

# 不同地震加速度影响下 边坡安全性数值模拟

张舶航, 史冠宇, 张 蕾

(江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225001)

**摘要:** 为了掌握不同峰值地震加速度作用下黄土边坡的稳定性响应机理, 以某典型斜坡为对象, 采用 geo-studio 软件研究了该边坡在不同峰值加速度波形作用下的稳定性, 得出以下结论: 边坡稳定性受地震影响显著, 当地震加速度从 0.05 g 增长至 0.4 g, 滑移面处的变形从 1.52 m 上升至 12.19 m, 安全系数从 1.082 下降至 0.964; 动荷载的增加使得边坡内部剪应力增大, 裂缝不断扩张, 同时受地下水位的影响, 孔隙水压力不断增长, 最终边坡稳定性逐渐下降, 滑移风险不断提高。

**关键词:** 峰值地震加速度; 边坡稳定性; 变形稳定; 数值模拟

中图分类号: TV222

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)08-0012-0005

## Numerical simulation of slope safety under different seismic accelerations

ZHANG Bohang, SHI Guanyu, ZHANG Lei

(Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225001, China)

**Abstract:** In order to understand the stability response mechanism of loess slopes under different peak seismic accelerations, this paper takes a typical slope as the object and uses geo-studio software to study the stability of the slope under different peak acceleration waveforms. The following conclusions are drawn: slope stability is significantly affected by earthquakes. When the seismic acceleration increases from 0.05 g to 0.4 g, the deformation at the sliding surface increases from 1.52 meters to 12.19 meters, and the safety factor decreases from 1.082 to 0.964; The increase in dynamic load leads to an increase in shear stress inside the slope, continuous expansion of cracks, and an increase in pore water pressure due to the influence of groundwater level. Ultimately, the stability of the slope gradually decreases and the risk of sliding increases.

**Key words:** peak seismic acceleration; slope stability; stable deformation; numerical simulation

地震是自然界中最具破坏性的灾害之一, 能够在短时间内对边坡稳定性造成严重影响, 引发滑坡、泥石流等次生灾害, 这些次生灾害往往造成严重的人员伤亡和财产损失。通过研究地震对边坡稳定性的影响, 可以更好地预测和评估这些灾害的发生风险, 从而采取预防措施, 减轻灾害损失。

祁生文等<sup>[1]</sup>基于某边坡工程, 基于地震条件下的影响将边坡进行分类, 探究了地震作用下边坡潜在破坏机制及失稳机理; 李巍<sup>[2]</sup>基于强度折减法, 考虑断裂破碎带及岩体自重应力影响, 通过数值软件

建立三维边坡模型, 开展地震作用下边坡的非线性时程分析, 获得了边坡的整体位移及塑性区规律, 并以塑性区和位移突变为依据, 判别地震作用下边坡的整体稳定性; 黄星<sup>[3]</sup>依托某典型边坡工程, 在强度折减理论的基础上, 通过有限元软件建立边坡模型, 模拟了不同工况地震作用下边坡振动响应, 获得了竖向和横向地震条件下边坡动力响应及稳定性, 结合抗震规范, 量化地震作用对边坡的影响; 杨楠等<sup>[4]</sup>结合极限平衡法及拟动力法, 求解了地震作用下边坡的剩余推力, 基于编程软件, 分析了边坡

收稿日期: 2024-05-22

作者简介: 张舶航(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事地质勘察等工作。E-mail: bugaiqi877@163.com

尺寸、土体参数、地震特性等因素对边坡稳定性的影响规律。宋健等<sup>[5]</sup>基于极限平衡分析法,创新性的提出了一种地震作用下土质边坡位移求解法,通过有限元软件模拟地震作用下边坡位移响应,并与解析法的位移结果对比,验证了解析法的正确性。

本文以某典型斜坡为工程背景,采用geo-studio软件研究了该斜坡在不同地震峰值加速度影响下的稳定性,并探讨了其失稳计变形机理,以期为当地滑坡灾害的防控及治理提供依据。

## 1 工程背景

根据工程地质勘察,斜坡剖面及尺寸如图1所示,上游最高140 m,下游最低陡坎处高度为50 m,陡坎处存在一区域常年性溪流,水位高约20 m。

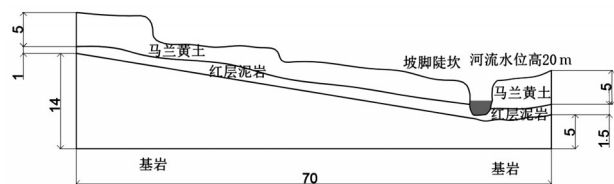


图1 边坡剖面示意(单位:m)

根据工程地质钻孔揭露,该斜坡自上而下共分为3种岩层:上层为马兰黄土层,浅灰黄色,疏松、颗粒较均匀,以粉砂为主,呈块状,大孔隙显著,垂直节理发育,偶夹黑垆土型古土壤,层中钙质结核小而少,常零散分布;中部为全~强风化红层泥岩,浅肉红色,以红色砂岩、砂砾岩为主,节理裂隙发育,大部分裂隙被泥质胶结,少部分是石膏、钙质和硅质胶结;下部为中风化泥岩,浅灰色,断口平坦状,见植物化石碎片,节理裂隙发育,岩石完整性较差。

## 2 稳定性分析方法、模型和参数

### 2.1 分析方法及模型

采用geo-studio软件,建立地震作用下的边坡稳定性计算模型,首先建立初始静态下的quake分析模型,以该项作为父项,建立等效应力状态下的quake分析模型,进行地震响应分析,然后进行slope分析,得到地震荷载作用下的堆体稳定安全系数。建立的有限元数值模型如图2所示,为了得到滑移面处的位移变化趋势,计算过程中在边坡下游陡坎处标记了4处特征点。

### 2.2 参数取值

各岩土体的基本土力学参数通过钻孔取样后的室内试验测试获得,如表1所示。

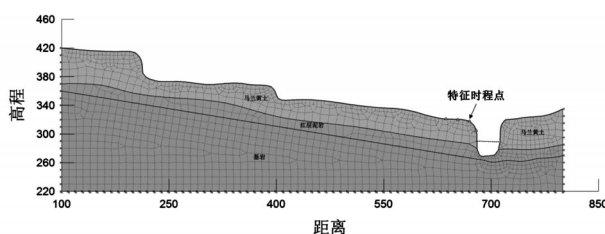


图2 有限元模型(单位:m)

表1 岩土体基本物理力学参数

土体类型	天然含水率/%	天然密度/(g/cm <sup>3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	饱和渗透系数/(m/s)
马兰黄土	9.8	1.6	35	25	2.5×10 <sup>-6</sup>
红层泥岩	23.0	2.0	140	22	6.0×10 <sup>-6</sup>
基岩	40.0	3.0	10 000	35	6.0×10 <sup>-6</sup>

由于边坡下游河流的存在,考虑到马兰黄土的非饱和特性,需要定义土体的土水特征曲线和渗透系数函数,其中土水特征曲线由实验测得,渗透系数曲线根据软件内置样本函数由土水特征曲线估算得到,如图3所示。

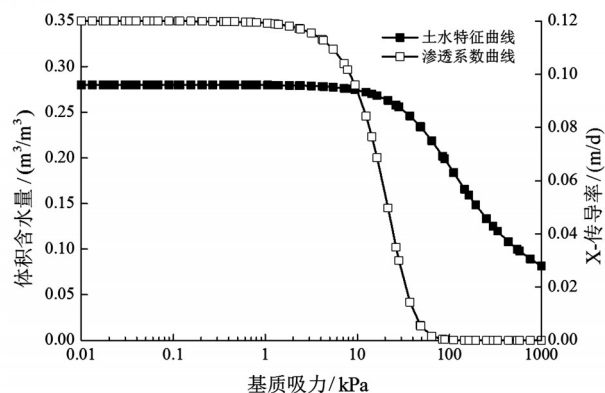


图3 马兰黄土土水特征曲线及渗透系数曲线

### 2.3 数据处理

考虑到最小安全系数出现在某一瞬间时刻,在紧接着的下一时刻,由于地震加速度方向的改变,安全系数得到恢复。刘汉龙等<sup>[5]</sup>提出了用最小平均安全系数作为评价指标,如式(1)所示及图2所示。

$$\bar{F}_{s\min} = F_{s0} - 0.65(F_{s0} - F_{s\min}) \quad (1)$$

式中:  $F_{s\min}$  为最小安全系数;  $F_{s0}$  为初始安全系数;  $\bar{F}_{s\min}$  为最小平均安全系数。

依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[1]</sup>,本边坡为一级边坡,动力条件下稳定安全系数临界值取1.15。

### 2.4 工况设计

设计计算工况如表2所示。地震波选用EL-

表2 地震与降雨联合作用工况设计方案

工况编号	EL-Centro波峰值加速度/g	地震历时/s
1	0.05	30
2	0.10	
3	0.20	
4	0.40	

Centro,峰值加速度分别设置为0.05、0.1、0.2、0.4 g,加速度时程曲线如图4所示。

### 3 结果分析

#### 3.1 特征标记点峰值加速度分析

在初始静态下以及等效应力状态下的quake地震响应分析中,以峰值加速度0.2 g为例,选取了4个特征时程点对地震加速度进行标记监测,EL-Centro波中4个历史点的加速度时程曲线如图5所示,可以看到,虽然峰值加速度为0.2 g,且对整个边坡施

加了动荷载边界,但并非每个有限元节点的地震加速度都能达到峰值,从4个点的平均加速度曲线(图6)也可以看出,平均加速度的峰值小于0.2 g。这主要是因为边坡所处的地质结构可能在不同位置有不同的组成,如土层厚度、岩石类型、裂隙发育程度等的差异,地震波在三维空间内传播,其路径和波形受到边坡体内部结构复杂性的影响,这些差异会影响地震波的传播速度和衰减程度,导致到达边坡表面不同位置的波形发生变化,因此峰值加速度也不同;同时,自然状态下的边坡并非均质,而是由马兰黄土、红层泥岩和中风化基岩构成的,这些材料的力学性质(密度、弹性模量、泊松比)在空间上存在较大差异,导致地震波在传播过程中受到不同程度的衰减和速度变化,从而影响波形;此外,边坡表面的马兰黄土层因为松散和饱和度等因素,在地震作用下表现出不同的动态响应,如放大或衰减地震波的振幅,改变波的频率成分,进而导致不同位置接收到的波形存在一定的差异。

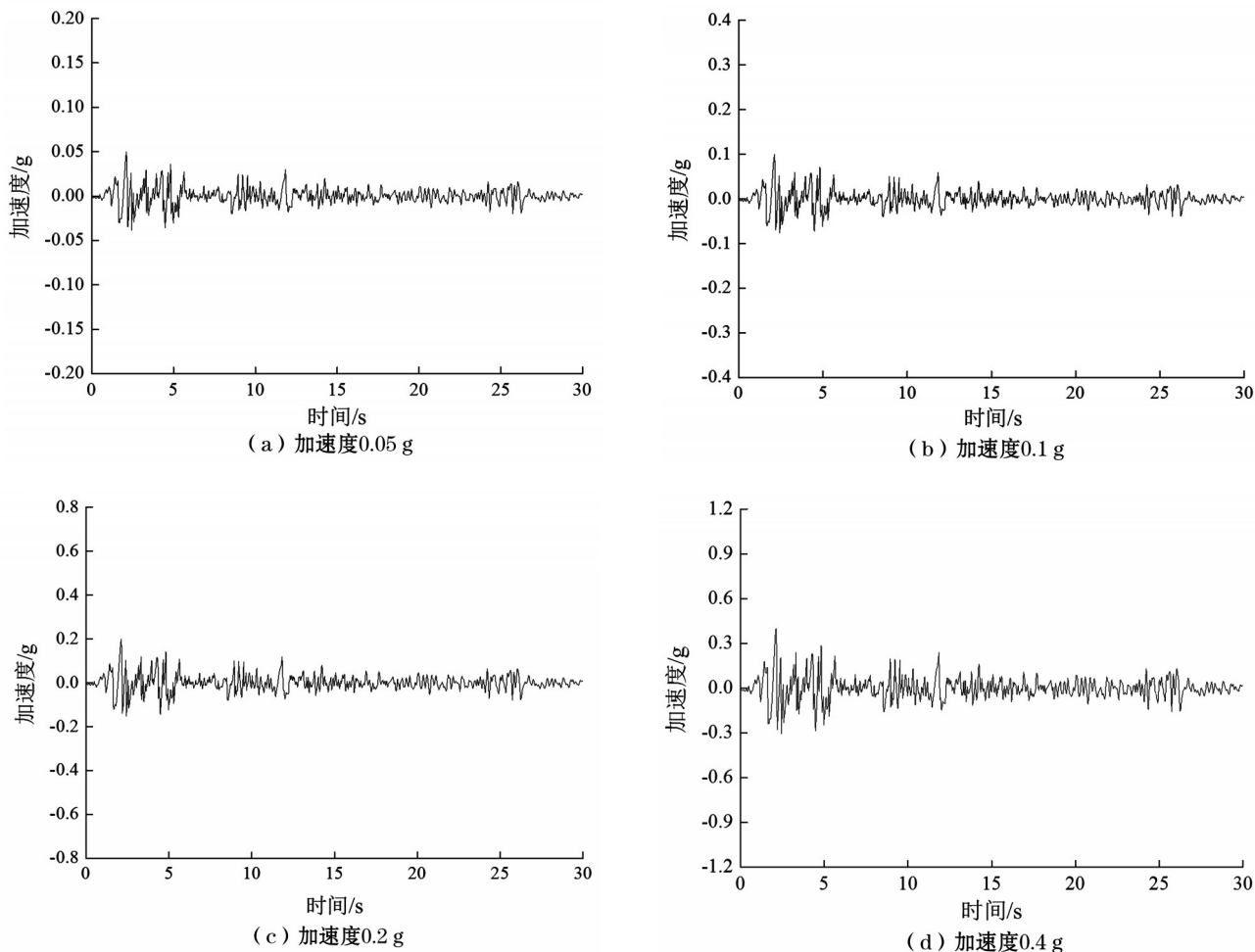


图4 EL-Centro地震加速度曲线



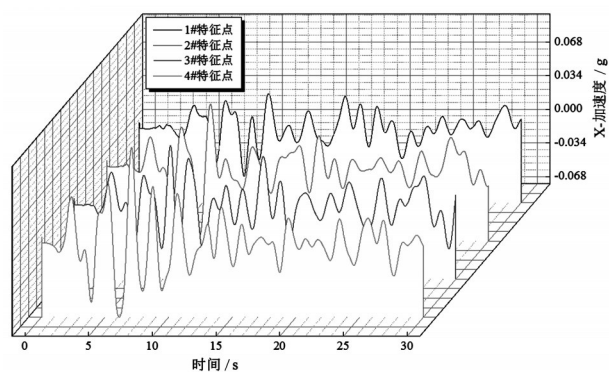


图5 EL-Centro波(0.2 g)4个时程点加速度

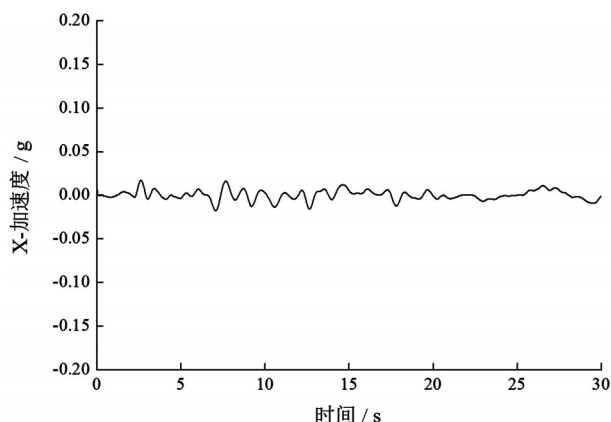


图6 EL-Centro波(0.2 g)4个时程点偏平均加速度

### 3.2 特征标记点位移分析

图7为不同地震峰值加速度下滑移面上特征点的位移变化曲线,可以看到,不同峰值加速度下,特征点处的位移变化均呈现出先缓慢增长后快速上升的趋势,主要原因为边坡的响应在地震作用下往往是非线性的,尤其当地震强度较高时,在初期,位移的增长可能主要是线性或弹性响应,但随着应力的累积和土体结构的破坏,边坡的变形将进入非线性阶段,位移增长速率显著加快。地震结束后,峰值加速度0.05、0.1、0.2、0.4 g工况下的最终位移分别为1.52、3.05、6.09、12.19 m,且4种工况下的位移曲线增长趋势均未减缓。地震波峰值加速度越大,滑移面处的位移越大,这主要是因为地震加速度的增加会导致边坡内部土体或岩石所承受的剪切应力增加,当这种剪切应力超过土体或岩石的剪切强度时,边坡就会发生滑移,更高的加速度意味着更大的剪切应力,因此,边坡发生位移的可能性以及位移的幅度都会增加;同时,由于河流的存在,边坡内部具有一定程度的地下水位,而对于含水边坡,地震加速度的增加会使土体中的孔隙水压力迅速上升,减少土体的有效应力,从而减小土体的剪切强度,这一过程会使边坡更容易在地震作用下发生

滑动,尤其是在瞬时或持续震动作用下,边坡位移可能显著增大;此外,强烈的地震加速度可以直接破坏边坡的岩石结构或土体结构,尤其是对于红层泥岩这种裂缝或软弱面发育的边坡,这种结构的破坏会直接导致边坡的位移增大。

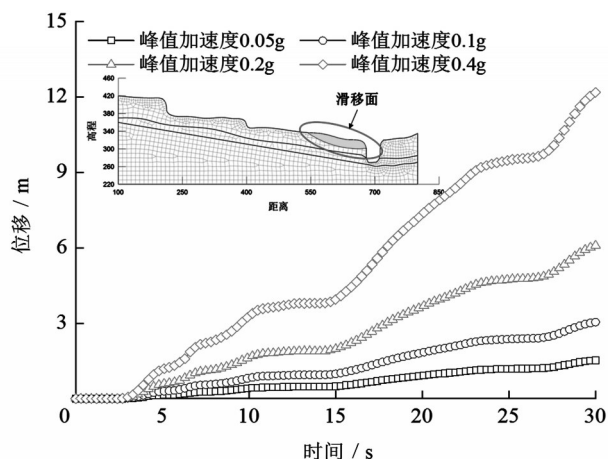


图7 不同峰值加速度下特征点位移曲线

### 3.3 边坡稳定性分析

考虑地震波为EL-Centro波时的边坡稳定安全系数随地震历时的变化趋势如图8所示,从图8中可以看到,当地震波的峰值加速度为0.05、0.1、0.2、0.4 g时,整个地震过程中的安全系数最小值分别为1.071、1.040、0.984、0.888,采用式(1)计算得到最小平均安全系数分别为1.082、1.062、1.026、0.964。随着地震峰值加速度的增长,边坡安全系数逐渐降低,当峰值加速度由0.05 g增加到0.4 g时,边坡安全系数降低约10.9%,依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[6]</sup>,4种地震波下的边坡体最终均处于不稳定状态。地震发生时,地面会产生剧烈的震动,这种动态震动可以通过边坡的土体或岩石传递,震动会造成边坡材料的强度降低,尤其是在持续的震动作用下,土体的剪切强度会逐渐减小,从而导致边坡稳定性降低。对于表层黄土下的红层泥岩,因其本身节理裂隙发育,岩石完整性较差,地震动荷载的作用可能会导致原有的裂缝、节理等结构面活化,尤其是当这些结构面倾向于边坡外侧时,它们可能成为滑动面,大大降低边坡的稳定性。同时,由于下游陡坎处河流水位的存在,地震震动可导致土体内部孔隙水压力的迅速增加。当孔隙水压力增加到一定程度时,土体的有效应力减小,剪切强度下降,进而引发边坡滑动或崩塌。此外,在地震动荷载的作用下,可以引起边坡内部松散土体的密实,而对于已经相对密实的土体,震动可

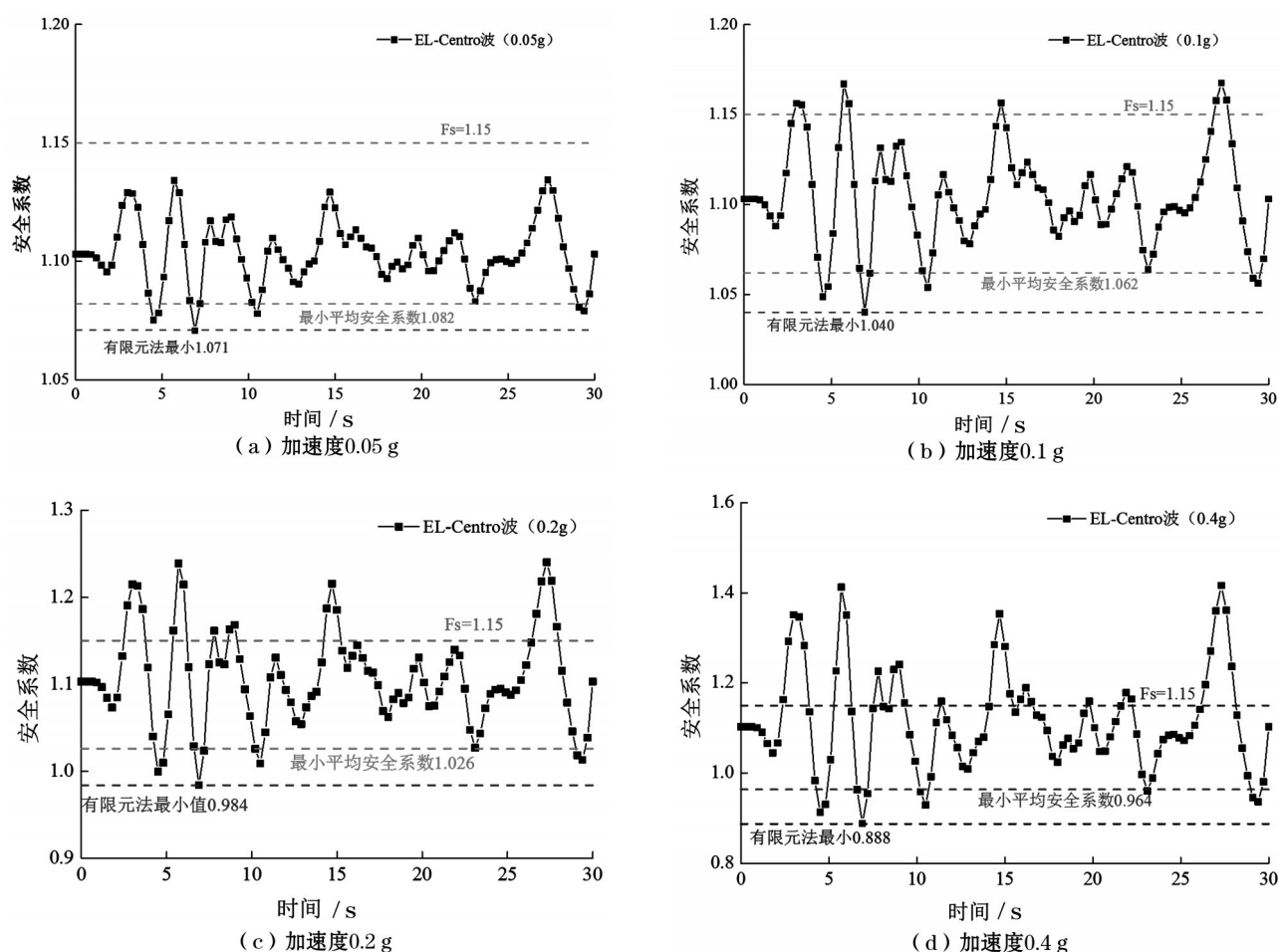


图8 不同地震加速度下坡体安全系数变化趋势

能导致其结构松散,降低其稳定性,这种现象在具有湿陷特性的黄土中尤为明显,此时的土体将失去承载力,导致上覆结构物和边坡发生大规模滑移。

## 4 结 论

本研究以某典型斜坡为研究对象,对不同地震峰值加速度作用下的边坡稳定性进行了分析,得出以下结论:

(1)自然边坡的非均质性导致边坡表面不同位置接收到的地震波波形存在一定差异,边坡坡型结构、组成边坡的岩土体性质、所处地质条件是影响地震波传播的主要因素。

(2)峰值加速度从0.05 g增加到0.4 g时,边坡位移从1.52 m上升至12.19 m,安全系数从1.082下降至0.964,地震加速度增加导致剪切应力、孔隙水压力上升,同时破坏边坡结构,使得边坡稳定性下降、位移增大,从而增加了边坡滑动和崩塌的风险。

(3)文中相关数据来自高精度野外勘查作业,可为类似地质条件下的边坡稳定性分析提供参考,

同时也可为地质灾害的风险性评估提供相关依据。

### 参考文献:

- [1] 祁生文,伍法权,刘春玲,等.地震边坡稳定性的工程地质分析[J].岩石力学与工程学报,2004(16):2792-2797.
- [2] 李巍.基于有限元法的岩质边坡地震稳定性数值分析[J].土工基础,2021,35(1):30-33.
- [3] 黄星.水平和竖向地震作用对边坡稳定性影响的有限元研究[J].土工基础,2020,34(1):69-72.
- [4] 杨楠,邓亚虹,慕焕东,等.一种基于拟动力法和剩余推力法的地震边坡稳定性分析新方法[J].工程地质学报,2023,31(2):607-616.
- [5] 宋健,陆朱汐,谢华威,等.基于极限平衡原理的地震边坡浅层和深层耦合滑移分析[J].岩土工程学报,2023,45(6):1141-1150.
- [6] 刘汉龙,费康,高玉峰.边坡地震稳定性时程分析方法[J].岩土力学,2003(4):553-556,560.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.