

复杂地质条件下岩土边坡地震动力响应特性及加固措施研究

孙坤元

江苏省地质工程勘察院有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2026010036

摘要 : 本文聚焦复杂地质条件下岩土边坡的地震动力响应特性及加固措施, 系统分析复杂地质条件的分类及其对边坡地震响应的的影响机理, 构建了动力本构模型、地震输入方法、数值模拟与模型试验相结合的多维度分析体系, 并针对构造复杂、岩土体性质复杂及水文地质复杂等典型场景, 提出支挡结构、注浆、锚固及植被防护等加固技术的适用性、作用机制及优化设计方法。研究表明, 复杂地质条件通过改变岩土体动力特性、地震波传播规律加剧边坡失稳风险, 而数值模拟与模型试验的结合可有效量化加固措施的减震效果, 为复杂地质边坡的抗震设计提供理论与技术支撑。

关键词 : 复杂地质条件; 岩土边坡; 地震动力响应; 抗震加固

Research on Seismic Dynamic Response Characteristics and Reinforcement Measures of Rock-Soil Slopes under Complex Geological Conditions

Sun Kunyuan

Jiangsu Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : This paper focuses on the seismic dynamic response characteristics and reinforcement measures of rock-soil slopes under complex geological conditions. It systematically analyzes the classification of complex geological conditions and their impact mechanisms on seismic responses of slopes, constructs a multi-dimensional analysis system that integrates dynamic constitutive models, seismic input methods, numerical simulations, and model tests. Furthermore, it proposes the applicability, action mechanisms, and optimized design methods for reinforcement techniques such as retaining structures, grouting, anchoring, and vegetation protection in typical scenarios involving complex structures, rock-soil properties, and hydrogeological conditions. Research indicates that complex geological conditions exacerbate the risk of slope instability by altering the dynamic properties of rock-soil masses and the propagation patterns of seismic waves. The combination of numerical simulation and model testing effectively quantifies the seismic mitigation effects of reinforcement measures, providing theoretical and technical support for seismic design of slopes under complex geological conditions.

Keywords : complex geological conditions; rock-soil slope; seismic dynamic response; seismic reinforcement

引言

随着我国西部山区基础设施建设向高海拔、复杂地质区域的不断推进, 传统的边坡抗震设计理论与方法已难以满足工程需求。因此, 深入探究复杂地质条件下岩土边坡地震动力响应特性, 研发高效的抗震加固技术, 成为保障重大工程安全建设与运维的迫切需求。本文通过系统分析复杂地质条件对边坡地震响应的的影响机理, 结合数值模拟与模型试验方法, 揭示边坡地震动力响应规律, 并提出针对性的抗震加固优化策略, 旨在为复杂地质边坡的抗震设计与灾害防治提供理论依据与技术支撑。

一、复杂地质条件特征及其对边坡地震响应的影响机理

(一) 复杂地质条件的界定与分类

复杂地质条件是指在地质构造、岩土体性质和水文地质等方面存在多重异常因素相互作用的特殊地质环境,可分为构造复杂型、岩土体性质复杂型、水文地质复杂型以及多因素耦合复杂型。构造复杂型以强烈构造运动形成的断层密集带和破碎带为主要特征;岩土体性质复杂型主要表现为岩土体力学参数离散性大、存在软弱结构面等;水文地质复杂型则突出体现为地下水对岩土体的软化、潜蚀等不良地质作用;而多因素耦合复杂型则是前三者或其中两者的复杂组合,这种多重因素的交互作用会显著加剧地质条件的复杂程度。

(二) 复杂地质条件对岩土体动力特性的影响

在构造复杂区域,断裂和破碎带的存在使得岩土体弹性模量降低、泊松比增大,导致其在地震动作用下更容易发生变形和破坏。例如破碎岩体在地震动作用下,颗粒间的相对滑动和错动消耗大量能量,表现出较低的动剪切模量和较大的阻尼比。岩土体性质复杂型地质条件下,软硬岩互层会引发动力响应的不均匀性。软岩部分在地震作用下率先产生塑性变形,而硬岩相对变形较小,这种差异变形会在界面处产生应力集中,加速边坡失稳。特殊土的动力特性对复杂地质条件也有重要影响,如膨胀土在含水率变化时,其动强度和动变形特性会发生剧烈改变,降低边坡的抗震性能。水文地质条件复杂时,地下水的存在会降低岩土体的有效应力,减小抗剪强度。地震过程中,地下水的孔隙水压力来不及消散,进一步削弱岩土体的承载能力,使得边坡更容易发生滑动。同时地下水的流动还可能携带岩土颗粒,造成岩土体结构破坏,影响其动力特性。

(三) 复杂地质条件下地震波传播与散射机理

地震作用下岩石边坡动力反应性是指地震动引起边坡的加速度、动应力、动应变、动位移等的响应。它不仅与输入地震波的加载方式和地震动特性有关,而且与岩体本身的物理力学性质和结构特征有关,远比静力作用下边坡反应复杂^[1]。在复杂地质条件下,由于界面形态不规则及介质高度非均匀,地震波的传播路径趋于复杂化,容易形成多次反射和折射,从而导致波形畸变与能量衰减。地震波的散射现象主要源于地质体的非均匀性和不连续性,破碎岩体、溶洞、软弱夹层等地质结构缺陷可作为散射源,将入射波能量向各个方向散射^[2]。散射波与入射波的叠加会改变地震波的频谱特性,在特定频段形成能量集中,进而增强边坡局部区域的地震响应强度。此外,散射作用还会导致地震波能量在空间上重新分布,使得远离震源的区域也可能因散射波的汇聚叠加而承受较强的地震作用,进一步影响边坡的稳定性。

二、边坡地震动力响应特性分析模型与方法

(一) 岩土体动力本构模型

岩土体动力本构模型是描述岩土体在地震动荷载作用下应力-应变关系的核心理论工具,目前常用的模型包括线弹性模型、弹塑性模型和黏弹性模型。线弹性模型假定岩土体在地震动作用下的应力-应变关系遵循胡克定律,适用于小应变条件下的

初步分析,该模型简单易用,能够快速计算出边坡的地震响应趋势,但无法准确反映岩土体在大应变时的非线性特性^[3]。弹塑性模型则充分考虑了岩土体的塑性变形特性,通过引入屈服准则和流动法则,能够描述岩土体在达到屈服强度后的塑性流动行为,在边坡地震响应分析中,该模型可以更准确地模拟岩土体的破坏过程,但参数获取较为复杂,需要大量的试验数据支持^[4]。黏弹性模型结合了弹性和黏性特性,能够有效描述岩土体在地震动加载过程中的能量耗散和滞后效应,如 Kelvin - Voigt 模型和 Maxwell 模型,常用于高频地震波作用下的边坡动力响应分析,可精确捕捉岩土体的动态变形和能量衰减过程。

(二) 地震输入方法

地震输入方法是将地震动作用施加于边坡分析模型的关键环节,常见的地震输入方法有地震波时程输入、反应谱输入和随机地震动输入。地震波时程输入直接将实际地震记录或人工合成地震波作为输入荷载,按照时间序列施加到模型中,这种方法能够真实反映地震动的时域特性,包括地震波的持续时间、峰值加速度和频率成分,适用于非线性动力时程分析,可直观地展示边坡在地震过程中的动态响应全过程,但需要大量的地震波数据储备,且计算量较大^[5]。反应谱输入基于地震反应谱理论,将地震动对结构的作用通过反应谱曲线来体现,通过给定不同周期对应的加速度反应谱值,计算边坡在各振型下的响应,然后采用振型组合方法得到总的地震响应,该方法计算效率较高,常用于结构抗震设计的初步分析,但无法考虑地震动的时间历程特性。随机地震动输入则将地震动视为随机过程,通过功率谱密度函数来描述地震动的统计特性,能够考虑地震动的不确定性,在研究边坡在随机地震作用下的动力响应统计规律时具有独特优势^[6]。

(三) 数值模拟方法

数值模拟方法是研究边坡地震动力响应特性的重要手段,主要包括有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)和离散元法(DEM)。有限元法基于变分原理,将边坡连续体离散为有限个单元,通过求解单元刚度矩阵和整体平衡方程,得到边坡的应力、应变和位移等响应,该方法适用于求解复杂几何形状和边界条件的边坡问题,能够精确模拟岩土体的非线性本构关系和地下水渗流等复杂物理过程,在边坡地震响应分析中应用广泛^[7]。有限差分法将求解区域划分为网格,通过对微分方程进行差分离散,迭代求解各网格节点的物理量,如 FLAC 软件采用的显式有限差分法,在处理大变形和动力问题时具有计算效率高的优势,能够实时跟踪边坡在地震过程中的变形和破坏发展。离散元法将岩土体视为由大量离散颗粒组成的集合体,通过牛顿运动定律描述颗粒间的相互作用,适用于研究岩土体的大变形、断裂和坍塌等破坏现象,在分析边坡地震过程中的块体运动和失稳机制方面具有独特的优势。

(四) 模型试验方法

模型试验方法通过制作边坡物理模型,在实验室条件下模拟地震作用,直观研究边坡的地震动动力响应特性,常用的模型试验包括振动台模型试验和离心机模型试验。振动台模型试验将边坡缩尺模型放置在振动台上,通过输入不同特性的地震波,观测模型在地震作用下的变形、破坏过程和动力响应特征,该方法能够直接获取模型的位移、加速度等响应数据,验证数值模拟结果的准确性,但受模型尺寸和相似比的限制,难以完全模拟原型边坡

的真实力学行为^[9]。离心机模型试验则利用离心机产生的离心力场,使模型在高重力加速度下达到与原型相似的应力状态,通过在离心机上施加地震动,研究边坡在接近实际应力条件下的地震动力响应,能够有效克服振动台模型试验中重力相似比难以满足的问题,更真实地模拟边坡的地质条件和受力状态,为边坡抗震设计提供可靠的试验依据。

三、复杂地质边坡抗震加固措施研究

(一) 常用边坡抗震加固技术及其适用性分析

常用的边坡抗震加固技术包括支挡结构加固、注浆加固、锚固技术以及植被防护等。支挡结构如抗滑桩、挡土墙,通过提供额外的抗滑力来增强边坡稳定性。抗滑桩适用于浅层及中层滑坡,能够有效截断滑动面,在岩质边坡和土质边坡中均有广泛应用,但对于深层滑动且地质条件复杂、存在破碎带或软弱夹层的边坡,需合理设计桩长和桩间距;挡土墙则常用于坡度较缓、高度较低的边坡,重力式挡土墙依靠自身重力维持稳定,适用于地质条件较好的区域,悬臂式挡土墙则适用于地基承载力较低的情况。注浆加固是通过向岩土体中注入浆液,填充裂隙、孔隙,提高岩土体的强度和整体性。对于破碎岩体边坡,注浆可有效增强岩体的黏结力和内摩擦角;在砂土边坡中,注浆能改善砂土的密实度和抗液化能力。然而,注浆加固对地下水丰富或流速较大的区域效果受限,需提前采取止水措施^[9]。锚固技术包括锚杆和锚索,通过将拉力传递到稳定地层中,提高边坡的抗滑和抗倾覆能力。锚杆适用于浅层加固,常用于土质边坡和风化岩边坡;锚索则适用于深层加固,尤其在高陡边坡和大型滑坡治理中发挥重要作用。但在软弱岩土体中,锚固力易受蠕变影响,需定期监测和维护。植被防护通过植物根系固土、减少坡面径流冲刷,起到生态防护和增强边坡稳定性的作用,适用于土质边坡和风化程度较高的岩质边坡,但在地震强烈、地质条件极差的区域,需与其他加固技术联合使用。

(二) 加固措施对复杂地质边坡地震响应的影响数值模拟

采用数值模拟方法,如有限元法、离散元法,对不同加固措施作用下的复杂地质边坡地震响应进行研究。建立未加固边坡的数值模型,模拟其在地震作用下的位移、加速度、应力分布等响应特征,作为对比基准。针对支挡结构加固后的边坡,模拟分析抗滑桩、挡土墙对地震波传播路径的改变,以及其对边坡内部应力集中区域和潜在滑动面的影响;对于注浆加固的边坡,通过调

整注浆后岩土体的力学参数,研究其对边坡整体刚度、阻尼特性和动力响应的改善效果;在锚固技术加固的边坡模拟中,重点关注锚杆、锚索的轴力变化以及对边坡位移场和应力场的调控作用;植被防护则通过等效增加边坡表层土体的黏聚力和内摩擦角,模拟其对边坡地震响应的影响^[10]。对比不同加固措施下边坡的地震响应结果,量化分析各加固技术对边坡位移峰值、加速度放大系数、应力集中程度等关键指标的降低幅度,明确不同加固措施在复杂地质条件下的加固效果和作用机制。

(三) 复杂地质条件下加固措施优化设计

针对构造复杂型边坡,考虑断层、破碎带的影响,优化抗滑桩的布置方案,可采用群桩或变截面桩设计,增强对滑动面的拦截能力;在注浆加固时,根据断裂带的走向和宽度,合理设计注浆孔间距和深度,提高破碎岩体的加固效果。对于岩土体性质复杂型边坡,如软硬岩互层区域,采用锚杆-挡土墙联合加固方式,利用锚杆将上层软岩锚固到下层硬岩中,同时通过挡土墙抵抗浅层滑动;针对软弱夹层,可采用预应力锚索进行深层加固,提高边坡整体稳定性。在水文地质复杂型边坡中,结合地下水渗流分析,优化排水系统设计,降低孔隙水压力对边坡稳定性的影响。同时选择抗水性能好的注浆材料进行加固,防止地下水对加固效果的削弱。通过多方案比选和参数优化,建立基于复杂地质条件的边坡抗震加固优化模型,在确保加固效果的前提下,实现经济成本和施工可行性的最优平衡。

四、结束语

本文系统探讨了复杂地质条件下岩土边坡的地震动力响应特性及加固措施,通过深入分析复杂地质条件的分类、对岩土体动力特性的影响以及地震波传播散射机理,明确了地质复杂性与边坡地震响应之间的内在联系。同时结合动力本构模型、地震输入方法、数值模拟及模型试验等多种研究手段,构建了全面的边坡地震响应分析体系,为揭示边坡在地震作用下的破坏机制提供了理论与技术支撑。

然而复杂地质条件与地震动的复杂性使得研究仍存在一定局限性,未来研究可进一步探索复杂地质条件下岩土体动力特性的精细化测试方法,结合人工智能与大数据技术提升数值模拟的准确性与效率,加强加固结构与岩土体相互作用的长期性能研究,为复杂地质边坡的抗震安全提供更可靠的保障。

参考文献

- [1] 牛家永. 含小净距隧道岩石边坡地震动力响应特性与稳定性研究[D]. 中南林业科技大学, 2018.
- [2] 赵体, 陈运飞, 田维. 边坡动力响应规律探讨[J]. 水科学与工程技术, 2015, (01): 72-75. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2015.01.022.
- [3] 彭宁波. 锚固岩质边坡地震动力响应及锚固机理研究[D]. 兰州大学, 2014.
- [4] 姜彤. 边坡加卸载地震动力响应分析理论与实践[M]. 中国水利水电出版社: 2014.03.176.
- [5] 于玉贞, 邓丽军, 李荣建. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, (06): 789-792. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2007.06.009.
- [6] 刘宏基. 边坡地震动力响应离心模型试验的有限元模拟[D]. 山东大学, 2009.
- [7] 谢红强, 何江达, 符文熹. 强地震作用下复合堆积体边坡动力响应及稳定性研究[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(07): 569-574.
- [8] 王军, 刘杰, 梁桥, 等. 地震影响受锚土质边坡的稳定性分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(01): 149-155. DOI: 10.13577/j.jnd.2019.0118.
- [9] 陈建君. 复杂山区斜坡的地震动力响应分析[D]. 成都理工大学, 2009.
- [10] 郝明盛. 物性参数对黄土边坡地震响应影响的敏感性分析[D]. 中国地质大学(北京), 2014.