

地震作用下岩质边坡动力响应及失稳机制研究

黄小军 杨开国

天津华北地质勘查局核工业二四七大队 天津 301800

摘要: 本文聚焦地震作用下岩质边坡动力响应及失稳机制。先阐述地震波传播特性与动力响应影响因素,接着研究动力响应规律,包括数值模拟方法、特征及地震波参数影响。深入分析失稳模式、判据与多因素耦合机制。最后提出工程应用建议,优化抗震稳定性评估方法,给出设计、加固、监测预警等针对性防控措施,为岩质边坡抗震提供理论与技术支持。

关键词: 岩质边坡; 地震动力响应; 失稳机制

引言: 地震作为极具破坏力的自然灾害,对岩质边坡稳定性构成严重威胁。岩质边坡在地震作用下,动力响应复杂,失稳机制多样,易引发滑坡等地质灾害,造成重大损失。深入研究其动力响应规律与失稳机制,对准确评估边坡抗震稳定性、制定有效防控措施意义重大。本文将系统探讨地震作用下岩质边坡动力响应及失稳机制相关问题,为工程实践提供参考。

1 地震作用下岩质边坡动力响应基本理论

1.1 地震波传播特性

地震波作为地震能量传播的载体,其在岩质边坡中的传播特性直接影响边坡动力响应效果。地震波主要分为体波与面波,体波包含纵波(P波)和横波(S波),纵波传播速度快、压缩性强,能引起岩体体积变形;横波传播速度较慢、剪切性显著,易导致岩体剪切破坏,且对边坡影响更为剧烈。面波仅沿地表传播,振幅大、衰减慢,会加剧边坡表层岩体的振动响应。由于岩质边坡岩体存在节理、裂隙等不连续面,地震波传播时会发生反射、折射、散射等现象,导致波速衰减、振动幅值放大,且坡体不同位置的波传播特性存在差异,坡顶、坡肩等部位易出现振动叠加效应,进一步提升动力响应强度,为边坡失稳埋下隐患。

1.2 动力响应影响因素

岩质边坡动力响应受自身属性与外部环境多方面因素综合影响,各因素相互作用共同决定边坡振动效应的强弱与分布规律。岩体力学性质是核心内在因素,岩体抗压、抗剪强度越高,弹性模量越大,对地震振动的抵抗能力越强,动力响应越弱;而岩体中节理、裂隙的发育程度、产状及填充情况,会降低岩体完整性,加剧地震波的散射与能量耗散,使局部振动幅值放大^[1]。边坡几何特征影响显著,坡高越大、坡角越陡,坡体稳定性基础越差,动力响应越剧烈,且坡形(直线坡、折线坡、

弧形坡)不同,振动能量的分布与传递路径存在差异,折线坡的坡折处易出现应力集中与振动叠加。地震参数是关键外部因素,地震烈度、震级越高,地震波能量越强,边坡动力响应越明显;地震波类型、频率与边坡自振频率的耦合关系的影响,当二者接近时会发生共振,大幅提升边坡振动响应。

2 岩质边坡动力响应规律研究

2.1 数值模拟方法

数值模拟方法凭借高效、精准、可重复性强的优势,已成为岩质边坡动力响应规律研究的核心手段,能有效模拟地震作用下边坡的振动过程与响应特征。常用的数值模拟方法主要包括有限元法(FEM)、离散元法(DEM)、边界元法(BEM)及有限差分法(FDM)。有限元法适用于连续介质岩体,能精准计算边坡应力、应变及位移场分布,通过动力时程分析模拟地震全过程的响应规律,在均质或弱风化岩质边坡研究中应用广泛。离散元法针对节理发育的非连续岩体,将边坡离散为多个颗粒或块体,可模拟岩体块体的滑动、转动及碰撞,精准捕捉不连续面的动力响应特性。边界元法仅需离散边界,计算量小,适合分析无限域岩体中地震波的传播与边坡响应耦合问题。

2.2 动力响应特征分析

地震作用下岩质边坡动力响应特征主要体现在振动幅值、应力分布、位移变化及能量耗散四个核心维度,且呈现显著的空间差异性与时间演化规律。振动幅值方面,坡体振动强度从坡脚至坡顶逐渐放大,坡顶、坡肩部位振幅最大,是边坡动力响应的薄弱区域,这一现象称为“高程放大效应”,同时横波振动幅值大于纵波,对边坡破坏的贡献度更高。应力分布上,地震荷载作用下边坡内部产生交替变化的动应力,坡体中下部及节理密集区易出现应力集中,随着地震持续,动应力反复叠

加可能超过岩体强度阈值, 引发局部破坏。位移响应表现为瞬时振动位移与永久残余位移, 坡顶水平位移最为明显, 残余位移的累积会降低边坡稳定性。能量耗散主要通过岩体塑性变形、节理面摩擦滑动及岩体破碎实现, 耗散能力越强, 边坡振动响应越弱, 其耗散规律可反映边坡的抗振性能与破坏进程。

2.3 地震波参数影响分析

地震波参数的差异会显著改变岩质边坡动力响应的强度、分布及演化规律, 明确各参数影响机制是精准预判边坡地震响应效果的关键。地震波类型影响核心响应特征, 横波主导边坡剪切变形与振动幅值, 其作用下边坡动位移、动应力响应均大于纵波, 对边坡稳定性的威胁更突出; 面波会加剧边坡表层振动, 使坡顶、坡面表层岩体的振动效应大幅增强。地震波频率与边坡自振频率的匹配关系是关键因素, 当二者接近或相等时, 边坡发生共振, 动位移、动应力幅值会急剧增大, 远超普通振动工况, 易引发边坡失稳。地震持时决定动力响应的累积效应, 持时越长, 动应力反复作用次数越多, 岩体塑性变形与结构面损伤不断累积, 残余位移增大, 边坡抗振能力逐渐衰减^[2]。地震波幅值直接决定振动能量大小, 幅值越高, 边坡各部位动响应参数越大, 破坏风险也随之提升, 且不同参数组合作用下, 边坡响应呈现非线性耦合特征。

3 地震作用下岩质边坡失稳机制研究

3.1 失稳模式分类

地震作用下岩质边坡失稳模式依据岩体破坏形态、受力特征及滑动机制, 可分为四大类, 各类模式对应不同的边坡地质条件与地震响应特征。顺层滑动失稳是最常见模式, 多发生在层状岩质边坡, 地震动荷载使岩体沿软弱夹层或岩层层间产生剪切滑动, 滑动面受地震反复剪切作用逐渐贯通, 最终引发整体滑动, 其失稳速度与滑动范围受层面抗剪强度、倾角影响显著。切层滑动失稳主要出现在非层状或块状岩体边坡, 地震动产生的水平惯性力使边坡内部形成贯通的剪切滑动面, 滑动面切割岩层走向, 失稳时岩体沿剪切面整体下滑, 常伴随岩体破碎与局部坍塌。倾倒失稳多见于陡倾层状、柱状或板状岩体边坡, 地震作用下岩体受倾覆力矩影响, 绕底部支撑点转动倾倒, 易发生在坡角较陡、岩体垂直节理发育的区域, 失稳过程伴随岩体开裂与错落。崩塌失稳则表现为边坡上部岩体在地震振动下突然脱离母体, 以自由落体或翻滚形式坠落, 多发生在坡顶节理密集、岩体破碎的部位, 具有突发性强、破坏程度大的特点。

3.2 失稳判据与临界条件

地震作用下岩质边坡失稳判据是判断边坡是否发生破坏的核心依据, 临界条件则对应失稳发生时的极限状态参数, 二者为边坡抗震稳定性评估提供量化标准。常用失稳判据主要基于应力、位移、能量及强度理论四大维度, 应力判据以岩体或结构面的动剪应力是否超过抗剪强度为核心, 当动剪应力达到极限值时, 边坡进入失稳临界状态; 位移判据通过监测边坡永久残余位移, 当位移量超过允许阈值或位移速率突然增大时, 判定边坡即将失稳。能量判据认为, 地震输入边坡的能量一部分被耗散, 一部分转化为岩体变形能, 当变形能累积至岩体极限储能能力时, 边坡发生失稳破坏。强度折减法是目前应用较广的综合判据, 通过折减岩体强度参数, 直至边坡达到极限平衡状态, 此时的折减系数即为稳定性系数, 小于1时判定为失稳。临界条件受岩体性质、边坡几何、地震参数影响, 如临界动应力、临界残余位移、临界地震烈度等, 需结合具体边坡工况通过试验与模拟确定^[3]。

3.3 多因素耦合失稳机制

地震作用下岩质边坡失稳并非单一因素作用结果, 而是岩体属性、边坡结构、地震荷载及环境条件多因素耦合作用的产物, 各因素相互促进、协同演化, 最终导致边坡失稳破坏。岩体自身缺陷与地震荷载的耦合是基础, 岩体中节理、裂隙在地震动反复作用下不断扩展、贯通, 形成潜在滑动面, 同时地震动产生的惯性力增大滑动面的剪切应力, 降低抗滑力, 二者叠加加速边坡损伤进程。边坡几何特征与岩体力学性质的耦合影响失稳路径, 陡倾边坡与软弱结构面组合时, 地震动易引发结构面剪切滑移, 而缓坡与破碎岩体组合则可能出现倾倒或崩塌。环境因素与地震荷载的耦合进一步加剧失稳风险, 地下水软化软弱结构面, 降低其抗剪强度, 与地震动叠加后, 滑动面易快速贯通; 风化作用使岩体表层强度衰减, 地震动下表层岩体先发生破坏, 进而引发整体失稳。多因素耦合使边坡失稳呈现非线性、突发性特征, 需综合考虑各因素交互作用, 才能精准揭示失稳机制。

4 工程应用与防控建议

4.1 边坡抗震稳定性评估方法优化

边坡抗震稳定性评估是工程抗震设计与防控的前提, 优化评估方法需结合传统理论与现代技术, 提升评估精度与适用性。传统评估方法基于极限平衡理论, 如毕肖普法、简布法, 虽计算简便, 但忽略岩体非连续性与地震动非线性响应, 评估结果存在偏差。优化方向需融入数值模拟技术, 将有限元、离散元法与极限平衡法结合, 既能模拟地震全过程边坡动力响应, 又能精准计

算稳定性系数,同时考虑岩体节理、裂隙的动态演化。引入动态监测数据校准评估模型,通过地震动传感器、位移监测仪实时获取边坡响应数据,修正岩体力学参数与地震荷载参数,提升评估时效性。针对复杂边坡工况,优化多因素耦合评估体系,综合考虑岩体损伤、地下水、风化等因素的交互作用,建立非线性评估模型。结合机器学习算法,基于大量工程案例与模拟数据,构建智能化评估模型,实现边坡抗震稳定性的快速预判与风险分级,为工程决策提供科学依据。

4.2 针对性抗震防控措施

4.2.1 设计优化

设计优化是岩质边坡抗震防控的源头措施,核心在于通过调整边坡设计参数,降低地震作用下的失稳风险,提升边坡固有抗振能力。边坡几何参数优化是关键,结合工程地质条件,合理减小坡角、降低坡高,或采用分级放坡形式,设置平台缓冲地震能量传递,减少坡体应力集中与振动叠加。针对层状、节理发育岩体,优化边坡走向与结构面产状的夹角,避免边坡走向与软弱结构面平行,降低顺层滑动风险。抗震设计参数优化需结合区域地震烈度区划,合理确定设计地震动参数,确保边坡设计能抵御对应等级地震荷载,同时考虑地震波共振效应,通过调整边坡形态、加固方式改变自振频率,避开地震波主导频率。优化排水系统设计,设置截水沟、排水沟及渗沟,降低地下水水位,减少地下水对岩体的软化作用,从源头提升边坡抗震稳定性,为后续工程加固奠定基础。

4.2.2 工程加固

工程加固是提升岩质边坡抗震能力的核心手段,需根据边坡地质条件、失稳模式及工程需求,选择针对性加固技术,实现按需加固。针对顺层滑动、切层滑动型边坡,采用抗滑桩加固技术,抗滑桩深入稳定岩体,通过桩体与岩体的协同作用,阻挡坡体滑动,分散地震动产生的剪切力,提升滑动面抗滑能力,必要时可采用桩板墙、桩锚组合形式强化加固效果。对于节理密集、岩体破碎边坡,采用注浆加固技术,注入水泥浆、化学浆液等材料,填充岩体裂隙,胶结破碎岩体,提升岩体完整性与力学强度,减少地震波散射与能量耗散,降低振动响应。锚杆、锚索加固适用于边坡表层岩体不稳定或潜在倾倒失稳工况,通过锚杆、锚索将表层岩体与深部

稳定岩体连接,限制岩体位移与转动,增强表层岩体整体性,抵御地震振动冲击。

4.2.3 监测与预警

监测与预警是岩质边坡抗震防控的末端保障,通过实时捕捉边坡地震响应与损伤演化信号,实现灾害的提前预警与应急处置^[4]。建立多维度监测体系,涵盖地震动监测、位移监测、应力监测及环境监测,地震动传感器实时采集地震波参数,位移监测仪(GPS、全站仪)跟踪边坡整体与局部位移变化,应力传感器监测岩体及加固结构的受力状态,环境监测重点关注地下水位、降雨等因素。采用智能化监测技术,结合物联网、大数据分析,实现监测数据的实时传输、自动分析与异常识别,当监测参数超过预警阈值时,系统自动发出预警信号,为应急处置争取时间。建立分级预警机制,根据参数异常程度划分蓝色、黄色、橙色、红色预警等级,对应制定不同应急措施,如红色预警时及时组织人员撤离、暂停工程作业。定期对监测设备进行校准维护,结合边坡加固效果与地质条件变化,优化监测方案与预警阈值,提升预警准确性与可靠性。

结束语

地震作用下岩质边坡动力响应及失稳机制研究对保障工程安全意义深远。本文全面分析了动力响应基本理论、规律及失稳机制,提出评估方法优化与防控建议。然而,岩质边坡抗震研究仍面临诸多挑战,未来需进一步结合多学科知识,利用先进技术,深入研究复杂条件下边坡动力响应与失稳特性,完善评估与防控体系,降低地震灾害风险。

参考文献

- [1] 邹启俊,吴瑞安,郭长宝,等.地震作用下含软弱夹层反倾岩质边坡动力响应振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(9):2470-2485.
- [2] 高幸,贾金青,张丽华,等.地震作用下岩质边坡预应力锚索动力响应解析解[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(5):134-144.
- [3] 李师毓,吴琼,王亮清,等.地震作用下软硬互层顺层岩质边坡动力响应研究[J].地球科学,2023,48(8):3127-3136.
- [4] 杨卿,陈志亮,李国锋,等.地震作用下岩质高边坡行波激励与一致激励动力响应分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(9):164-177.