

高烈度地震区边坡稳定性分析与支护优化设计

张燕江¹, 徐勇², 李文³

¹深圳市工勘岩土集团有限公司四川分公司 四川成都

²四川省兴文石海天下奇文化旅游投资有限责任公司 四川宜宾

³四川兴林建设工程有限公司 四川成都

【摘要】高烈度地震区边坡稳定性分析与支护优化设计是保障边坡工程安全的关键。地震作用下, 边坡岩土体应力状态发生剧烈变化, 易引发失稳。本研究综合考虑地震动特性、边坡几何形态和岩土体性质等因素, 采用数值模拟方法分析边坡稳定性, 识别潜在失稳区域。在此基础上, 提出支护优化设计策略, 选择合适的支护结构形式和参数, 提高支护结构的抗震性能和耐久性。通过数值模拟和现场监测验证设计的有效性, 为地震区边坡工程提供科学依据。

【关键词】高烈度地震; 边坡稳定性; 支护优化; 数值模拟; 抗震性能

【收稿日期】2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】2025 年 7 月 11 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250346

Analysis of slope stability and optimization of support design in high-intensity seismic zones

Yanjiang Zhang¹, Yong Xv², Wen Li³

¹Shenzhen Gongkan Geotechnical Group Co., Ltd. Sichuan Branch, Chengdu, Sichuan

²Sichuan Xingwen Shihai tiantianqi Cultural Tourism Investment Co., Ltd., Yibin, Sichuan

³Sichuan Xinglin Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】The analysis of slope stability and the optimization of support design in high - intensity seismic zones are crucial for ensuring the safety of slope engineering. Under seismic action, the stress state of slope rock - soil mass undergoes drastic changes, which can easily lead to instability. This study comprehensively considers factors such as the characteristics of seismic motion, slope geometry, and rock - soil mass properties. It employs numerical simulation methods to analyze slope stability and identify potential instability regions. Based on this, strategies for the optimization of support design are proposed, including the selection of appropriate support structure forms and parameters to enhance the seismic performance and durability of the support structures. The effectiveness of the design is verified through numerical simulation and field monitoring, providing a scientific basis for slope engineering in seismic zones.

【Keywords】High - intensity seismic; Slope stability; Support optimization; Numerical simulation; Seismic performance

引言

高烈度地震区的边坡工程面临着严峻的抗震挑战。地震引起的强烈震动会改变边坡岩土体的应力状态, 导致其力学性质劣化, 进而引发滑坡等地质灾害。因此, 深入研究地震作用下边坡的稳定性, 并提出有效的支护优化设计策略, 对于保障边坡工程的安全性和可靠性具有重要意义。通过综合应用稳定性分析和支护设计, 可以实现对边坡在地震作用下的全面评估和有效加固, 为地震区边坡工程的设计和加固提供科学依据。

1 高烈度地震区边坡稳定性分析

在高烈度地震区, 地震作用对边坡稳定性的影响

是多方面的。地震产生的强烈震动会导致边坡岩土体内部应力状态发生剧烈变化, 这种变化可能使原本处于稳定状态的边坡逐渐失去平衡。地震波的传播会使边坡岩土体受到周期性的剪切和拉伸作用, 进而改变岩土体的力学性质, 如强度、变形模量等。特别是对于那些地质条件复杂的边坡, 如存在软弱夹层、裂隙发育的岩体边坡, 地震作用更容易引发局部的剪切破坏或整体的滑动失稳。

地震作用下边坡稳定性分析需要综合考虑多种因素。地震动特性是影响边坡稳定性的关键因素之一, 包括地震加速度、地震持续时间、地震波的频率成分等。

地震加速度的大小直接影响边坡岩土体所受的惯性力,而地震持续时间和频率成分则决定了边坡在地震作用下的响应过程。边坡的坡度、坡高、坡形等因素会影响地震力的分布和传递路径,而岩土体的抗剪强度、弹性模量等力学参数则决定了边坡在地震作用下的变形和破坏特征^[1]。地下水的存在会降低岩土体的有效应力,从而削弱边坡的稳定性。

在分析方法上,目前主要有基于极限平衡理论的传统方法和基于数值模拟的现代方法。极限平衡理论通过假设边坡在破坏时处于极限平衡状态,利用静力平衡方程和极限平衡条件来求解边坡的安全系数。这种方法简单直观,但在地震作用下,由于地震惯性力的引入,传统的极限平衡理论存在一定的局限性。数值模拟方法则能够更全面地考虑地震作用下边坡的动态响应过程^[2]。通过建立边坡的有限元或有限差分模型,结合地震动输入,可以模拟边坡在地震作用下的应力、应变和位移变化,从而更准确地评估边坡的稳定性。数值模拟方法还可以考虑岩土体的非线性特性、地震动的非平稳特性以及边坡与周围介质的相互作用等因素,因此在复杂边坡稳定性分析中具有明显优势。在实际工程应用中,高烈度地震区边坡稳定性分析还需要结合具体的工程地质条件和地震环境进行针对性的研究。对于不同类型的边坡,如土质边坡、岩质边坡以及土岩组合边坡,其稳定性分析的重点和难点有所不同。土质边坡在地震作用下更容易发生液化和流动变形,因此需要重点分析土体的液化特性和抗剪强度变化;岩质边坡则需要关注裂隙的扩展和贯通对边坡稳定性的影响。

2 地震区边坡支护优化设计策略

在地震区,边坡支护结构的设计面临着复杂的挑战。由于地震作用下边坡岩土体的力学性质和应力状态会发生显著变化,传统的支护设计方法往往难以满足抗震要求^[3]。因此,必须结合地震区的特殊地质条件和地震动特性,提出针对性的支护优化设计策略,以提高边坡在地震作用下的稳定性和安全性。

地震区边坡支护优化设计的核心在于合理选择支护结构形式和参数。常见的支护结构形式包括锚杆支护、抗滑桩支护、锚索框架支护、喷锚支护等。在地震作用下,锚杆支护通过锚杆与岩土体之间的锚固作用,能够有效增强边坡的整体稳定性,但需要考虑锚杆的抗拔力和锚固体与岩土体之间的粘结强度在地震作用下的变化。抗滑桩支护则通过在边坡内部设置抗滑桩,阻挡滑动岩土体的运动,其设计需要精确计算桩的受

力和变形,并考虑地震作用下桩身的抗震性能^[4]。锚索框架支护结合了锚索的高抗拉强度和框架的稳定性,能够有效控制边坡的变形,但在地震作用下,锚索的张拉力和框架的连接部位需要进行抗震加固。喷锚支护则通过喷射混凝土和锚杆的联合作用,形成一层保护层,防止边坡表面岩土体的剥落和滑动,其设计需要考虑喷射混凝土的厚度和强度以及锚杆的布置密度。

在选择支护结构形式时,还需要综合考虑边坡的地质条件、地震烈度、边坡高度和坡度等因素^[5]。对于地质条件较好、地震烈度较低的边坡,可以采用相对简单的支护形式,如喷锚支护;而对于地质条件复杂、地震烈度较高的边坡,则需要采用更为可靠的支护结构,如抗滑桩与锚索框架的联合支护。地震区边坡支护优化设计还需要考虑支护结构的抗震性能。在地震作用下,支护结构不仅要承受岩土体的侧向压力,还要承受地震惯性力的作用。因此,支护结构的设计需要考虑其抗震能力,包括抗震强度、抗震刚度和抗震延性等。抗震强度是指支护结构在地震作用下能够承受的最大荷载能力;抗震刚度则决定了支护结构在地震作用下的变形程度;抗震延性则是支护结构在超过弹性极限后仍能继续承受荷载的能力。通过提高支护结构的抗震性能,可以有效减少地震对边坡的破坏作用,提高边坡的抗震稳定性。现场监测则可以通过在边坡上安装各种传感器,实时监测边坡的位移、应力、应变等参数,及时发现潜在的不稳定因素,并根据监测数据对支护结构进行调整和加固。通过数值模拟和现场监测的结合,可以更好地验证支护优化设计的有效性,确保边坡在地震作用下的稳定性和安全性。地震区边坡支护优化设计还需要考虑支护结构的耐久性。在地震作用下,支护结构可能会受到多次地震的反复作用,因此需要选择耐久性好的支护材料和结构形式^[6]。

3 边坡稳定性分析与支护优化的综合应用

在高烈度地震区,边坡稳定性分析与支护优化设计的综合应用是确保边坡工程安全的关键环节。通过将稳定性分析的结果与支护优化设计相结合,可以实现对边坡在地震作用下的全面评估和有效加固,从而提高边坡的抗震性能和整体稳定性。

边坡稳定性分析为支护优化设计提供了基础数据和理论支持。通过详细的稳定性分析,可以明确边坡在地震作用下的潜在失稳区域、关键影响因素以及可能的破坏模式。这些信息对于支护结构的布局和设计至关重要^[7]。如果稳定性分析显示边坡的某一部分在地震作用下容易发生剪切破坏,则可以在该区域重点布置

抗剪性能强的支护结构,如抗滑桩或锚索框架。同时,稳定性分析还可以提供边坡的安全系数,为支护设计提供量化依据。支护优化设计则为边坡稳定性分析提供了实际工程的解决方案。支护结构的合理设计和优化不仅可以增强边坡的稳定性,还可以有效控制边坡的变形和位移。在地震区,支护结构需要具备良好的抗震性能,包括足够的强度、适当的刚度和足够的延性。通过优化支护结构的参数,如锚杆的长度、抗滑桩的截面尺寸等,可以提高支护结构的抗震能力。同时,支护结构的设计还需要考虑地震作用下的动态响应。通过数值模拟分析支护结构在地震作用下的应力应变分布,可以优化支护结构的连接部位和加固措施,确保支护结构在地震作用下能够有效工作。在实际工程中,边坡稳定性分析与支护优化设计的综合应用需要紧密结合具体的工程地质条件和地震环境。对于不同类型的边坡,如土质边坡、岩质边坡和土岩组合边坡,其稳定性分析和支护设计的重点有所不同。岩质边坡则需要关注裂隙的扩展和贯通对边坡稳定性的影响,可以通过布置锚杆和锚索来控制裂隙的扩展。对于土岩组合边坡,由于其力学性质的不均匀性,需要综合考虑土体和岩体的相互作用,采用多种支护结构的联合加固方式。此外,边坡稳定性分析与支护优化设计的综合应用还需要考虑工程的经济性和施工的可行性。在设计过程中,需要在保证边坡稳定性的前提下,尽量降低支护成本,提高工程的经济效益。同时,支护结构的设计还需要考虑施工条件和施工技术的限制。通过优化支护结构的设计,可以减少施工难度和施工成本,提高工程的可行性和经济性^[8]。在实际工程中,边坡稳定性分析与支护优化设计的综合应用还需要结合现场监测数据进行动态调整。通过在边坡上安装各种传感器,如位移计、压力传感器等,可以实时监测边坡的位移、应力等参数

4 结语

高烈度地震区边坡稳定性分析与支护优化设计的

综合应用是确保边坡工程安全的重要手段。通过深入分析地震作用下边坡的稳定性,结合具体的工程地质条件和地震环境,提出针对性的支护优化设计策略,可以有效提高边坡的抗震性能和整体稳定性。在实际工程中,结合数值模拟和现场监测技术,可以进一步验证设计的有效性,确保边坡在地震作用下的安全性和可靠性。

参考文献

- [1] 叶玉洁,许声斌.边坡稳定性分析及治理措施研究[J].石材,2025,(08):42-44.
- [2] 易明星.基于有限元的高边坡稳定性分析[J].价值工程,2025,44(20):10-12.
- [3] 韩宇豪,王海军,马媛.高地应力软岩隧道开挖及支护技术优化设计[J].中华建设,2025,(08):189-191.
- [4] 李婷婷,孙志彬,王博文,等.地震 Hoek-Brown 岩质边坡拟动力稳定性图表[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(07):975-982.
- [5] 朱顺望,周凤玺,梁玉旺.地震作用下土坡稳定性的变分极限平衡分析[J].振动工程学报,2025,38(07):1638-1644.
- [6] 王啸东.边坡在地震作用下的稳定性分析方法综述[J].四川建筑,2025,45(03):165-167.
- [7] 张鸥,魏匡民.高地震烈度区高沥青混凝土心墙砂砾石坝边坡稳定性研究[J].杨凌职业技术学院学报,2025,24(02): 1-7.
- [8] 湛永刚,张俊,王寿龙.地震作用下反倾边坡动力响应规律及稳定性影响因素研究[J].地震工程学报,2025,47(04): 876-885.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

