

地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

WANG Laigui, XIANG Li, ZHAO Na, and LIU Xiangfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-03>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40-46

破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

吴兵, 梁瑶, 赵晓彦, 唐晓波, 吴晓春, 罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108

基于连续小波变换的斜坡动力响应特征分析

Time-Frequency characteristics and seismic response analyses of the 6.0-magnitude earthquake, Changning County of Yibin in Southwest China's Sichuan Province

金刚, 王运生, 何先龙, 史丙新, 周宇航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 1-8

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27-35

基于压力状态响应模型框架的城市地震综合易损性评价

Comprehensive evaluation of urban earthquake vulnerability under the framework of PSR

李江龙, 樊燕燕 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 117-125

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-03

地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

王来贵, 向 丽, 赵 娜, 刘向峰

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:抚顺西露天矿由于长期开采造成地底岩层出露,形成众多顺倾多弱层岩质边坡。鉴于目前对于地震作用下顺倾多弱层岩质边坡的研究较少,选择抚顺西露天矿南帮 E1000 处顺倾多弱层岩质边坡,分析地震作用下多弱层对边坡动力响应的影响。利用有限差分软件对边坡进行数值建模,分析真实地震动作用下边坡不同弱层的动力响应变化规律,并将双弱层、单一弱层和无弱层四种情况进行对比,发现不同弱层的动力响应和对边坡的影响程度不同,位于边坡下部的弱层无高程放大效应但对边坡起主导作用,与坡面共线的弱层存在趋表放大效应和高程放大效应但对边坡无明显影响。双向地震动对顺倾多弱层边坡的弱层和坡面放大效应不受影响,Z(垂直)方向的加速度和速度显著增加,双向地震动作用下边坡的速度分布差异明显,但位移分布无显著变化。地震作用下顺倾多弱层边坡的动力响应规律与弱层的分布位置和作用机理有关,在边坡的防护和治理过程中应充分考虑弱层对边坡的影响。

关键词:多弱层;岩质边坡;地震作用;动力响应

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0018-08

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

WANG Laigui, XIANG Li, ZHAO Na, LIU Xiangfeng

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: The long-term mining of the Fushun West Open-pit Mine has resulted in the exposure of underground rock layers, forming numerous down-dip and weak-layer rock slopes. In view of only few studies on the down-dip and multi-weak layer rock slopes under earthquakes, selected the down-dip multi-weak layer rock slope at E1000 in the south bank of the Fushun West Open-pit Mine, the paper analyzed the influence of multiple-weak layers on the dynamic response of the slope under earthquake action. The finite difference software is used to model the slope numerically and analyze the dynamic response of different weak layers of the slope under the real seismic action. Then by comparing the cases of double weak layers, single weak layer and no weak layer, found that different weak layers have different dynamic response and the degree of influence on the slope is also different. The weak layer located at the lower part of the slope has no elevation amplification effect but plays a dominant role in the slope. The weak layer collinear with the slope surface has the surface amplification effect and the elevation amplification effect but hasn't obvious impact on the slope. Bidirectional ground motions has not affected the weak layers and slope magnification effect of the numerous down-dip and weak-layer slopes. The acceleration and velocity in the Z (vertical) direction increase significantly. The velocity distribution of the slope under the action of bidirectional ground motion has obvious difference, but the displacement distribution does not change significantly. The dynamic response law of numerous down-dip and weak-layer slopes under the action of earthquakes is related to the location and mechanism of the weak layers. The influence of weak layers on the slope should be fully considered in the protection and treatment of slopes.

Keywords: multiple weak layers; rocky slope; earthquake action; dynamic response

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-12-17

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC1503102)

第一作者: 王来贵(1962-),男,博士,教授,主要从事矿山灾害治理方面的研究工作。E-mail:1611525041@qq.com

通讯作者: 向 丽(1996-),女,硕士研究生,主要从事边坡地质灾害方面的研究工作。E-mail:512130372@qq.com

0 引言

在地震、降雨、地下开采、工程建设等外界激励作用下,矿区多弱层边坡时常发生滑坡。许多科研工作者对边坡在外界激励下的动力响应进行过深入的研究,其中地震作用下边坡的动力响应是研究的重点内容之一。地震作用下边坡的动力响应研究主要是从边坡不同位置的加速度、速度和位移的对比分析得出相应规律,边坡动力响应规律的研究为边坡的防护和治理提供重要理论指导^[1]。边坡在地震作用下的研究方法可归纳为五种方法,分别是 Newmark 滑块计算方法、拟静力法、模型试验方法、数值分析方法和能量分析方法^[2]。SONG 等^[3]基于 Newmark 滑块计算方法建立扩展滑动块体模型,并计算分析了边坡模型深部、浅部的变形破坏及其耦合作用。徐光兴等^[4]、杨国香等^[5]、SONG 等^[6]、毕鹏程等^[7]采用模型试验方法,进行了边坡大型振动台模型试验,揭示了不同地震波作用下模型边坡的动力响应规律。NAKAJIMA 等^[8]基于动态离心模型试验,建立地震作用下边坡破坏的模拟程序,利用极限平衡分析方法分析边坡的稳定性。刘彪等^[9]、王雪艳等^[10]采用时域波动分析法构建模型和建立黏弹性人工边界实现地震波斜入射边坡,突破了传统地震波输入方向的局限性。张昆祥^[11]、靳飞等^[12]、柏威伟等^[13]采用数值模拟分析方法对不同类型的边坡进行动力响应规律的研究发现,加速度和速度在水平方向和竖直方向上都表现出趋表放大效应和高程放大效应的规律。数值分析方法是研究地震作用下边坡动力响应的重要方法,赵金等^[14]、王学伍等^[15]、周逸飞等^[16]利用数值分析方法研究软弱夹层对边坡地震的动力响应,软弱夹层的位置对放大效应有显著影响。

前人通过不同研究方法对地震作用下边坡的动力响应规律进行了大量的研究,但对含软弱夹层的复杂岩质边坡的研究相对较少,对顺倾多弱层的边坡研究更为稀缺。基于此,本文选择抚顺西露天矿南帮 E1000 处顺倾多弱层边坡进行地震激励下的动力响应研究。

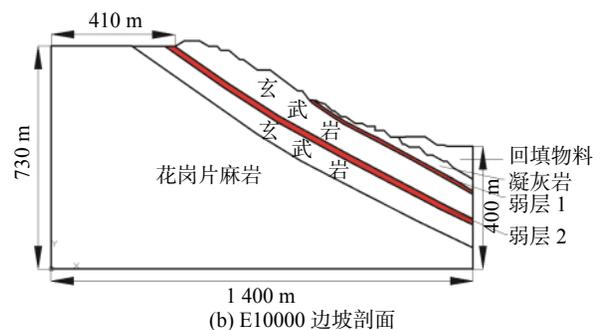
1 抚顺西露天矿顺倾多弱层岩质边坡

抚顺西露天矿位于辽宁省抚顺市市区西南部,浑河南岸,千山台北麓。抚顺西露天矿于 1901 年开采距今已有一百多年历史^[17]。随着开采进度的推进,抚顺西露天矿区逐渐扩大,矿坑深度增加,地下岩层也逐渐露出,形成众多构造复杂、多岩层的高陡边坡。抚顺西露天矿受庐断裂地震带的影响,时常发生小型地震,而且

地下开采活动造成矿区地质环境改变,导致矿震频发。抚顺西露天矿从 20 世纪 30 年代开始每年记录到的矿震高达几千次。小型地震和矿震本身不会造成大型地质灾害,但是与其他地质灾害耦合如将地震激励作用在边坡上,有可能诱发大型地质灾害^[18-19]。抚顺西露天矿南帮边坡大都为顺倾多弱层边坡,弱层的分布位置对边坡的稳定性起决定性作用。抚顺西露天矿南帮 E1000 处的边坡构造复杂,由不同岩层组合形成顺倾边坡如图 1(a)所示,该处边坡的稳定性差,外界扰动下易诱发滑坡灾害,因此本文选用该处边坡进行研究。E1000 处边坡岩层由浅到深依次是回填物料、凝灰岩、玄武岩和花岗片麻岩,夹有两个弱层。弱层 1 位于凝灰岩和玄武岩交界区域,弱层 2 位于玄武岩中部区域,如图 1(b)所示。针对 E1000 处顺倾多弱层边坡的实际情况,探讨真实地震作用下的多弱层对边坡动力响应的



(a) E1000 边坡照片



(b) E1000 边坡剖面

图 1 南帮东部局部区域边坡及 E1000 剖面

Fig. 1 Partial regional slope and E1000 section in the eastern part of the southern bank

2 模型的建立及地震波的选取

2.1 建立顺倾多弱层岩质边坡模型

根据图 1(b)的尺寸大小和岩层类别,利用有限差分软件对 E1000 处顺倾多弱层边坡建模,边坡岩体的物理力学参数由试验测得列于表 1。根据不同岩体类型进行分组,并按照输入地震波最高频率对应波长的

1/8 ~ 1/10的原则确定网格大小,模型分组及网格划分情况如图 2 所示。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩土体分类	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	抗拉强度 σ_t/MPa
花岗岩麻岩	2 900	10	0.20	0.20	39.0	3.5
玄武岩	2 600	11.9	0.17	1.81	37.2	2.5
回填物料	2 040	0.450	0.32	0	25.0	0.2
凝灰岩	2 590	17.6	0.17	4.61	38.6	2
弱层(破碎带)	2 400	1.076	0.30	0.22	21.6	0.75

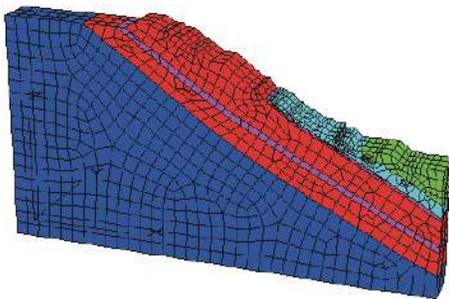


图 2 模型分组及网格划分

Fig. 2 Model grouping and meshing

设置静力边界条件,对模型 Y 方向施加全约束,前后左右边界施加法向约束,模型底面施加法向约束和切向约束。在进行动力计算时不考虑 Y 方向的动力响应,边界条件选用自由边界条件,模型底部约束需要在施加动力边界条件之前释放,施加地震荷载选用加速度时程,力学阻尼选用瑞利阻尼,瑞利阻尼能有效地衰减复杂波形的高频部分,得到更加准确的结果,其参数设置为最小临界阻尼比 5%,最小中心频率 10 Hz。

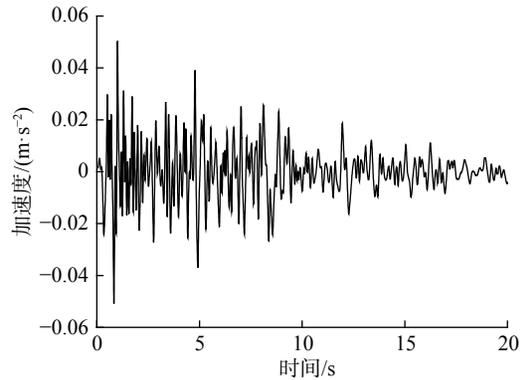
2.2 地震波的选取

根据中国地震动参数区划图,抚顺地区地震动峰值加速度为 0.1 g,地震动加速度反应谱特征周期为 0.35 s。再由相应规范得到抚顺地区的抗震设防烈度为 7 度,地震分组为一组,场地类别为二类,由此确定最大水平地震影响系数 $\alpha_{\max} = 0.08$ 。由程序自动生成目标反应谱,利用目标反应谱在地震动数据库中筛选合适的真实地震动,所选地震动的水平分量和竖直分量前 20 s 加速度时程曲线如图 3 所示。

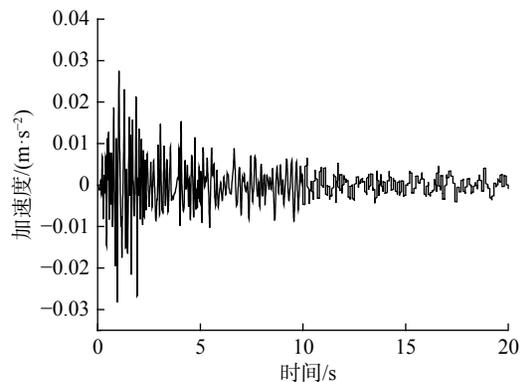
3 多弱层边坡地震响应

3.1 水平单向地震动作用下的模拟结果

考虑弱层对边坡动力响应的影响,在弱层和坡面布设 10 个监测点,监测点的具体位置如图 4 所示。



(a) 水平分量(X方向)



(b) 竖直分量(Z方向)

图 3 加速度时程曲线图

Fig. 3 Acceleration time history curve

本文主要探讨地震作用下多弱层对边坡动力响应的影响,弱层分布位置为图 1(b)红色区域,弱层与坡面倾角相同,弱层 1 与坡面共线,弱层 2 位于坡面下部与坡面平行。弱层 1 监测点在前 2 s 内加速度和速度的变化剧烈程度为 1#>2#>3#, 加速度和速度有随高程增大而增大的现象,存在高程放大效应和趋表放大效应,2 s 之后监测点的加速度和速度区别不大,但加速度和速度会随着高程增加而略有延迟(图 5)。

弱层 2 前 2 s 内监测点 6#、7#的加速度变化比监测点 4#、5#的加速度变化剧烈,2 s 之后监测点加速度振

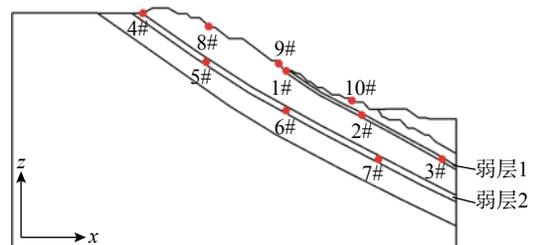


图 4 监测点位置

Fig. 4 Location of monitoring points

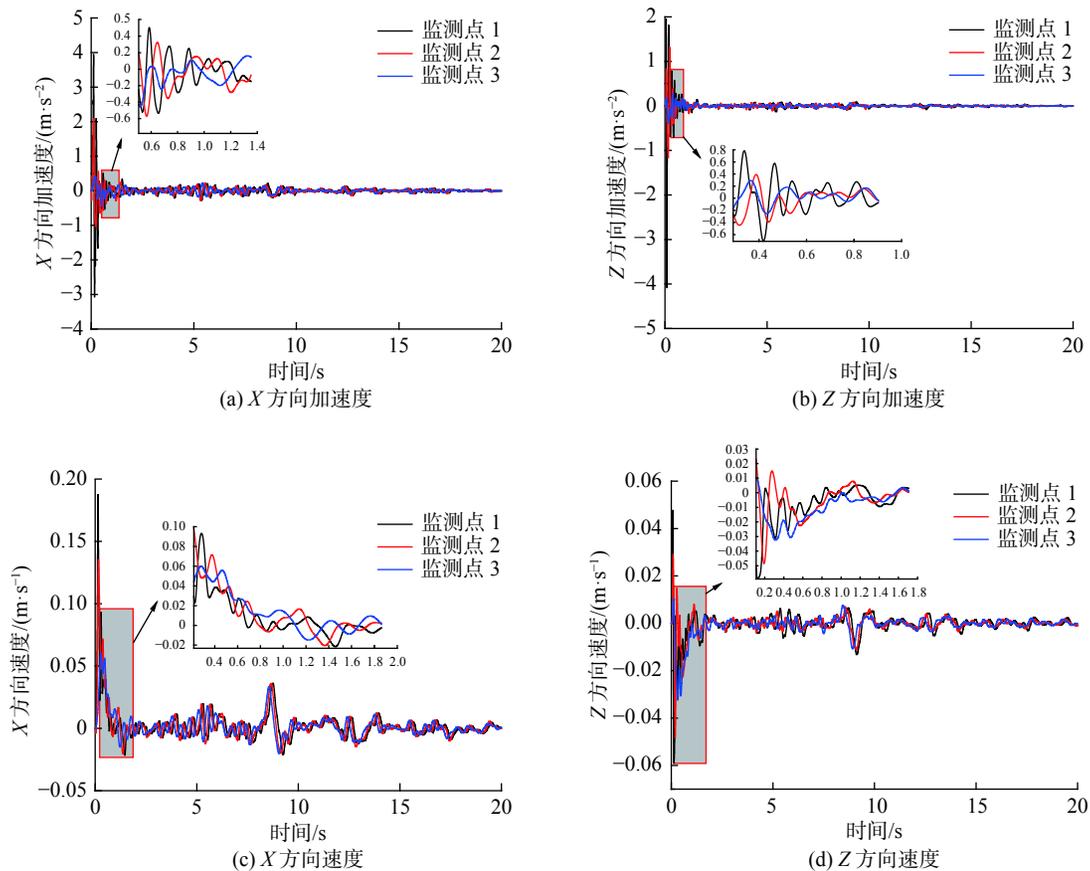


图5 弱层1监测点的加速度和速度时程曲线

Fig. 5 Acceleration and velocity time history curve of weak layer 1 monitoring point

幅相差不大,且围绕零值振动,弱层2下部监测点比上部监测点加速度反应强烈,未产生趋表放大效应和高程放大效应,加速度随着高程增加而略有延迟。弱层2监测点4#的 X 方向速度振幅最大,监测点5#、6#、7#的 X 方向速度振幅随高程增加而减小, X 方向速度有趋表放大效应, Z 方向速度变化剧烈程度为6#>4#>7#>5#,没有出现放大现象,加速度和速度都出现延迟现象(图6)。

对比两个弱层的加速度和速度监测结果可知,两个弱层动力响应不同,弱层1的加速度和速度存在趋表放大效应和高程放大效应,弱层2的 X 方向速度有趋表放大效应,但加速度和 Z 方向速度没有放大效应,监测点5#、6#、7#加速度和速度的监测结果甚至会随高程增大而减小,两弱层监测结果显示加速度和速度都随着高程的增加出现延迟现象,这是由于地震载荷由下向上传播,到达不同高度的时间不同,产生时差,从而出现延迟现象。弱层1和弱层2的位移变化也不相同,弱层1的位移表现为 X 正向移动和沉降,弱层2的位移表现为左右错动和上下拉伸,两弱层的位移增大到某值后不再大

幅度增加,说明两弱层在地震作用下并未完全失稳破坏。

3.2 弱层边坡动力响应

边坡坡面监测点加速度和速度变化剧烈程度随高程的增加呈先减小后增大的趋势,边坡坡面位移随高程增加而减小。坡面监测点8#和弱层2的监测点5#大致位于同一纵向,通过这两监测点的加速度和速度分量对比发现,坡面监测点的加速度和速度都比弱层2监测点的剧烈,加速度和速度都是 X 方向的幅值大于 Z 方向的幅值(图7)。同理分析坡面监测点9#和弱层2监测点6#的加速度和速度,与监测点8#和5#的分析结果相同。对比坡面监测点10#和弱层1监测点2#的加速度和速度分量,两监测点的加速度和速度时程曲线基本重合(图8)。弱层1向坡面同一纵向的加速度和速度变化保持不变,弱层2向坡面同一纵向的加速度和速度变化有高程放大效应。弱层对边坡的动力响应影响存在显著差异,地震动在模型底部施加,地震波由下向上传播,弱层2位于边坡坡面下部,地震波会先经过弱层2再到达坡面,弱层2改变地震波的传播速度,影响其

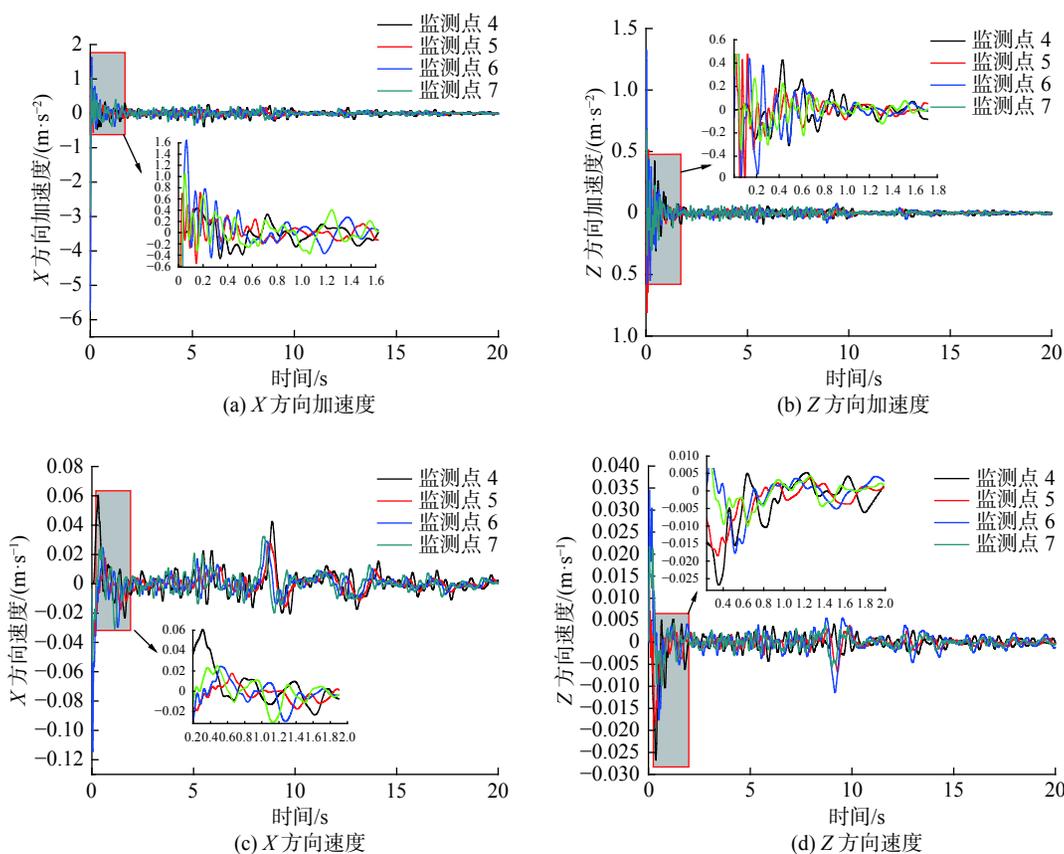


图 6 弱层 2 监测点的加速度和速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration and velocity time history curve of weak layer 2 monitoring point

在坡面的速度,造成边坡坡面动力响应的变化,而弱层 1 与坡面共线,经过弱层 1 的地震波并不会传递到边坡坡面上,因此弱层 1 不会造成边坡动力响应的改变。

为进一步确定弱层对边坡动力响应的影响,对比双弱层、弱层 1、弱层 2 和无弱层四种情况下的塑性区。双弱层塑性区分布在花岗片麻岩中部区域、弱层 2 和坡角处;弱层 1 塑性区分布在花岗片麻岩中部区域、弱层 1 下部和坡角处;弱层 2 塑性区分布在花岗片麻岩中部区域、弱层 2 和坡角处;无弱层塑性区分布在花岗片麻岩中部区域和坡角处(图 9)。塑性区的分布显示弱层 2 易产生塑性变形,弱层 2 能减少花岗片麻岩中部区域的塑性变形,将边坡内部的变形向坡面传送,使边坡坡面岩体沿着弱层 2 滑动,弱层 2 对于边坡的稳定性起着决定性作用。弱层 1 在有弱层 2 存在时不发生塑性破坏,弱层 1 对边坡稳定性的影响很小。

从速度分布可以发现弱层 2 会使坡面的速度由竖向圆弧变为垂直于弱层 2 方向的圆弧,从位移分布能够更加直观的观测到弱层 2 对边坡稳定性的影响,当弱层 2 存在时,位移云图在弱层 2 处有一明显的分界线,弱层 2 会使上部坡面产生更大位移,位移不再连续,从

而边坡沿着岩层方向滑动。无论是速度还是位移,弱层 1 对边坡的动力响应影响都较小,只对边坡坡脚有一定影响。以上分析发现,顺倾多弱层对边坡的动力响应影响与弱层的分布位置有关,分布在坡面下方与坡面平行的弱层 2 占据主导地位,分布在坡角下部与坡面共线的弱层 1 对边坡的动力响应基本没有影响。因此在进行多弱层边坡防护和治理时,应充分考虑弱层的分布位置和作用机理。

3.3 双向地震动作用下的监测结果

双向地震动作用下弱层 1 的加速度和速度存在趋表放大效应和高程放大效应,弱层 2 的 X 方向速度有趋表放大效应,两弱层的加速度和速度都会随着高程的增加出现延迟现象。弱层 1 向坡面同一纵向的加速度和速度变化保持不变,弱层 2 向坡面同一纵向的加速度和速度变化有高程放大效应,监测结果与水平单向地震动作用下的结果保持一致。对比四种不同弱层情况下边坡的塑性区分布发现,弱层 2 对边坡稳定性起主导作用,分布情况与单向地震动作用下的基本一致。与单向地震动作用对比,双向地震动作用下弱层监测点在 X 方向的加速度和速度稍有增加,在 Z 方向的加速度和速度

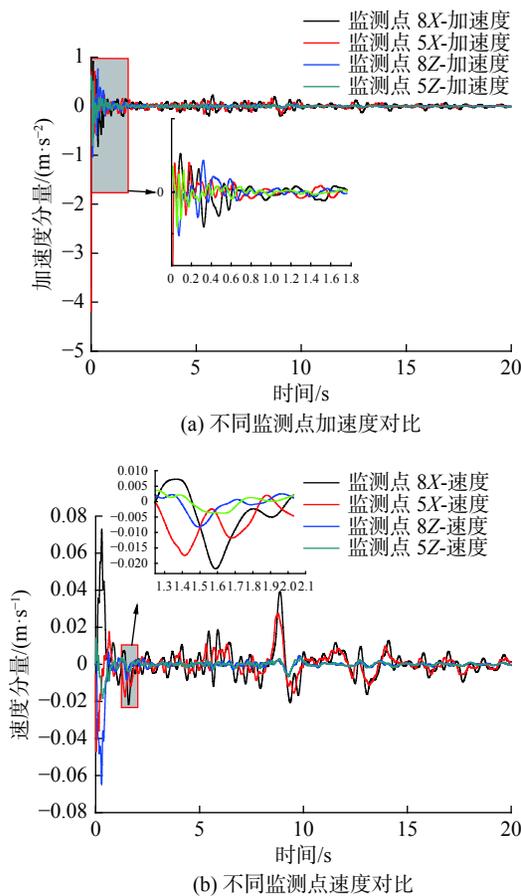


图 7 监测点 8#和监测点 5#加速度、速度对比
Fig. 7 Comparison of acceleration and velocity between monitoring point 8# and monitoring point 5#

显著增加, 说明弱层加速度和速度的放大效应规律不受增设地震动的影响, 但是新增地震动会加剧其所施加方向边坡岩体的运动, 使边坡更易失稳破坏。

双向地震动作用下的速度和位移分布结果表明, 边坡坡面最大 X 方向速度分布在坡肩, 坡面 X 方向速度呈圆弧状分布, 而水平单向地震动作用下, 边坡坡面 X 方向速度随着坡面降低而增大。双向地震动作用下边坡坡面 Z 方向速度在坡肩处最大, 随坡面降低速度而减小, 单向地震动作用下坡面下部区域速度最大, 随着坡面升高速度减小。速度分布情况表明双向地震动作用下边坡坡肩处更易发生破坏, 而水平单向地震动作用下边坡下部区域更易发生破坏。二者 X 方向位移分布相同, 以弱层 2 作为分界线, 分界线两侧 X 方向位移差距明显, Z 方向位移分布基本相同, 存在差异的地方是坡角下部分界线不再沿着弱层 2 的方向, 这与双向地震动作用下坡肩处存在较大的变形破坏有关, 坡肩处为应力集中区域。双向地震动作用下的速度分布变化明显, 但位移分布无显著变化。边坡动力响应不同与地震动

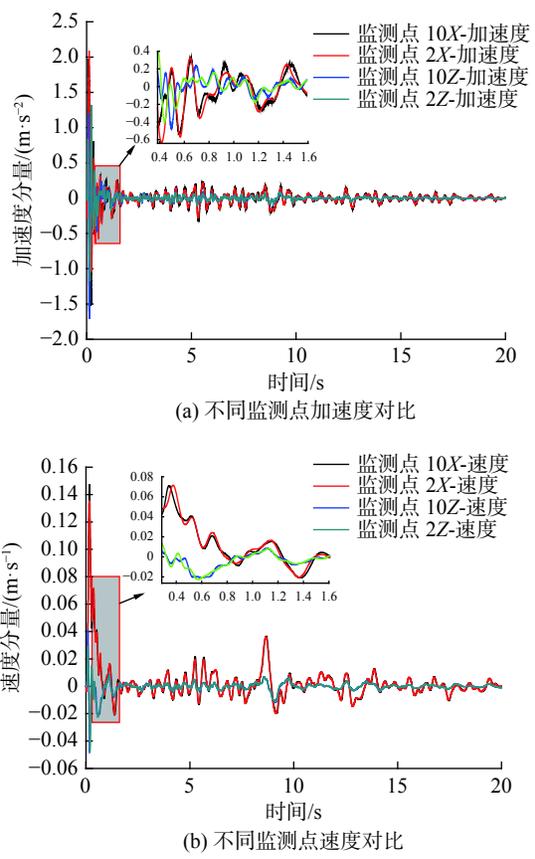


图 8 监测点 10#和监测点 2#加速度、速度对比
Fig. 8 Comparison of acceleration and speed between monitoring point 10# and monitoring point 2#

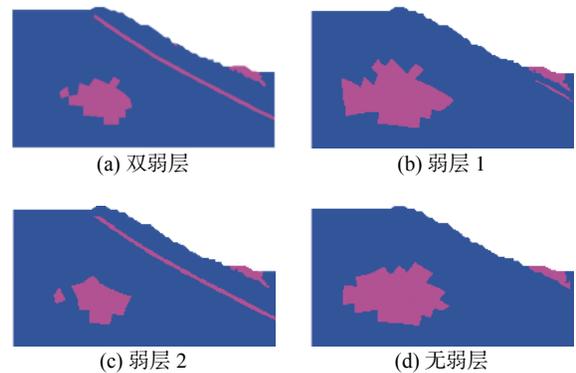


图 9 边坡塑性区分布
Fig. 9 Distribution of slope plastic zone

叠加有关, 双向地震动下边坡 X 方向和 Z 方向动力响应都有不同程度的增大, 动力响应也有叠加现象, 两种动荷载下的塑性区没明显变化, 说明施加地震动荷载值较小, 边坡模型大多数单元都只发生弹性变形, 未进入塑性状态。

4 结论

基于抚顺西露天矿南帮 E1000 处边坡建立数值计

算模型,研究地震载荷下边坡的动力响应,并将弱层分双弱层、弱层 1、弱层 2 和无弱层四种情况进行讨论,分析两弱层对边坡动力响应的影响,增加竖向地震动,分析双向地震动作用下顺倾多弱层边坡的加速度、速度和位移,得出以下结论:

(1)两个弱层的动力响应不同,弱层 1 的加速度和速度存在趋表放大效应和高程放大效应,弱层 2 的 X 方向速度有趋表放大效应但加速度和 Z 方向速度没有放大效应,加速度和速度都存在延迟现象。

(2)顺倾多弱层对边坡的动力响应影响与弱层的分布位置有关,弱层 2 占据主导地位,弱层 1 只对坡角有一定影响,在进行多弱层边坡防护和治理时,应充分考虑弱层的分布位置和作用机理。

(3)双向地震动和水平单向地震动作用下,边坡的放大效应规律以及四种不同弱层情况下边坡的塑性区分布基本不变,只是 Z 方向的加速度和速度显著增加,双向地震动作用下边坡的速度分布差异明显,但位移分布无显著变化。

参考文献 (References) :

- [1] 郑旭辉,孙进忠,邵安阳,等. 边坡地震动力稳定性研究进展 [J]. *华北地震科学*, 2015, 33(4): 1-5. [ZHENG Xuhui, SUN Jinzhong, SHAO Anyang, et al. Research progress of slope dynamic stability under seismic actions [J]. *North China Earthquake Sciences*, 2015, 33(4): 1-5. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 宋丹青,陈志荣,陈俊栋. 岩质边坡地震动力响应研究进展 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(6): 1-7. [SONG Danqing, CHEN Zhirong, CHEN Jundong. Advances in the seismic dynamic response of rock slope [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)]
- [3] SONG J, WU K L, FENG T G, et al. Coupled analysis of earthquake-induced permanent deformations at shallow and deep failure planes of slopes [J]. *Engineering Geology*, 2020, 274: 105688.
- [4] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(3): 624-632. [XU Guangxing, YAO Lingkan, GAO Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(3): 624-632. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杨国香,伍法权,董金玉,等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 696-702. [YANG Guoxiang, WU Faquan, DONG Jinyu, et al. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 696-702. (in Chinese with English abstract)]
- [6] SONG D Q, CHE A L, CHEN Z, et al. Seismic stability of a rock slope with discontinuities under rapid water drawdown and earthquakes in large-scale shaking table tests [J]. *Engineering Geology*, 2018, 245: 153-168.
- [7] 毕鹏程,车爱兰,袁刚烈. 基于振动台试验的地震作用下岩质边坡位移演化特征 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 11-19. [BI Pengcheng, CHE Ailan, YUAN Ganglie. Displacement evolution of rock slope under earthquake based on shaking table test [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 11-19. (in Chinese with English abstract)]
- [8] NAKAJIMA S, ABE K, SHINODA M, et al. Dynamic centrifuge model tests and material point method analysis of the impact force of a sliding soil mass caused by earthquake-induced slope failure [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(6): 1813-1829.
- [9] 刘彪. 边坡地震动力放大与永久位移分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [LIU Biao. Seismic dynamic amplification and permanent displacement analysis of slope[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王雪艳,刘超,尹超,等. 地震波斜入射下土质边坡的稳定性分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(4): 589-595. [WANG Xueyan, LIU Chao, YIN Chao, et al. Stability analysis of soil slopes with oblique incident seismic waves [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(4): 589-595. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张昆祥. 地震诱发层状岩质斜坡动力响应数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [ZHANG Kunxiang. Study on dynamic response of layered rock slope induced by earthquake through numerical simulation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 靳飞飞,言志信,翟聚云,等. 地震作用下多级高边坡动力响应数值分析 [J]. *河南城建学院学报*, 2019, 28(6): 1-6. [JIN Feifei, YAN Zhixin, ZHAI Juyun, et al. Numerical analysis of dynamic response of multistage high slope under earthquake [J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2019, 28(6): 1-6. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 柏威伟,石磊,吴福宝,等.地震作用下多级平台路堑边坡的动力响应研究 [J] . *水力发电*, 2020, 46(9): 63 - 68. [BAI Weiwei, SHI Lei, WU Fubao, et al. Study on dynamic response of cutting slope of multistage platform under earthquake [J] . *Water Power*, 2020, 46(9): 63 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 赵金,吴红刚,杨涛.滑坡对不同特性地震波的动力响应规律 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(6): 47 - 52. [ZHAO Jin, WU Honggang, YANG Tao. Dynamic response of landslides to different seismic wave [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(6): 47 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王学伍,张彦君,万驰,等.地震作用下含软弱夹层的顺倾岩质边坡加速度放大效应探究 [J] . *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(3): 37 - 41. [WANG Xuewu, ZHANG Yanjun, WAN Chi, et al. Acceleration amplification effects of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake [J] . *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(3): 37 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 周逸飞,刘汉香,朱星,等.含软弱夹层岩质边坡的模式分析及其对边坡地震动力响应影响的初步研究 [J] . *地震工程与工程振动*, 2020, 40(1): 223 - 232. [ZHOU Yifei, LIU Hanxiang, ZHU Xing, et al. Modal analysis of rock slope with a weak interlayer and its influence on seismic dynamic response of slope [J] . *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 223 - 232. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王彤.抚顺西露天矿北帮边坡动力响应分析[D].长春:吉林大学,2016. [WANG Tong. Dynamic response of the north slope of Fushun west open pit[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王建国.残采期抚顺西露天矿边坡动力响应研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006. [WANG Jianguo. Study on dynamic response of Fushun west open pit mine slope in remaining coal mining period[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [19] KAWAMURA S, KAWAJIRI S, HIROSE W, et al. Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake [J] . *Soils and Foundations*, 2019, 59(6): 2376 - 2395.