

文章编号:1673-9469(2025)06-0090-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.011

## 微震诱发边坡失稳的实验模型构建与稳定性评估

陈刚<sup>1,2</sup>,曹海清<sup>2</sup>,吴廷尧<sup>2</sup>

(1.湖北省地质环境总站,湖北武汉430030;2.重庆大学土木工程学院,重庆400045)

**摘要:**为揭示利咸高速公路两侧高边坡在地震作用下的位移响应机制及稳定性演化规律,采用模型试验与理论分析相结合的方法开展研究。聚焦于量化地震条件下高边坡位移特性,建立物理模型试验平台,模拟不同地震波参数(频率10~100 Hz、振幅0.05g~0.60g)下的边坡动力响应;结合有限元数值模拟进行理论验证,基于Mohr-Coulomb准则计算稳定性系数。严格遵循工程地质调查-模型构建-加载试验-数据采集-理论分析的技术路线,重点监测边坡顶部、断层带及中部区域位移。结果表明:边坡顶部因缺乏侧向约束,在地震波作用下水平位移呈现线性增长特征,振动次数超过2000次后出现疲劳破坏迹象;断层带上缘对地震能量释放最为敏感,位移累积速率与振动次数呈指数相关。地震波频率对位移响应影响显著,低频段( $\leq 40$  Hz)的位移幅值较大但增速平缓,高频段( $> 40$  Hz)易引发共振效应,导致位移突增15%~30%。稳定性系数分析显示,地震波振幅与所需振动次数呈对数函数关系。

**关键词:**边坡;微地震;模型试验;边坡稳定性

中图分类号: TU45

文献标识码: A

## Experimental Model Construction and Stability Evaluation of Slope Instability Induced by Microearthquakes

CHEN Gang<sup>1,2</sup>, CAO Haiqing<sup>2</sup>, WU Tingyao<sup>2</sup>

(1. Hubei Provincial Geological Environment Station, Wuhan, Hubei 430030, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** To reveal the displacement response mechanism and stability evolution law of the high slopes on both sides of the Lixian Expressway under seismic action, a systematic investigation was conducted by combining model experiments with theoretical analysis. The focus was on quantifying the displacement characteristics of the high slopes under seismic conditions, and a physical model test platform was established to simulate the dynamic responses of the slopes under different seismic wave parameters (frequency ranging from 10 to 100 Hz, amplitude ranging from 0.05g to 0.60g). The finite element numerical simulation was combined for theoretical verification, and the stability coefficient was calculated using the Mohr-Coulomb criterion. The research process strictly followed the technical route of engineering geological investigation-model construction-loading test-data collection-theoretical analysis, with a particular emphasis on monitoring the displacement time history curves at the top, fault zone, and middle areas of the slopes. The research results show that the top of the slope, lacking lateral constraints, exhibits linear growth characteristics in horizontal displacement under the excitation of seismic waves, and signs of fatigue failure appear after more than 2000 vibration cycles; the upper edge of the fault zone is the most sensitive to the release of seismic energy, and the displacement accumulation rate is exponentially related to the vibration cycle. The frequency of the seismic waves has a significant impact on the displacement response. The amplitude of the low-frequency band ( $\leq 40$  Hz) has a larger dis-

收稿日期:2024-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807265,52308393);江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室、江汉大学爆破工湖北省重点实验室联合开放基金资助项目(PBSKL2023B2)

第一作者:陈刚(1982—),男,湖北公安人,博士研究生,高级工程师,从事水工环地质及地质灾害风险评价方面的研究。

placement amplitude but a slower growth rate, while the high-frequency band ( $>40$  Hz) is prone to resonance effects, causing a 15% to 30% increase in displacement. The stability coefficient analysis shows that the relationship between the seismic wave amplitude and the required vibration cycle is a logarithmic function.

**Key words:** slope; microearthquake; model test; slope stability

除大规模地震事件外,微地震荷载对边坡稳定性的影响亦不容忽视。微地震荷载特指地震波中幅值较小的振动活动,其频率与振幅普遍低于工程设计中采用的标准地震荷载。尽管微地震荷载在单次事件中表现出的强度较为有限,但持续累积效应却足以诱发边坡的动力响应,甚至引发潜在失稳<sup>[1-2]</sup>。因此,开展微地震作用下边坡稳定性分析至关重要。通过边坡稳定性分析,可精确评估边坡结构在微地震荷载作用下的稳定状态,并为边坡结构加固策略提供科学依据。

目前,国内外学术界已广泛采用实验室试验、现场监测及数值模拟等方法,深入探究了边坡在微地震荷载影响下的动力响应特征、失稳机制。Deb 等<sup>[3]</sup>结合现场监测与有限元数值模拟,综合评估了露天矿边坡在振动荷载作用下的稳定性。许红涛等<sup>[4-5]</sup>采用离散元方法,研究了微地震荷载作用下边坡的细观及微观动力响应特性。Gu 等<sup>[6-7]</sup>通过模拟在不同地质构造、水文条件及外部作用力下边坡的响应行为,揭示了边坡由稳定状态向失稳状态转变的内在动力机制与外部影响因素。Jiang 等<sup>[8-9]</sup>研究了边坡稳定性与断层带抗剪强度之间的变化规律。任月龙等<sup>[10]</sup>通过理论分析与数值模拟,系统探讨了边坡稳定性的变化过程。

现有研究多集中于微地震荷载的短期或单次作用对边坡稳定性的影响,对于微地震荷载的长期累积效应及其对边坡稳定性的长期影响,尚缺乏全面系统的研究<sup>[11-13]</sup>。在长期微地震荷载作用下,边坡的变形模式、损伤累积过程及最终失稳机制仍需深入探索<sup>[14-15]</sup>。本文结合工程实际,依托自主研发的试验系统平台,基于室内模型试验和极限平衡分析法中的 Sarma 法,研究了在不同地震波振幅、不同加载次数振动荷载作用下边坡的稳定性及损伤演化规律。研究成果对微地震荷载作用下边坡稳定性评估具有重要意义。

## 1 工程概况

利咸高速公路 LXLX-4 标段位于湖北省利川市和咸丰县境内,起于沙溪乡群力村,止于唐崖镇沙堡溪村,全长约 16 km。根据工程勘察资料,该

区域地震波振幅为  $0.05g \sim 0.60g$ 。本研究建立的室内模型对应的实际边坡如图 1 所示,边坡高为 600 m,宽为 750 m。边坡所在区域的地质构造复杂,包含多种岩层与断层。边坡的地质坡面图如图 2 所示,边坡内有一断层穿过,其产状为  $N70^\circ$ ,倾向  $235^\circ$ 、倾角  $65^\circ$ 。边坡主要由强风化粉砂岩、中风化粉砂岩、碎石和断层组成,岩土力学性质(如强度、变形模量等)差异显著,能够反映同类边坡的普遍特征,因此,该边坡在地质构造、岩土特性上具有代表性。本研究基于实际边坡的地质和岩土特性构建室内模型,开展边坡稳定性研究。



图 1 利咸高速边坡

Fig. 1 Lixian Expressway slope

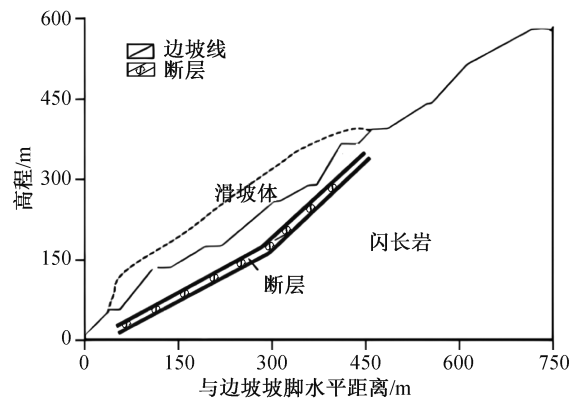


图 2 地质坡面图

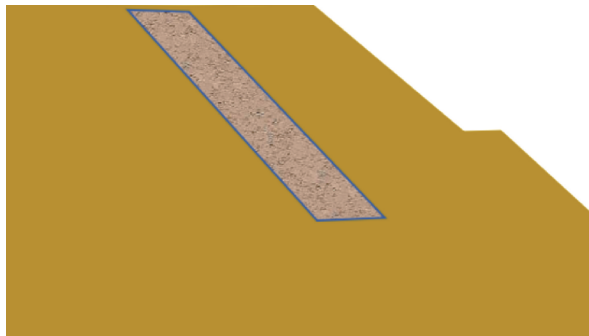
Fig. 2 Geological slope map

## 2 室内模型试验系统研究

### 2.1 模型加载方案

在评估边坡稳定性的过程中,水平向振动被视为关键影响因素。为准确模拟实际边坡在水平振动作用下的受力情况,本试验采用正弦波形沿水平  $X$  方向进行加载。构建边坡模型时,综合考虑了断层

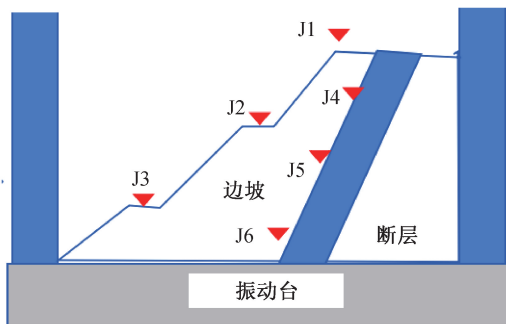
带厚度与倾角因素。模型在模型箱内按自下而上、逐层压实的原则构建而成,最终构建了如图3所示的边坡模型。在边坡坡顶、边坡中部、坡脚、断层上部、断层中部和断层下部布设6个水平位移监测器(J1—J6),用于分析边坡变形规律。在地质与岩土工程领域,确实存在数千次地震(尤其是微小地震)的情况,这些地震通常具有烈度小、震源浅、频率高等特点。根据研究区域历史地震数据和地质条件设置振动台加载参数,具体见表1。



(a) 模型试验框架



(b) 振动台系统



(c) 边坡模型

图3 模型试验系统

Fig. 3 Model test system

表1 振动台加载参数选取表

Tab. 1 Loading parameters for vibration table

地震振动次数/千次	地震波振幅	地震波频率/Hz
2	0.05g	10
4	0.10g	20
6	0.30g	30
8	0.40g	40
10	0.50g	50
12	0.60g	100

## 2.2 模型边坡的设计与制作

在振动台试验中,本文主要分析顺层含断层边坡在地震波作用下的变化情况。基于材料的配重及地质属性,本文选择重晶石粉、石英砂和水泥等作为模型相似材料。其中,重晶石粉和石英砂作为主要骨料,水泥作为胶结剂。在试验条件允许的情况下,应尽量提高模型的比例。结合实际工程案例,通过对原岩开展多项室内试验,确定了相似材料和原型材料的力学参数。其中,长度、时间、加速度的相似系数分别为100、10、1,其他相似系数及物理力学参数具体见表2。

表2 原型砂岩及模型边坡的物理力学参数取值范围

Tab. 2 Range of physical and mechanical parameters of prototype sandstone and model slope

类型	相似系数	围岩		断层带	
		原型	相似材料	原型	相似材料
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.50	3.50	2.33	2.20	1.47
弹性模量/GPa	150.00	30.50	0.20	2.12	0.01
泊松比	1.00	0.20	0.20	0.18	0.18
黏聚力/kPa	0.15	640.00	4.27	210.00	1.40
内摩擦角/( $^{\circ}$ )	1.00	34.00	34.00	22.34	22.34
抗压强度/MPa	150.00	152.18	1.01	23.10	0.15

制作边坡模型时,根据边坡模型各层预设的几何形态与密度参数,计算各层所需的混合材料用量。利用小型搅拌机将材料搅拌均匀,在搅拌过程中分批加入含甘油与石膏缓凝剂的水溶液,辅以人工操作确保混合均匀。采用特制的小型夯实工具,对混合后的材料进行分层夯实,每层压实厚度控制在5~10 cm,以满足设计的密实度要求。在材料初凝前,使用2 mm厚的薄钢板垂直切割出正交次级节理,以模拟自然地质构造中的节理系统。为增强层间界面的仿真度与稳定性,每层压实后,均匀铺设一层2~3 mm厚的石英砂。重复上述步骤,直至边坡模型达到预定的设计高度。

## 2.3 边坡水平位移随地震振动次数的变化规律

根据试验数据,统计得到边坡各监测点水平位移随地震振动次数的变化规律,如图4所示。由图4可以看出,随着振动次数的增加,边坡顶部的J1监测点的水平位移从0 mm逐渐增加至48 mm,近似呈线性增长。这是由于边坡顶部相对自由,没有侧向支撑,水平位移迅速增加。振动次数继续增加,边坡顶部逐渐进入位移相对稳定的状态,但每次振动仍会引起一定的位移增量。J4监测点

变化趋势和 J1 基本一致,最终位移为 44 mm。如果振动次数持续增加,边坡顶部可能会因为疲劳效应而发生破坏,水平位移急剧增大。

断层活动对地震波释放的能量非常敏感,因此断层带上缘会经历较大的水平位移突变。随着振动次数的增加,断层带上缘的水平位移持续累积,从而导致位移增速逐渐加快。边坡监测点 J2 的位移从 0 mm 增长到 42 mm,近似呈线性增长;而监测点 J5 的位移在 0~7 mm 时增长缓慢,随后逐渐呈线性增长。分析其原因,边坡中部是断层活动最集中的区域,每次振动都会引发显著的断层滑动,进而导致水平位移显著增长。随着振动次数的增加,断层带动力活动显著增强,其上缘区域水平位移呈现加速累积特征。相比之下,虽然边坡下部同样受断层活动的影响,但由于受到基岩或较稳定地层的支撑作用,其水平位移相对较小。

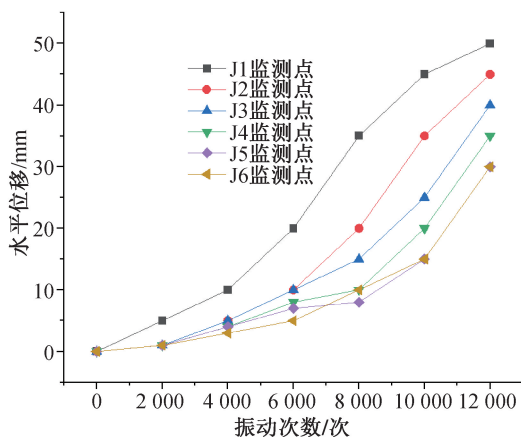


图4 边坡水平位移随地震振动次数的变化规律

Fig. 4 Changes of slope horizontal displacement with the number of seismic vibrations

#### 2.4 边坡水平位移随地震波振幅的变化规律

边坡水平位移随地震波振幅的变化规律如图5所示。由图5可以看出,边坡顶部由于无侧向支撑,在地震波作用下先受到水平方向加速度的影响,产生较大的水平位移。随着地震波振幅增加,边坡顶部监测点 J1 的位移先线性增长至 5 mm,随后增速放缓,逐渐增至 9 mm。边坡中部水平位移随地震波振幅的增加而逐渐增大,但受边坡整体稳定性的限制,其水平位移会受到上部材料的牵引和下部材料的约束,监测点 J5 的最大位移为 4.5 mm,较 J1 减小 4.5 mm,介于坡顶和坡底之间。随着地震波振幅的增加,边坡中部水平位移持续

增长,但增速有所减缓。坡底的水平位移相对较小,最大位移仅为 4 mm,随着地震波振幅的增加,增幅较小。

边坡中部作为断层活动核心区,地震波触发断层两侧岩体发生相对滑移,引发显著的水平位移响应,实测最大位移为 4.2 mm。地震波振幅增强时,断层带动力效应加剧,位移呈非线性增长趋势。相较于边坡中部,下部区域因基岩或稳定地层的约束作用,位移量较小(平均位移小于 2.5 mm),但在强震作用下,下部岩体可能出现应力重分布,导致位移突增。对比位移监测数据发现,中部区域位移是下部的 1.8~2.3 倍,且位移累积速率与地震波振幅呈显著正相关关系。

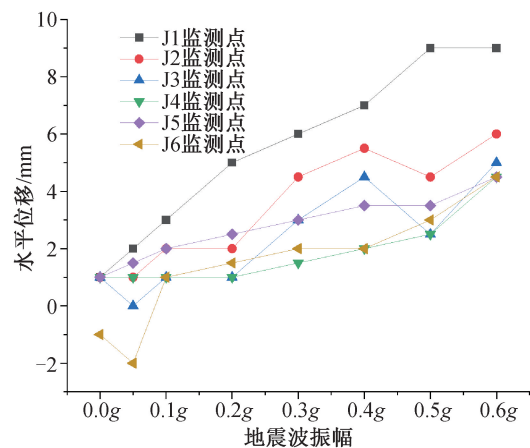


图5 边坡水平位移随地震波振幅的变化规律

Fig. 5 Changes of slope horizontal displacement with seismic vibration intensity

#### 2.5 边坡水平位移随地震波频率的变化规律

边坡水平位移随地震波频率的变化规律如图6所示。由图6可以看出,在低频( $\leq 40$  Hz)振动下,边坡顶部材料有足够的时间响应地震波,因而水平位移相对较大,但增速较慢,边坡最大位移为 2 mm。随着振动频率的增加,边坡顶部材料因惯性出现响应滞后,水平位移的增速减缓并趋于一个稳定值。当振动频率达到 50 Hz 时,各监测点的边坡位移均有所增加,其中边坡上部位移最大,为 8.2 mm,中部和坡底的位移分别为 7.3、6.3 mm。值得注意的是,高频振动可能引发边坡材料的共振效应,从而导致水平位移突然增加。

断层带对振动频率的变化非常敏感。在低频振动下,断层活动相对平缓,水平位移增长较慢,边坡最大位移为 1.5 mm。而在高频振动下,断层活动加剧,导致水平位移显著增长,特别是断层活

动最为集中的边坡中部,其水平位移对振动频率最为敏感,最大位移为 5.1 mm,超过其他监测点的水平位移(均小于 5 mm)。

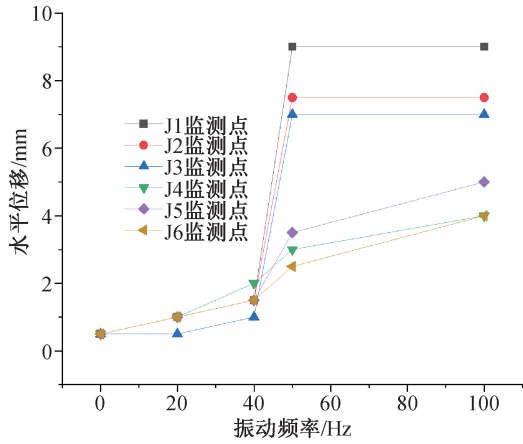


图6 边坡水平位移随地震波频率的变化规律

Fig. 6 Variation of seismic wave frequency of slope horizontal displacement

### 3 地震荷载作用下边坡稳定系数研究

#### 3.1 地震荷载作用下边坡受力分析

稳定系数是边坡稳定性研究的定量指标<sup>[16-18]</sup>,当其值为 1 时,表示边坡处于极限平衡状态;当其值小于 1 时,边坡将发生变形破坏<sup>[19-20]</sup>。为定量评估边坡稳定性,本文以具有弱夹层和前锁紧段的高陡岩质边坡(图 1)为研究对象,进行了侧向溶解裂缝方向的受力分析,并推导其稳定系数。设定沿前开口面滑动方向为 X 方向,溶解裂缝面滑动方向为 Y 方向。对锁定截面处沿 Y 方向的受力进行分析,如图 7 所示。

根据静力平衡原理,即  $\Sigma X = 0, \Sigma Y = 0$ ,可以得到:

$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i - KW_i - FX_i - X_{i+1} \sin \delta_{i+1} + X_i \sin \delta_i - E_{i+1} \cos \delta_{i+1} + E_i \cos \delta_i = 0 \quad (1)$$

$$T_i \sin \alpha_i - N_i \cos \alpha_i - W_i + FY_i - F_i + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i = 0 \quad (2)$$

式中: $T_i, N_i$  分别为作用于第  $i$  块底面的剪力、法向力, N;  $W_i$  为第  $i$  块重量, kg;  $K$  为摩擦相关系数;  $X_i, X_{i+1}$  分别为作用于第  $i, i+1$  块侧面的剪力, N;  $E_i, E_{i+1}$  分别为作用于第  $i, i+1$  块侧面的法向力, N;  $F$  为总外荷载, N;  $F_i$  为作用于第  $i$  块坡顶的外荷载, N;  $\delta_i, \delta_{i+1}$  分别为第  $i, i+1$  块侧面与竖直方向的夹角, ( $^\circ$ );  $\alpha_i$  为第  $i$  块滑面与水平方向夹角, ( $^\circ$ ),  $Y_i$  为作用于第  $i$  块侧面的法向力, N。

根据 Mohr-Coulomb 强度准则,可得式(3)。

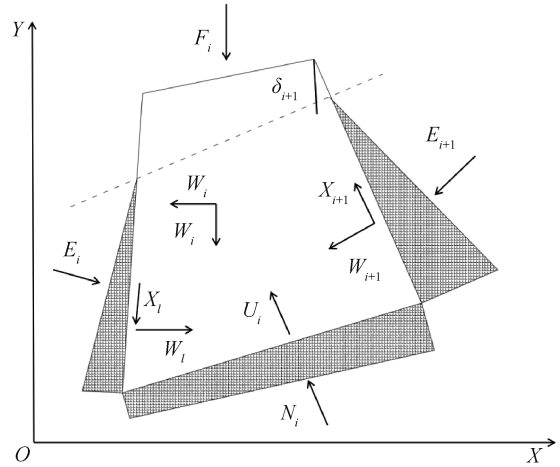


图7 Y方向上的锁紧段剖面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the locking section in the Y direction

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \phi_{Bi} + C_{Bi} b_i \sec \alpha_i \quad (3)$$

式中: $b_i$  为作用于第  $i$  块底面的宽度, m;  $U_i$  为作用于第  $i$  块底面上的水压力, Pa;  $\phi_{Bi}$  为第  $i$  块底面的摩擦强度参数, ( $^\circ$ );  $C_{Bi}$  为第  $i$  块底面的黏聚力参数, kPa。

设  $Q$  为稳定性系数,则

$$C_{Bie} = C_{Bi}/Q \quad (4)$$

$$\varphi_{Bie} = \varphi_{Bi}/Q \quad (5)$$

式中: $C_{Bie}$  为作用于第  $i$  块侧面的临界黏聚力, kPa;  $C_{Bi}$  为作用于第  $i$  块侧面的当前黏聚力, kPa;  $\varphi_{Bie}$  为作用于第  $i$  块侧面的临界摩擦角, ( $^\circ$ );  $\varphi_{Bi}$  为作用于第  $i$  块侧面的当前摩擦角, ( $^\circ$ )。

现对边坡的静稳定性进行了分析,当边坡不受外界环境力影响时,外界环境力  $F_x$  和  $F_y$  的值为 0。周期性的外部环境力作用于边坡,振动波的形式为正弦波,沿 X 方向输入,时程曲线由方程(6)描述。

$$\begin{cases} F_x(t) = \lambda \sin(2\pi ft) \\ F_y(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\lambda$  为作用于动态环境的外力振幅;  $f$  为动载荷的频率, Hz;  $t$  为时间, s。

附加动载荷的参数见表 1,其波形为正弦波。将该载荷的劣化模型引入研究后,水平惯性力通过迭代计算可得到一系列稳定性系数。当水平惯性力为 0 时,对应的稳定性系数即为边坡处于天然状态下的数值。

#### 3.2 不同地震作用下边坡稳定性系数演化规律

在边坡稳定性研究中,振动次数与地震波振

幅对稳定性系数有显著影响。边坡稳定性系数随不同地震波振幅及振动次数的变化特征见图8。

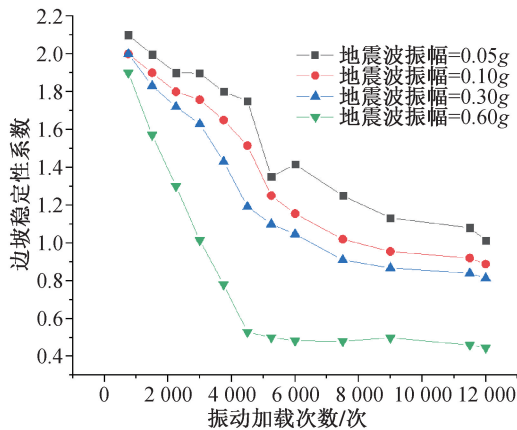


图8 不同地震波振动次数、振幅作用下边坡稳定性系数

Fig. 8 Slope stability coefficient under different seismic vibration frequencies and vibration intensity

由图8可以看出,随着振动次数增加,边坡稳定性系数逐渐降低,初期下降较快,后期逐渐减缓,体现了边坡累积损伤效应。当地震波振幅为0.60g时,经过1500次地震,边坡的稳定性系数从1.9迅速降到1.0;当地震振动次数增加到4500次时,边坡稳定性系数趋于平衡状态,并稳定在0.50左右。地震波振幅增大同样导致边坡稳定性系数下降,高地震波振幅下边坡更易失稳。除地震波振幅为0.60g条件,其他地震波振幅条件下的边坡稳定性系数均随振动次数的增加而逐渐降低,且地震波振幅越大,降幅越大。另外,地震波振幅与临界振动次数之间呈现出典型的对数函数关系,随着地震波振幅的增大,达到相同稳定性系数所需的振动次数显著减少。具体而言,当地震波振幅分别为0.05g、0.10g、0.30g、0.60g时,对应的临界振动次数分别为14582、7892、6111、2877次。

因此,在制定抗震加固措施时,需综合考虑振动次数与地震波振幅的双重影响,对易受损区域进行重点加固。持续监测边坡状态,并及时调整加固策略,是保障边坡长期安全的重要措施。

#### 4 结论

1)随着振动次数的增加,坡顶监测点水平位移近似线性增长;断层带上缘位移先缓慢增长后线性增长。边坡中部位移为下部的1.8~2.3倍,且位移累积速率与振幅显著正相关。

2)在地震波低频( $\leq 40$  Hz)振动下,水平位移相对较大(最大2 mm),但增速缓慢;随着频率增

加,材料因惯性出现响应滞后,位移增速减缓或趋于稳定,而地震波频率达到50 Hz时各监测点位移均上升,坡顶最大位移达8.2 mm,中部、坡底位移分别为7.3、6.3 mm。

3)边坡稳定性系数随振动次数增加呈先快后慢的下降趋势。地震波振幅与临界振动次数呈典型对数函数关系,振幅越大,达到相同临界安全状态所需振动次数越少,振幅0.05g、0.10g、0.30g、0.60g对应的临界振动次数分别为14582、7892、6111、2877次。

#### 参考文献:

- [1] 刘勇. 爆破振动作用下顺层岩体边坡层面强度弱化的实验研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.  
LIU Y. Experimental study on weak bedding rock slope by blasting vibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [2] 陈朝玉,黄文辉,陈国勇. 爆破模拟对柔弱夹层顺层边坡的稳定性诊断[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2010,25(3):55-58.  
CHEN C Y, HUANG W H, CHEN G Y. Blasting simulation of weak interlayer bedding slope stability diagnosis[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 25(3): 55-58.
- [3] DEB D, KAUSHIK K N R, CHOI B H, et al. Stability assessment of a pit slope under blast loading: a case study of Pasir Coal Mine[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011: 419-429.
- [4] 许红涛,卢文波,周创兵,等. 基于时程分析的岩质高边坡开挖爆破动力稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(11):2213-2219.  
XU H T, LU W B, ZHOU C B, et al. Time history analysis method for evaluating dynamic stability of high rock slope under excavation blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2213-2219.
- [5] 李海波,肖克强,刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2385-2394.  
LI H B, XIAO K Q, LIU Y Q. Factor of safety analysis of bedding rock slope under seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2385-2394.
- [6] GU X B, WU Q H. Seismic stability analysis of water-front rock slopes using the modified pseudo-dynamic method[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2018(12): 2385-2394.
- [7] ZHOU C, LU S, JIANG N, et al. Rock mass deformation

- characteristics in high-steep slopes influenced by open-pit to underground mining[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2016(3): 847-866.
- [8] JIANG N, ZHOU C, LU S, et al. Effect of underground mine blast vibrations on overlaying open pit slopes: a case study for Daye Iron Mine in China[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018(3): 1475-1489.
- [9] TIETJE O, FITZE P, SCHNEIDER H R. Slope stability analysis based on autocorrelated shear strength parameters[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2014(6): 1477-1483.
- [10] 任月龙, 才庆祥, 舒继森, 等. 爆破震动及结构面渐进破坏对边坡稳定性影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(3): 435-440.
- REN Y L, CAI Q X, SHU J S, et al. Influence of blasting vibration and structural plane progressive failure on slope stability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(3): 435-440.
- [11] 杨忠平, 刘树林, 刘永权, 等. 反复微震作用下顺层及反倾岩质边坡的动力稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1277-1286.
- YANG Z P, LIU S L, LIU Y Q, et al. Dynamic stability analysis of bedding and toppling rock slopes under repeated micro-seismic action[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7): 1277-1286.
- [12] 邹 灿. 大冶铁矿井下开采巷道围岩稳定性分析及控制技术研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2014.
- ZOU C. Analysis of surrounding rock stability and control technology for underground mining roadway in Daye Iron Mine[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [13] 曾凯波. 大冶铁矿露天采场高陡岩质边坡破坏机理及稳定性研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2010.
- ZENG K B. Study on failure mechanism and stability of high and steep rock slope in Daye Iron Mine open-pit mining area[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2010.
- [14] 罗 勇. 大冶铁矿露天采场岩质边坡稳定性评价体系与分析方法研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2012.
- LUO Y. A study on evaluation system and stability analysis of rock slope in the open pit of Daye Iron Mine [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012.
- [15] 彭志盛. 基于FLAC3D对某边坡天然及地震工况下稳定性分析[J]. *珠江水运*, 2023(17): 59-63.
- PENG Z S. Stability analysis of a slope under natural and seismic conditions based on FLAC3D[J]. *Pearl River Water Transport*, 2023(17): 59-63.
- [16] 周鑫磊, 张卫兵, 顾小军. 基于FLAC3D和BP神经网络的边坡抗剪强度参数反演分析[J]. *公路*, 2023(9): 26-34.
- ZHOU X L, ZHANG W B, GU X J. Back-analysis of slope shear strength parameters based on FLAC3D and BP neural network[J]. *Highway*, 2023(9): 26-34.
- [17] 都喜东, 黄凯波, 李克钢, 等. 基于FLAC3D数值模拟技术的岩石力学课程教学改革[J]. *中国冶金教育*, 2023(4): 1-3.
- DU X D, HUANG K B, LI K G, et al. Teaching reform of rock mechanics course based on FLAC3D numerical simulation technology[J]. *China Metallurgical Education*, 2023(4): 1-3.
- [18] 李俊平, 李宇聪, 王海泉, 等. 基于数值模拟和变形监测的副井稳定性评价[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(4): 1412-1421.
- LI J P, LI Y C, WANG H Q, et al. Stability evaluation of auxiliary shaft based on numerical simulation and deformation monitoring[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(4): 1412-1421.
- [19] 许 锐, 王广璐, 程 辉, 等. 地震荷载下饱和黄土高填方边坡稳定性研究[J]. *甘肃科学学报*, 2023, 35(4): 23-33.
- XU R, WANG G L, CHENG H, et al. Study on stability of saturated loess high-fill slope under seismic loading[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2023, 35(4): 23-33.
- [20] 柯 松, 陈海军, 余义邦, 等. 强夯作用下回填边坡动力响应试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2022, 51(5): 81-86.
- KE S, CHEN H J, SHE Y B, et al. Experimental study on dynamic responses of backfill slope under dynamic compaction[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2022, 51(5): 81-86.

(责任编辑 周雪梅)