗粒移动,影响边坡整体稳定性。岩土体的结构面,包括层面、节理、断层等,对边坡稳定性影响重大。结构面的产状、密度、连通性等参数决定了潜在滑动面的形成与发展,当结构面倾向与坡面倾向一致且倾角小于坡角时,极易形成滑动面,使得岩土体沿此面滑动。岩土体的风化程度也不容忽视,风化会使岩土体结构变松散,强度降低,增加边坡失稳风险^[1]。

2.3 水文地质条件

水文地质条件对山区公路滑坡边坡稳定性起着重要的控制作用。地下水水位的升降直接影响边坡岩土体的力学性质。当地下水位上升时,岩土体饱水,重度增加,产生浮托力,有效应力减小,抗剪强度降低;地下水的渗流作用会产生动水压力,动水压力方向与渗流方向一致,当渗流方向不利于边坡稳定时,会对岩土体产生下滑推力,促使边坡滑动。降水是影响水文地质条件的主要因素之一,持续的强降雨会使岩土体含水量迅速增加,孔隙水压力增大,导致边坡稳定性急剧下降。降雨入渗还会携带细小颗粒,堵塞岩土体孔隙,改变其渗透特性,进一步影响地下水的运动规律。地下水的类型也与边坡稳定性密切相关,如承压水的存在,会对岩土体产生较大的顶托力,当压力超过上覆岩土体的承载力时,易引发边坡失稳。地下水的化学作用也不容忽视,地下水与岩土体中的矿物成分发生化学反应,会改变岩土体的物理力学性质,如溶解可溶盐会使岩土体结构变松散,降低其强度,增加滑坡风险。

3 山区公路滑坡边坡稳定性分析方法

3.1 极限平衡法

极限平衡法基于土体或岩体处于极限平衡状态的假设,通过建立力学平衡方程,对边坡稳定性进行定量评价。该方法将滑坡体视为刚体,分析滑动面处的抗滑力与下滑力,计算安全系数以判断边坡稳定状况。在具体操作中,根据不同的滑动面形状和边界条件,可采用瑞典条分法、毕肖普条分法等多种计算模型。瑞典条分法将滑动土体垂直划分成若干土条,不考虑土条间的作用力,计算过程相对简单,适用于初步估算;毕肖普条

分法则通过引入土条间的侧向力,对瑞典条分法进行改进,使计算结果更为精确,能更好地反映实际受力情况。极限平衡法的优势在于概念清晰,计算参数易于获取,工程应用广泛。其局限性也较为明显,如假设条件理想化,未充分考虑岩土体的变形特性和应力应变关系,在复杂地质条件下可能导致计算结果与实际存在偏差。

3.2 有限元法

有限元法以弹性力学、塑性力学和变分原理为理论基础,将边坡岩土体离散为有限个单元,通过求解单元节点的位移和应力,分析边坡的整体力学行为。该方法能够考虑岩土体的非线性本构关系、复杂的边界条件以及地下水渗流等因素,可直观呈现边坡在不同工况下的应力、应变分布和变形破坏过程。在实际应用中,通过建立三维数值模型,模拟公路边坡在开挖、降雨等作用下的力学响应,进而预测边坡的稳定性。有限元法的计算结果不仅可以提供安全系数,还能展示潜在滑动面的位置和形状,为边坡加固设计提供详细的力学依据。与极限平衡法相比,有限元法对岩土体的力学特性描述更为准确,能够模拟复杂的工程地质条件和施工过程。该方法对计算参数的依赖性较强,参数的准确性直接影响计算结果的可靠性,且计算过程复杂,对计算机性能要求较高,需要专业的软件和技术人员进行操作和分析^[2]。

3.3 地质力学模型试验法

地质力学模型试验法是在实验室条件下,按照相似理论,将实际边坡按一定比例缩小制作成模型,通过模拟边坡的地质条件和受力状态,研究边坡的变形破坏机制和稳定性。该方法通过在模型中设置传感器,实时监测模型在加载过程中的位移、应力等物理量变化,直观观察边坡从变形到失稳的全过程。在制作模型时,需根据实际岩土体的物理力学性质,选用合适的相似材料,如石膏、重晶石粉等,通过调整材料配比来模拟不同的岩土体特性。试验过程中,可采用重力加载、离心加载等方式模拟实际边坡所受的重力、地震力等荷载。地质力学模型试验能够真实反映边坡的地质结构和力学行为,为边坡稳定性分析提供直观可靠的数据。其局限性在于试验成本较高,制作模型和开展试验所需的时间较长,且由于模型尺寸和加载条件的限制,难以完全再现实际边坡的复杂地质条件和长期演化过程,试验结果的推广应用存在一定的局限性。

4 山区公路滑坡边坡治理措施

4.1 排水工程

(1) 地表排水系统通过截水沟、排水沟等设施,将滑坡体周边及表面水流快速引导至安全区域,降低雨水

入渗对边坡岩土体的软化作用。截水沟设于滑坡体后缘5-10m处；排水沟沿表面布置，合理规划走向，用设施处理高差，避免冲刷坍塌。（2）地下排水系统采用仰斜排水孔、盲沟等结构，有效降低滑坡体内部水位，减小孔隙水压力。仰斜排水孔按梅花形布置，孔径100-150mm，孔深根据地下水位和滑坡体厚度确定，内置滤水管以防止泥沙堵塞，通过重力作用将地下水排出；盲沟则采用透水性材料填充，如级配碎石、砂砾石，外部包裹土工布，拦截并排除地下水，改善岩土体力学性能。（3）坡面排水设施包括坡面排水沟、排水孔和排水缝等，防止坡面径流汇集形成集中冲刷。坡面排水沟沿坡面台阶或凹槽布置，与地表排水系统连通；排水孔垂直或斜向打入坡体，将坡体内部积水排出；排水缝则在坡面防护结构施工时预留，填充透水性材料，避免积水对防护结构产生不利影响，增强边坡整体稳定性^[3]。

4.2 支挡工程

（1）抗滑桩作为常见的支挡结构，通过嵌入稳定地层的锚固段提供抗滑力，抵抗滑坡推力。根据滑坡规模和地质条件，选择矩形或圆形截面，桩径一般为1.2-3m，桩间距3-6m，采用人工挖孔或机械成孔，钢筋混凝土浇筑，桩顶设置冠梁连接，增强整体协同作用，有效将滑坡推力传递至稳定地层。（2）挡土墙依靠自身重力或结构形式抵抗滑坡土体压力，有重力式、悬臂式、扶壁式等类型。重力式挡土墙采用块石或混凝土砌筑，适用于小型滑坡或浅层滑坡治理，通过增大墙体断面和基础埋深提高稳定性；悬臂式和扶壁式挡土墙利用钢筋混凝土结构特性，以较小断面尺寸提供较大抗滑能力，常用于挖方边坡或地形受限区域，减少对周边环境的破坏。（3）预应力锚索框架是主动支挡技术，通过预应力锚索将滑坡体与稳定岩体紧密锚固，框架梁则将锚索拉力均匀传递至坡体。锚索钻孔直径130-150mm，锚固段长度不小于8m，张拉锁定预应力值根据滑坡推力计算确定，框架梁采用钢筋混凝土现浇，形成空间框架结构，有效限制坡体变形，增强边坡整体稳定性和抗滑能力。

4.3 削坡减载与反压

（1）削坡减载通过削减滑坡体上部岩土体重量，降

低下滑力。根据滑坡体形态和稳定性计算结果，合理确定削坡范围和坡度，一般采用分级削坡，每级高度8-10m，台阶宽度2-3m，削坡后坡面采用浆砌片石、混凝土格构等防护措施，防止坡面风化和雨水冲刷。对于高陡边坡，可结合锚杆、锚索等加固措施，提高坡面稳定性，减少滑坡风险。（2）反压是在滑坡体前缘堆积土石材料，增加抗滑力。反压材料选择透水性好、强度高的砂石料或块石，堆积高度和宽度根据滑坡推力计算确定，形成反压平台。反压平台与滑坡体之间设置排水设施，避免积水影响反压效果，通过增加滑坡体前缘抗滑力，平衡后部下滑力，改善边坡整体受力状态，提高稳定性。（3）削坡减载与反压结合使用时，需进行详细的地质勘察和力学计算，优化治理方案。先通过削坡减少滑坡体上部荷载，降低下滑力，再在滑坡体前缘进行反压，增加抗滑力，同时完善排水系统，减少水对边坡的不利影响，综合提升边坡稳定性，确保山区公路运营安全，有效治理滑坡灾害^[4]。

结语

综上所述，山区公路滑坡边坡稳定性受多种复杂因素影响，通过科学运用极限平衡法、有限元法等分析手段，可准确评估边坡稳定性状态。排水工程、支挡工程等治理措施的合理应用，能显著提升边坡稳定性，保障公路安全运行。滑坡灾害具有动态性与复杂性，未来需进一步结合新型监测技术与智能分析方法，完善山区公路滑坡防治体系，提高灾害防控能力，为山区交通建设与运营筑牢安全屏障。

参考文献

- [1]宋昱宇.某山区公路边坡稳定性分析及滑坡治理措施[J].工程技术研究,2020,5(7):72-74.
- [2]方鑫.山区公路滑坡边坡稳定性分析及治理方法研究[J].工程建设与设计,2021(5):55-57.
- [3]杨浩琼.云贵山区公路边坡稳定性分析及滑坡防治措施[J].装饰装修天地,2020(3):338,341.
- [4]张潇敏,王约斌.山区公路滑坡稳定性分析与治理[J].甘肃水利水电技术,2024,60(2):57-60.