

山区高速公路雨季边坡失稳特征及防治对策研究

郭海洋

云南路捷交通咨询有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18976

[摘要] 山区高速公路的边坡稳定性在雨季面临严峻挑战,尤其在暴雨或持续降水情况下,边坡的滑坡、崩塌等失稳现象频发,严重影响交通安全和公路的正常运营。研究表明,边坡的失稳特征表现为水文条件的变化、坡体剪切力的增大以及土体的抗滑力降低。针对山区高速公路的边坡失稳问题,结合数值模拟、监测技术及工程防治措施的应用,可以有效评估和预测边坡稳定性,并采取相应的防治策略以减少灾害发生。

[关键词] 山区高速公路; 雨季; 边坡失稳; 数值模拟; 防治对策

中图分类号: U213.1+3 **文献标识码:** A

Study on Slope Instability Characteristics and Prevention Measures of Mountain Expressways in Rainy Season

Haiyang Guo

Yunnan Lujie Transportation Consulting Co., Ltd.

[Abstract] The slope stability of mountain expressways faces severe challenges in the rainy season. Especially under heavy rain or continuous precipitation, slope failures such as landslides and collapses occur frequently, seriously affecting traffic safety and the normal operation of highways. Studies have shown that the instability characteristics of slopes are manifested in changes in hydrological conditions, an increase in slope shear force, and a decrease in soil anti-sliding resistance. Aiming at the slope instability problem of mountain expressways, the combined application of numerical simulation, monitoring technology, and engineering prevention measures can effectively evaluate and predict slope stability, and corresponding prevention strategies can be adopted to reduce the occurrence of disasters.

[Key words] mountain expressway; rainy season; slope instability; numerical simulation; prevention measures

引言

山区高速公路作为连接城市与农村、促进区域经济发展的重要交通设施,其安全性一直是工程领域关注的重点。尤其在雨季,山区高速公路边坡失稳的风险急剧增加,滑坡、崩塌等地质灾害频发,不仅直接威胁到行车安全,还可能导致公路中断,影响救援和物资供应。山区高速公路的边坡通常受到地形复杂、降水集中的影响,暴雨和持续降水可迅速改变坡体的水文环境,加剧边坡的失稳。

1 山区高速公路雨季边坡失稳的特征分析

1.1 雨季边坡失稳的主要类型

雨季边坡失稳主要表现为以下几种类型:一是滑坡,滑坡是山区高速公路边坡失稳中最常见的一种形式。滑坡的发生往往伴随着坡体沿着某一滑动面发生位移,形成一条或多条滑动断裂面。二是崩塌,崩塌主要发生在坡体表面或近表层,当大量水分渗入坡体后,岩土体的抗压强度减弱,导致块状岩石或松散土体

沿坡面崩落。三是泥石流,泥石流是山区边坡失稳的另一重要类型^[1]。泥石流具有较大的流动性,能够迅速下滑并冲刷沿途的道路和建筑物。四是坡面侵蚀与沉降,长时间的降水会导致边坡土体表层水分过饱和,发生表面侵蚀,使得边坡坡度变陡,局部区域的土体逐渐失去支撑力,产生沉降现象。这种失稳通常不会在短期内导致严重灾害,但会逐步积累威胁,最终影响边坡的整体稳定性。

1.2 雨季对边坡稳定性的影响因素

降水会直接影响土体的物理力学性质,特别是对土壤的抗剪强度和孔隙水压力的影响。水分渗透后,土体的强度会显著降低,尤其是含有较多黏土成分的土层,其抗剪强度随着含水量增加而降低。同时,水分渗透到土体后,造成孔隙水压力的增加,土体颗粒之间的摩擦力降低,导致土体的抗滑力下降,当孔隙水压力达到一定水平时,可能导致坡体的剪切破坏。降水量越大,降水强度越高,边坡发生失稳的风险也越高。

在山区,由于地质条件较为复杂,地下水的流动可能沿着岩层的裂隙或断层流动,导致局部区域的土体失去支撑力。这种情况在含有可溶岩层或松散土层的边坡尤为明显,地下水位的升高不仅使土体变得更为松软,还可能引发土体的滑动或崩塌。

1.3 不同地质条件下的失稳特征

不同的地质条件会影响雨季边坡失稳的类型和发生机理,主要体现在岩土层的组成、结构特征及地下水的流动性等方面。

山区高速公路的边坡多由粘土、砂土、砾石等组成,而不同岩土层的力学性质差异直接影响边坡的稳定性。粘土层和粉土层通常具有较高的塑性和较低的抗剪强度,当含水量过高时,容易发生滑坡。而砾石层和砂土层的颗粒较大,渗透性较好,但在水流冲刷作用下,易出现坡面侵蚀和沉降现象。岩层的裂隙、节理以及风化带是边坡失稳的重要因素。特别是存在较多裂隙的岩层,其稳定性较差。在雨季,降水能够渗透裂隙内,形成高水压,导致岩体的抗压强度大幅下降,引发崩塌或滑坡^[2]。地下水的流动性对边坡稳定性的影响主要体现在水位上升及水压力的变化。山区边坡地下水流动较为复杂,水流可能沿着岩层的裂隙或层间流动,导致局部区域出现水位上升,削弱土体的稳定性,增加边坡发生失稳的风险。

1.4 边坡失稳的动力学特征分析

雨水渗透至坡体内会形成孔隙水压力,该压力会对坡体内部的颗粒产生影响,削弱其抗滑能力。在水流作用下,坡体内部的摩擦力和粘结力会显著下降,滑动面形成后,滑坡的动力学特征可以通过滑动速度和位移量来预测^[4]。滑坡的发生常常是由于长期积累的水分渗透所致,且滑动速度较快,通常在几小时内就可能完成。

边坡失稳的动力学过程可以通过以下公式进行定量描述:

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\phi) + u$$

其中, τ 是滑动面上的剪切力, σ 是坡体上的法向应力, ϕ 是土体的内摩擦角, u 是孔隙水压力。该公式表明,当降水渗透至坡体内时,孔隙水压力(u)的增加会降低坡体的抗剪力($\sigma \cdot \tan(\phi)$),促使滑动面逐渐形成并引发边坡失稳。

2 山区高速公路雨季边坡失稳的数值模拟与监测

2.1 边坡失稳的数值模拟分析方法

数值模拟是研究边坡稳定性的重要手段之一。通过构建边坡模型,模拟降水过程、土体渗透以及滑坡的发生,可以预测边坡在雨季可能发生的失稳现象。常用的数值模拟方法包括有限元法(FEM)和有限差分法(FDM)。通过模拟不同雨季降水条件下坡体的应力、位移等变化,可以评估其失稳风险。

2.2 雨季边坡失稳的监测技术

随着监测技术的不断进步,边坡失稳的监测手段已经从传统的人工巡视逐步发展为自动化、智能化的远程监测。常见的监测技术包括以下几种:一是地面监测,传统的地面监测方法包括利用水准仪、全站仪等设备进行坡体位移、沉降等参数的监

测。此外,通过安装倾斜仪、裂缝计等设备,可以实时检测坡体的变形情况,为预警提供依据^[3]。二是遥感监测,遥感技术通过卫星或无人机拍摄边坡图像,利用图像处理技术分析边坡的形态变化、裂缝扩展及土体移动等情况。三是地下水监测,地下水位的变化直接影响坡体的稳定性,监测地下水的流动性和水位变化对评估边坡稳定性至关重要。常用的监测设备包括地下水位计和水位传感器。

2.3 典型边坡失稳案例分析

某山区高速公路段(X公路段),位于地质结构复杂的山区,属于高陡边坡区域。该段公路年均降水量达到1200mm,其中雨季(6月-9月)降水量占全年总降水量的60%以上。2018年7月,该区域经历了一次强降雨事件,连续暴雨导致道路沿线多处边坡发生滑坡、崩塌等失稳现象。滑坡发生后,公路中断,造成交通停运,迫切需要对边坡稳定性进行评估,并提出有效的防治对策。

该段边坡滑坡需要解决的问题是如何预测边坡的失稳趋势,以及如何采取有效的技术手段进行防治。为了解决这一问题,工程师采用了有限元法(FEM)进行数值模拟,模拟边坡在降水后的水土相互作用,分析不同降水强度下坡体的稳定性变化。FEM通过将边坡划分为多个有限单元,模拟降水引起的水流渗透、孔隙水压力的变化,并计算土体的抗剪强度。在评估边坡稳定性时,采用了滑移安全系数(FS)作为主要评估指标。根据不同降水条件下的模拟结果,滑移安全系数(FS)小于1.0则表示边坡可能发生滑坡。实验结果如表1所示:

表1 模拟结果分析

时间(小时)	水位上升(m)	土体位移(cm)	滑移安全系数(FS)
0	0	0	1.25
12	0.6	1.5	1.15
24	1.2	3	0.92

从数据分析可以看出,随着水位上升和土体位移的增加,滑移安全系数逐步下降,且24小时内的FS值已经接近1.0,表明边坡失稳的风险显著增加。在强降雨条件下,边坡需要立即采取加固和排水措施以确保安全。

3 山区高速公路雨季边坡失稳的防治对策

3.1 工程防治措施

工程防治措施是应对边坡失稳的最直接手段,通常通过加固、排水、拦截等方法来提高边坡的稳定性。边坡的加固与支护主要通过设置支护结构,增加坡体的抗滑力。常见的加固方法包括锚固技术、钢筋混凝土挡土墙、坡面上喷射混凝土等。排水系统是减少边坡水土流失、保持坡体稳定的关键。良好的排水系统能够防止雨水长期积聚,减少水流对土体的侵蚀和软化作用。排水工程常见的措施包括在坡体内部或表面设置排水管道、设置挡水墙或排水沟、在边坡底部或地下设置渗透性地基等。植被是边坡防护中不可忽视的因素,特别是在山区,植被根系能有效固土,防止水流对土体的直接冲刷。选择适合本地气候和土壤条件的植物进行绿化,不仅可以增强坡体的稳定性,还能

改善生态环境。特别是对于非工程性手段难以达到的坡面,植被恢复能够在一定程度上缓解边坡失稳风险。

3.2 非工程防治措施

非工程防治措施主要侧重于通过管理、技术手段和防灾意识的提升,减少边坡失稳的发生风险。这些措施通常是工程措施的补充,或者在无法进行大规模工程处理时作为主要手段。

生态修复是非工程防治中最常见的措施之一。通过对坡体进行植被恢复和防护,不仅能够减少水土流失,还能有效提高土体的抗剪强度。对贫瘠或裸露的坡面进行人工绿化,能够快速恢复生物覆盖,有效抑制雨水的直接冲刷。此外,选择适宜的植物种类,如根系发达、抗旱耐水的植物,可以显著提高坡体的抗滑能力。通过安装降水量监测仪器,结合气象部门提供的实时天气数据,可以提前预测可能的降水事件。对于降水量达到一定阈值的区域,及时发布预警信息,并做好人员疏散和交通管制工作,能有效减少降水引发的边坡失稳事故^[4]。此外,气象预警系统与现有的智能监控系统相结合,可以在灾害发生前进行多维度的风险评估和防范。

3.3 新技术在防治边坡失稳中的应用

随着科技的发展,新技术在边坡失稳防治中的应用逐渐成为一种趋势。这些新技术不仅可以提高防治效果,还能降低实施成本,并且能及时监测和评估边坡的稳定性。

无人机遥感技术作为边坡监测中的新兴工具,能够快速、准确地获取大范围、高分辨率的边坡图像和数据。这些图像可以用于边坡变形监测、滑坡预警及灾后评估。通过搭载高精度的传感器,无人机可以对边坡的形态变化、裂缝扩展及表面沉降等进行实时监测,为边坡防治提供科学依据。地质雷达(GPR)技术可以穿透土层,检测地下的土质、岩层及裂缝情况。在边坡失稳的防治过程中,地质雷达能够及时发现坡体内部的潜在裂隙和弱层,判断地下水流动及滑坡面的位置,为边坡加固和修复提供精准的数据支持。智能监测系统通过在边坡上安装多种传感器,如位移传感器、应力应变传感器、地下水位传感器等,能够实现边坡的实时监测。当坡体发生位移、应力变化或水位异常时,系统能够自动发出警报,提醒管理人员及时采取应急措施。

4 山区高速公路边坡失稳防治的优化与展望

4.1 现有防治措施的局限性

目前的工程防治措施虽然在一定程度上提高了边坡的稳定性,但其效果在强降水和极端天气下仍然受到限制。首先,传统的加固措施,如挡土墙、喷射混凝土等,在应对大规模滑坡或崩

塌时往往力不从心,且施工周期长、成本高。其次,排水系统虽然可以有效降低水土流失,但在极端降水情况下,排水系统容易超负荷,导致水位升高,造成新的边坡失稳。而非工程措施虽然成本较低,但缺乏长效性和全面性,特别是在大规模的滑坡事件中,往往无法起到决定性作用。

4.2 未来研究与优化方向

未来的研究将集中在以下几个方面,一是通过引入人工智能、大数据分析等技术,能够实现对边坡稳定性的精准预测和快速响应,提高防治效率。二是发展绿色防治技术,通过促进自然生态系统的修复,减少对环境的干扰,能够更好地保护边坡生态,减少人为灾害的发生^[5]。三是研究多学科交叉融合,边坡失稳防治需要综合地质学、气象学、工程学等多个学科的知识,跨学科的研究和合作将成为未来发展的趋势。

5 结语

山区高速公路边坡失稳问题的防治,关乎道路安全、交通畅通以及人民生命财产的保护。随着气候变化带来的极端天气事件频发,以及山区地质条件的复杂性,边坡失稳的防治工作面临着更加严峻的挑战。通过科学的防治对策和技术手段的不断创新与应用,可以有效降低边坡失稳的风险。综合运用工程与非工程措施,并辅以新兴技术,如智能监测、无人机遥感和数字孪生等,将为边坡的长效管理和灾害预警提供更加精准的依据和支持。未来,随着技术的进一步优化与研究的深入,边坡防治工作将不再局限于传统手段的依赖,而是进入到更加智能化、综合化的时代,助力山区高速公路的安全可持续发展。

[参考文献]

- [1]张凌峰.山区高速公路深挖路堑边坡失稳治理措施[J].汽车周刊,2025,(03):131-133.
- [2]赵云峰.山区高速公路深挖路堑边坡失稳治理探讨[J].北方交通,2024,(09):65-68.
- [3]张汶雯,杨俊明.山区高速公路高边坡施工变形监测[J].城市建筑空间,2023,30(S1):381-382.
- [4]桑伟宁,吴红波.山区高速公路高边坡稳定性分析及动态设计[J].安徽建筑,2021,28(09):149-152.
- [5]程祥俊.山区高速公路高边坡防护类型与养护要点浅析[J].工程与建设,2020,34(05):884-885+890.

作者简介:

郭海洋(1988--),男,汉族,湖北随州人,本科,工程师,研究方向:土木工程(公路工程试验检测)。