

## 地震作用下含弱层顺向坡响应规律分析

王来贵, 孙颖聪, 赵娜, 向丽

### Analysis on the response of the dip slope with weak layer to earthquake

WANG Laigui, SUN Yingcong, ZHAO Na, and XIANG Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202210029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

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

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

#### 云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyuan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

#### 强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

#### 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

#### 三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61

#### 西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式

Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province

徐伟, 冉涛, 田凯 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 127-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202210029

王来贵, 孙颖聪, 赵娜, 等. 地震作用下含弱层顺向坡响应规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 26-35.

WANG Laigui, SUN Yingcong, ZHAO Na, et al. Analysis on the response of the dip slope with weak layer to earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 26-35.

## 地震作用下含弱层顺向坡响应规律分析

王来贵, 孙颖聪, 赵娜, 向丽

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:**以抚顺西露天矿南帮含弱层顺向坡作为参考原型, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模拟实际地震动及地震动输入、斜坡模型的边界条件、岩体参数以及网格模型划分, 对含弱层顺向坡进行数值模拟计算, 通过监测点的加速度和速度探讨含弱层顺向坡在地震作用下的响应规律。研究表明: (1) 地震作用下对于含单一弱层斜坡响应特征起到决定性的影响因素是弱层的厚度, 在地震荷载作用下影响斜坡的稳定程度要大于单一弱层倾角的影响。(2) 通过弱层与斜坡坡面的相交部位监测点 2# 在水平方向速度可以得出, 厚度对于 X 方向的速度大小影响程度较大。(3) 对于地震作用下双弱层特性斜坡的响应规律分析时, 弱层与斜坡相交部位的破坏响应规律会随着坡高的增大而有所变化, 双弱层监测点 3# 的加速度幅值变化及速度变化程度均比双弱层监测点 2# 明显。地震作用下顺向坡的响应规律与含有弱层的倾角、厚度和弱层的数量位置有关, 在对斜坡的治理与防护的过程中应当充分考虑地震与弱层特性的耦合作用对斜坡稳定性的影响。

**关键词:** 弱层; 顺向坡; 地震作用; 响应规律

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0026-10

## Analysis on the response of the dip slope with weak layer to earthquake

WANG Laigui, SUN Yingcong, ZHAO Na, XIANG Li

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

**Abstract:** Taking the down-slope with weak strata in the south of Fushun west open-pit mine as the reference prototype, numerical simulations of the down-slope with weak strata were conducted through FLAC<sup>3D</sup> software, which included the simulation of actual ground motion and ground motion input, the boundary conditions of slope model, rock mass parameters, and grid model division. The response rule of down-slope with weak strata under an earthquake was investigated by analyzing the acceleration and velocity of the monitoring points. The results revealed that: (1) The thickness of the weak layer is a critical factor affecting the response characteristics of the slope with a single weak layer under an earthquake, and it has a greater impact on the stability of the slope under earthquake load than the dip angle of a single weak layer. (2) Based on the horizontal velocity of monitoring point 2# at the intersection of the weak layer and the slope surface, it was concluded that the thickness has a significant influence on the velocity in the X direction. (3) The failure response law at the intersection of weak layers and slope changes with an increase in slope height when analyzing the response law of the double weak layer characteristic slope under an earthquake. The acceleration amplitude and velocity change degree of monitoring point 3# with double weak layers are

收稿日期: 2022-10-19; 修订日期: 2023-04-03

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

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, 矿山环境与灾害力学专业, 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: 孙颖聪(1997—), 男, 矿山环境与灾害力学专业, 硕士研究生, 主要从事边坡地质灾害方面的研究工作。

E-mail: 978818634@qq.com

more noticeable than that of monitoring point 2#. The response law of the down-slope under an earthquake is related to the dip angle, thickness, number, and location of weak layers. Therefore, the coupling effect of earthquake and weak layer characteristics on slope stability should be thoroughly considered in the process of slope treatment and protection.

**Keywords:** weak layer; dip slope; earthquake action; response law

## 0 引言

由于地震导致的灾害类型多样,主要为地震作用下的斜坡失稳、地表破裂、泥石流、砂土液化和地面变形灾害,其次为地震塌陷和堰塞湖与溃决灾害<sup>[1]</sup>。作为斜坡动力稳定的基础,地震作用下含弱层顺向坡的动力响应规律是一个值得深入研究的问题。对于含弱层顺向坡在地震作用下的响应规律分析问题,学者做了以下研究。闫孔明等<sup>[2]</sup>通过离心地震台试验表明,输入地震动的峰值大小对弱层的加速度放大效应的大小起着绝对性的作用,输入的地震动峰值较小时,弱层内部响应加速度峰值会被削弱,输入的峰值较大时,则被增强;伴随着输入的地震动峰值增大,弱层内部响应加速度的频率和成分做出了相应的改变,低频成分增加且高频成分减小。黄润秋等<sup>[3]</sup>通过计算机模拟研究,得出的结论如下:地表低速层和隐性的弱层相似也能够产生地震动的放大作用,对于总体揭示弱层对地震动影响的基础上,把这种隐性的弱层与地表低速弱层类似产生的频率波放大作用的规律作为重点进行了探讨。陈国兴等<sup>[4]</sup>通过数值分析,针对软弱土层的埋深和厚度对深厚场地地震动的影响进行了分析。对于给定的输入地震动条件,当软弱表层土的厚度超过一定界限值时,地表加速度峰值及放大系数的变化已不是很明显;当软弱表层土的厚度超过一定界限值时,加速度放大系数会小于1,即软弱表层土可起到减震的作用;对于同一场地,输入地震动强度越大,此软表层厚度值越小。弱层厚度对地表加速度峰值的影响与弱层所处位置有关。刘小丽等<sup>[5]</sup>采用机动位移法,对发育多个有规律的弱层岩体斜坡稳定性评价方法进行了探讨。通过塑性极限分析,在其基础上,提出将能量系数用作斜坡稳定性评估的标准,且推导出来与此相关的公式。许宝田等<sup>[6]</sup>采用数值法,针对某斜坡岩体的变形特征进行研究,弱层上面的剪应力分布具有一定的规律,为前后低和中前部高的特点,弱层附近最容易发生剪切屈服,屈服特点为先坡脚发生屈服,然后形成的破坏面逐渐向上和后方延伸,只要屈服后形成了滑动面,那么此斜坡便处于失稳状态。王浩然等<sup>[7]</sup>进行算例计算,把算例得出的结果和强度折减的结果进行相应的对比,验证了算例的实效性。得到的结论

是传统的转动破坏分析方法不能得到弱层对斜坡稳定性的影响规律,然而转动平动的组合可以很好地用来讨论含弱层斜坡的动力响应规律。刘汉香等<sup>[8-9]</sup>基于振动台模型试验,得出了结论:含弱层岩质斜坡在传播至其上的地震波产生的水平惯性力作用下将出现一定程度的高程效应,表现在水平向加速度峰值放大系数沿着坡面或坡内高程增加而呈现出增大趋势。周飞等<sup>[10]</sup>经过研究,斜坡动力响应所选因素的影响大小顺序依次为斜坡高程、坡体位置、弱层厚度、激励振幅、加载波形、激励方向,其中斜坡高程、坡体位置以及弱层厚度对斜坡动力响应具有显著性影响。李慧等<sup>[11]</sup>运用数值分析方法对含弱层的斜坡进行地震动力响应研究,结果表明斜坡在地震作用下最危险的滑动面处于弱层与岩体相交部位。数值分析方法在研究地震作用下含弱层顺向坡响应规律十分重要,杨乾等<sup>[12]</sup>、王学伍等<sup>[13]</sup>、周逸飞等<sup>[14]</sup>利用数值分析方法研究弱层对斜坡地震的动力响应,弱层的位置对放大效应有显著影响。安晓凡等<sup>[15]</sup>对地震作用下含弱层顺向坡破坏形式进行了相应的研究,得出结论为倾倒破坏是含弱层顺倾岩质斜坡失稳的主要模式,但由于岩层倾倒变形所引起的斜坡二次破坏形式有可能是滑动、崩塌。

综上所述,学者通过不同的研究方法对地震作用下含弱层顺向坡响应规律进行了大量研究,但对于地震作用下含弱层斜坡的破坏规律及其影响因素方面的研究相对较少,以及地震荷载和弱层特性相互耦合作用下对斜坡的影响研究也比较少。基于以上问题,抚顺西露天矿自身经常地震动扰动频发,因此,选取抚顺西露天矿南帮斜坡作为研究的参考对象,进行数值模拟研究。利用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>建立了简易模型,选取抚顺西露天矿实际采样地震动荷载,通过数值模拟所设置监测点的加速度和速度进行分析,将含弱层顺向坡的弱层倾角、厚度和弱层层数等特性对斜坡的响应规律进行总结。此研究对于减少地震作用下斜坡的失稳破坏,保证许多国家重点工程的安全顺利完成,具有重要意义。

## 1 抚顺西露天矿工程地质条件概况

抚顺西露天矿位于抚顺煤田西部,受邻庐断裂地震带的影响,时常发生微小的地震,抚顺西露天矿发生的

一些微小的地震和些许矿震本身并不会造成多大的地质灾害,但是地震以及地质灾害耦合在一块就会形成不小的影响,有可能诱发大型地质灾害<sup>[16]</sup>。抚顺西露天矿全貌如图 1 所示,露天矿南帮大多数为含弱层顺向坡,弱层的特性对于斜坡的稳定响应特征起着至关重要的作用。

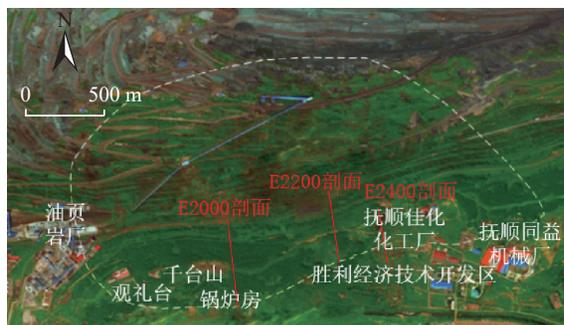


图 1 抚顺西露天矿全貌

Fig. 1 Aerial view of Fushun west open-pit mine

抚顺西露天矿南帮 E2000、E2200 以及 E2400 斜坡构造比较复杂,以 E2000 为例,E2000 平面图信息如图 2 所示。花岗片麻岩位于含弱层顺向坡的底部,上面为玄武岩,弱层夹在两处玄武岩之间,凝灰岩处于玄武岩之上,回填物料在斜坡的最上方。

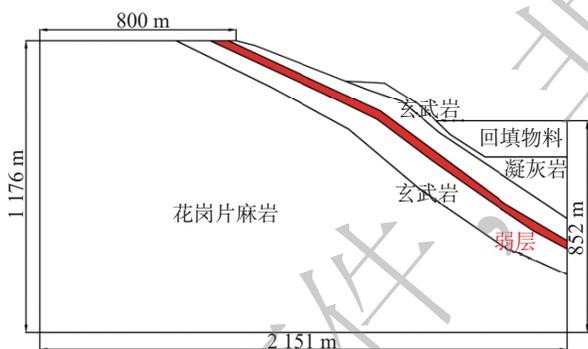


图 2 E2000 平面图

Fig. 2 Floor plan of E2000

## 2 数值模型

### 2.1 模型与参数

由于 E2000 剖面内部岩性组成比较多,为了研究地震作用下含弱层顺向坡之间的响应特征,将以上南帮模型作为斜坡计算的参考模型,并且将斜坡模型以及岩体参数进行了相应的简化,得到如图 3 所示的斜坡计算模型,坡高为 800 m,坡顶长度为 800 m,坡底长度为 1 400 m,取坡面倾角为 60°,弱层的倾角及厚度根据南帮斜坡的实际情况进行选择,弱层倾角选择 10°、15°和 20°,厚度

选择了 1, 1.5, 2 m。为了便于研究斜坡与弱层相交部分的破坏规律,设定了 6 个监测点,主要研究图中监测点 2#和 3#的加速度及速度。该模型是一种多弱层斜坡模型,在研究单弱层斜坡响应特征时,在此模型的基础上进行了研究。含弱层顺向坡的力学参数与抚顺西露天矿南帮斜坡岩体参数一致,如表 1<sup>[17]</sup>所示。

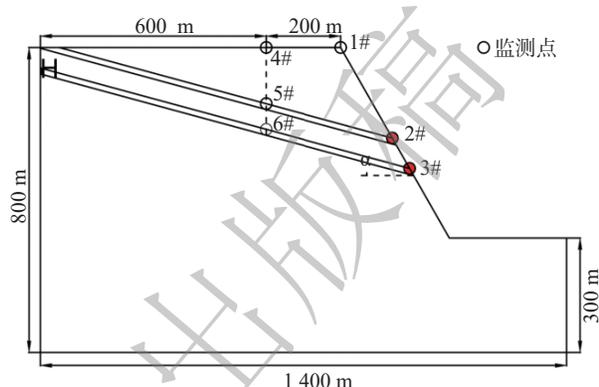


图 3 斜坡计算模型

Fig. 3 Schematic view of the slope calculation model

表 1 岩体材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass materials

| 介质   | 密度 /<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量 /<br>/GPa | 泊松比  | 黏聚力 /<br>/MPa | 内摩擦角 /<br>(°) | 抗拉强度 /<br>/MPa |
|------|-------------------------------|----------------|------|---------------|---------------|----------------|
| 岩体   | 2 900                         | 10             | 0.20 | 0.20          | 39.0          | 3.5            |
| 软弱夹层 | 2 400                         | 1.076          | 0.30 | 0.22          | 21.6          | 0.75           |

### 2.2 网格划分及地震动荷载的选取

本文利用加速度时程输入的方式来表示地震动荷载,不施加黏性边界作为模型底部的约束条件,模型两侧则采用自由边界场<sup>[18]</sup>。此文章探究弱层特性对于地震作用下顺向坡的响应规律,不考虑对斜坡模型进行双向地震动的输入,并且刘红帅等<sup>[19]</sup>指出对于含弱层顺向坡动力响应最大的是剪切波,所以采用二维模型来进行斜坡地震作用下响应特征的模拟,且只在模型的水平方向即 X 方向施加地震波;董金玉等<sup>[20]</sup>研究发现,输入的地震动属于正弦波以及真实地震波时,对于含弱层顺向坡的影响大致相同,因此,本文考虑采用正弦波作为输入地震动,地震波幅值为 0.1g,其频率为 1 Hz。进行动力分析时,利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立斜坡模型其网格的大小和尺寸由地震波的最短波长决定。

有关于地震动的选取方法有多种,谢丰蔚<sup>[21]</sup>对所有地震动的选取方法进行了相应说明,可将地震动的选取方法分为 3 类:按照设计反应谱选取,按照地震动和观测台站信息选取,按照最不利地震动选取。按照设计反应谱选取地震动能有效控制地震动的离散性,所挑选地

震动的加速度反应谱值与规范反应谱或者是通过其它方法设计的反应谱较为吻合,运用这种方法挑选的地震动数量不用太多,因此本文按照设计反应谱进行地震动的选取。

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 0.1g,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前 20 s 加速度时程曲线如图 4 所示。

### 3 单一弱层斜坡地震响应特征分析

#### 3.1 地震作用下不同弱层倾角斜坡响应特征

图 5 是含单一弱层斜坡在弱层倾角不同的情况下监测点 2# 的加速度和速度时程曲线图。含三种不同倾角斜坡监测点 2# 的 X 方向加速度均呈现出先正向增大,再减小最后趋近于零的变化趋势。X 方向加速度出现随着弱层倾角增大而变小的现象,1 s 之后监测点 2# 的 X 方向加速度趋近于零,斜坡的 X 方向加速度响应

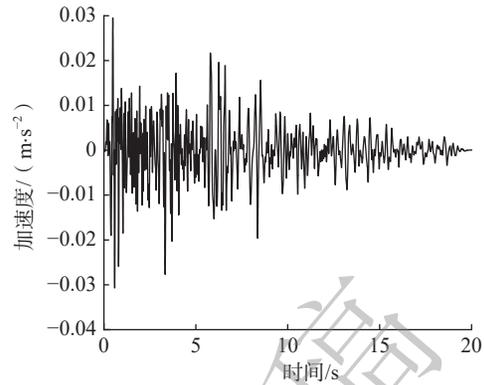
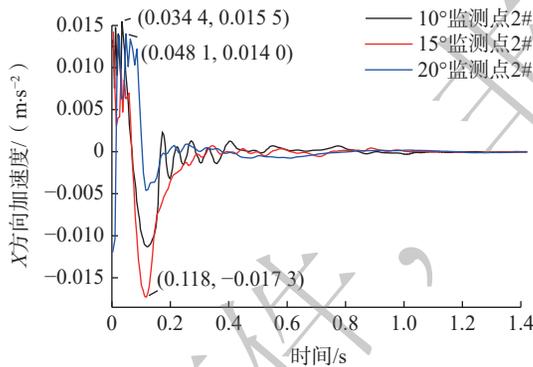


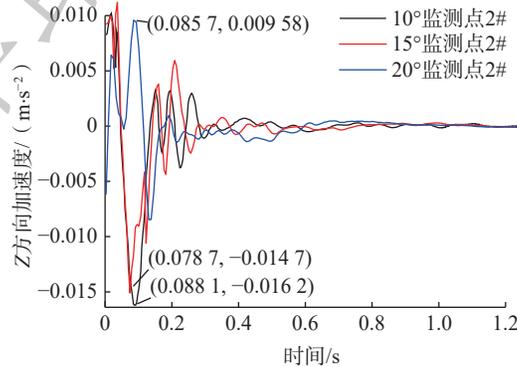
图 4 水平地震动加速度时程曲线

Fig. 4 Time history curve of horizontal seismic acceleration

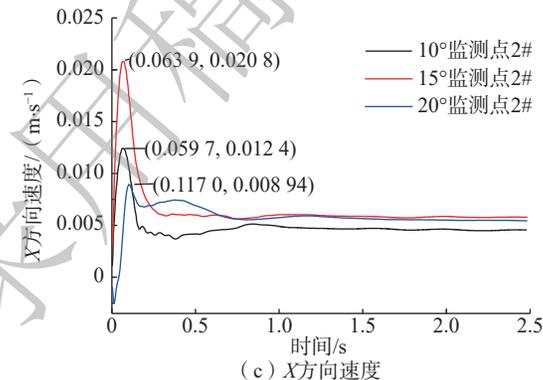
特征也趋近于停止。Z 方向加速度呈现地震动输入短时间内正向增大,紧接着减小,最终趋近 0 m/s<sup>2</sup> 的情况。单一弱层不同倾角的斜坡在施加水平地震动的情况下,倾角为 20° 的弱层与斜坡相交部位呈现出竖直向上的加速度运动趋势,而 10° 与 15° 均有竖直向下的加速度运动趋势。通过对图 4(a)(b) 分析,含弱层倾角 20° 的斜坡监测点 2# 会呈现水平且竖直向上的运动趋势,动力响应特征会随着倾角的增大而变大。监测点 2# 的 X 方向速度以及 Z 方向速度均呈现:弱层倾角 15° >



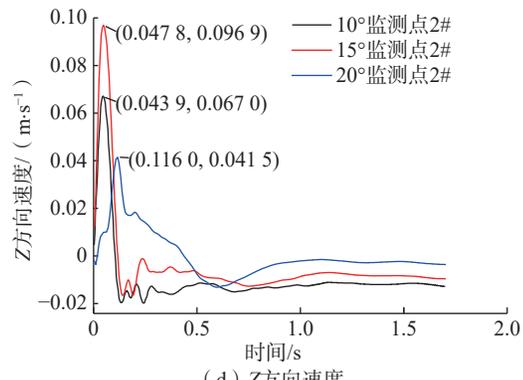
(a) X 方向加速度



(b) Z 方向加速度



(c) X 方向速度



(d) Z 方向速度

图 5 不同倾角监测点 2# 的加速度和速度时程曲线

Fig. 5 Time history curves of acceleration and velocity at monitoring point 2# with different dip angles

倾角  $10^\circ >$  倾角  $20^\circ$  的速度。单一弱层倾角  $15^\circ$  斜坡的速度幅值变化最剧烈,但未产生趋于放大效应和高程放大效应,监测点速度的变化情况与不同弱层的倾角特性密不可分。

### 3.2 地震作用下不同弱层厚度斜坡响应特征

图 6 是含单一弱层不同厚度斜坡监测点 2# 加速度和速度时程曲线图,随着弱层厚度的增加监测点 2# 的 X 方向加速度幅值变化越来越剧烈,弱层厚度 2 m 的斜坡变化最为明显, X 方向加速度在 0.142 s 时急剧降到  $-0.0169 \text{ m/s}^2$ ,弱层厚度为 1 m 监测点 2# 的 Z 方向加速度增加到  $0.0167 \text{ m/s}^2$ 。厚度特性对斜坡的稳定性起到至关重要的作用,厚度越厚,斜坡水平方向的运动趋势

越明显,斜坡的动力响应越剧烈,但对于斜坡垂直方向的运动情况,不与水平方向加速度变化情况成正比。针对含单一弱层与斜坡相交部位的水平速度情况,弱层厚度越厚,监测点 2# 的运动情况变化越大,向斜面水平方向的位移较大。竖直方向的速度变化情况并不与弱层厚度成正比,厚度 1 m 的监测点 2# 在 0.03 s 时急剧增到最大值  $0.0105 \text{ m/s}$ ,接着马上变为负值,此时发生了先向上的位移然后迅速向下移动的情况,斜坡坡面出现了突出及塌陷现象。水平方向的速度最终都趋近于一正值,表明斜坡有水平方向的位移;而对竖直方向的速度情况,均趋近一负值,表明单一弱层与斜坡相交部位存在竖直向下的位移。

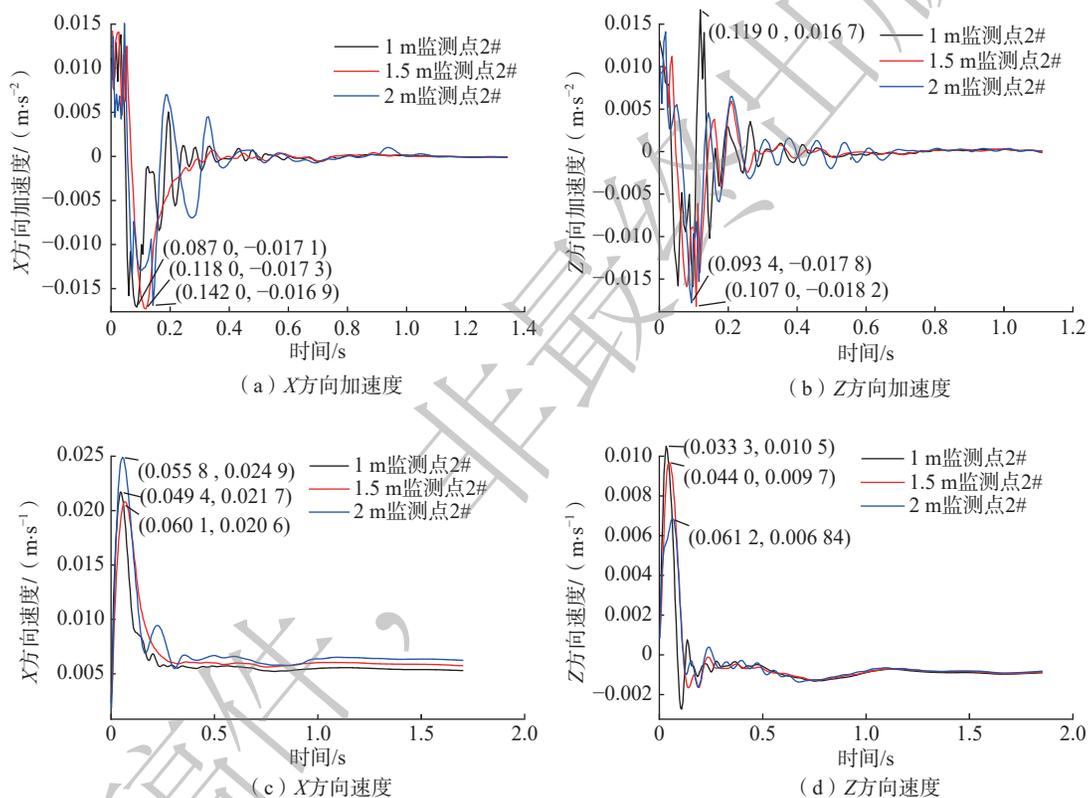


图 6 不同厚度监测点 2# 的加速度和速度时程曲线

Fig. 6 Time history curves of acceleration and velocity at monitoring point 2# with different thicknesses

综上所述,对于含单一弱层不同倾角和不同厚度斜坡稳定性响应特征的研究,所得结果是:单一弱层厚度对于斜坡的稳定性影响比弱层倾角更加明显且作用更大,弱层厚度越厚,水平方向的加速度和速度变化趋势越明显,相比之下,弱层倾角的大小对斜坡响应特征没有那么明显。此结论与刘立平等<sup>[22]</sup>通过动力有限元探讨了弱层倾角、厚度、填满深度的参数对于斜坡加速度及速度等响应规律一致。研究表明:弱层的特性对斜坡

的响应规律影响比较明显;弱层越厚斜坡监测点加速度幅值变化越剧烈;弱层的填满深度越深,速度的放大效应越明显;弱层的倾角对于加速度和速度的影响不显著,但是对于峰值有些影响。

## 4 双弱层斜坡地震响应特征分析

### 4.1 地震作用下不同弱层倾角斜坡响应特征

图 7 为地震作用下含双弱层不同倾角斜坡监测点

2#加速度和速度时程曲线图,在施加地震波的作用下,前0.05 s内监测点2#X方向加速度幅值均呈现急剧增大的现象,斜坡坡面出现水平滑移现象,在0.064 9 s时,双弱层倾角20°达到水平加速度最大值为0.018 1 m/s<sup>2</sup>,0.1 s后,双弱层倾角10°和15°斜坡与弱层交界部位存在着向斜坡内部的加速度趋势。由图7(b)可知,在前0.1 s内三种倾角监测点2#均有竖直向上的加速度趋势,斜坡坡面呈现出突起部位。0.1 s后,均呈现急剧下

降的趋势,表现为斜坡突起部位竖直向下滑落,导致斜坡不稳定。根据图7(c)(d)可得,含双弱层斜坡位于上部的弱层在地震作用下的速度均呈现出迅速增大然后减小到一定值的情况,且总是角度最大的弱层最终速度值处于最大位置。斜坡的动力响应与弱层的倾角存在着极大的相关性,角度从始至终是影响斜坡稳定性的重要因素。

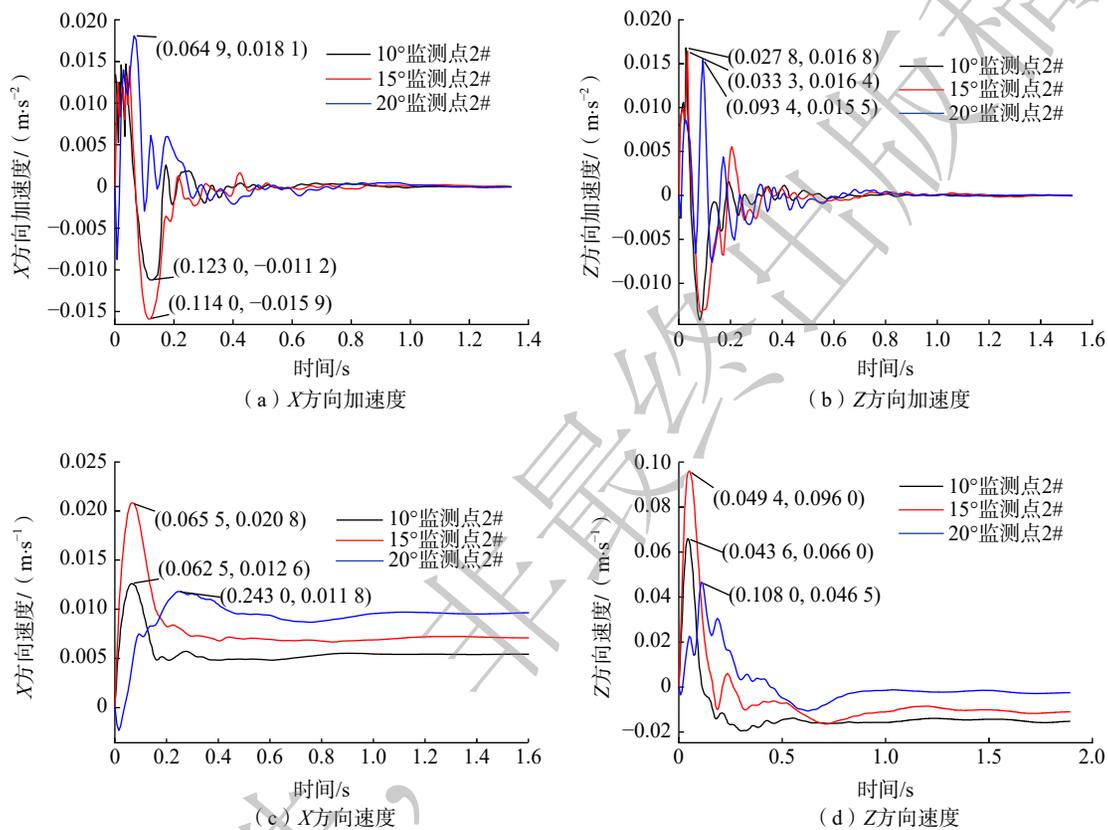


图7 双弱层不同倾角监测点2#的加速度和速度时程曲线

Fig. 7 Time history curves of acceleration and velocity at monitoring point 2# with different dip angles for double weak layer

图8是地震作用下含双弱层不同倾角监测点3#的加速度和速度时程曲线图。图8(a)在0.05 s内,弱层角度越大斜坡水平方向的加速度变化剧烈程度最大,即位于斜坡下部的弱层与斜坡相交部位出现水平向右的突起情况,随着角度的减小水平向左的加速度变化情况越来越大。由图8(c)(d)可知,随着弱层倾角的增大,含双弱层斜坡的速度变化情况越来越小,此结果与张谦等<sup>[23]</sup>对于含弱层斜坡的破坏规律一致,随着倾角增大,弱层与斜坡交界部位越不容易产生滑移。当弱层位置固定时,随着弱层倾角的增大,对斜坡的影响程度降低,斜坡稳定性提高;当弱层倾角一定时,弱层的位置离坡

肩越近,对斜坡的影响程度越大,斜坡稳定性下降;在含弱层的顺向坡中,位于岩层分界面处最容易受到破坏。

#### 4.2 地震作用下不同弱层厚度斜坡响应特征

图9为双弱层不同厚度在地震作用下斜坡响应特征监测点2#的加速度和速度时程曲线,随着厚度的增加,监测点2#在水平方向的加速度幅值剧烈程度逐渐减小。当地震动输入达到0.06 s时,斜坡随着弱层厚度的减小而变得不稳定,监测点2#的部位会出现向斜坡坡内滑移的现象。这与于龙<sup>[24]</sup>对含弱层顺倾岩质斜坡地震响应规律与破坏变形机理的研究得出的结论相似。针对斜坡的内部结构参数来讲,斜坡高度对于斜坡的表

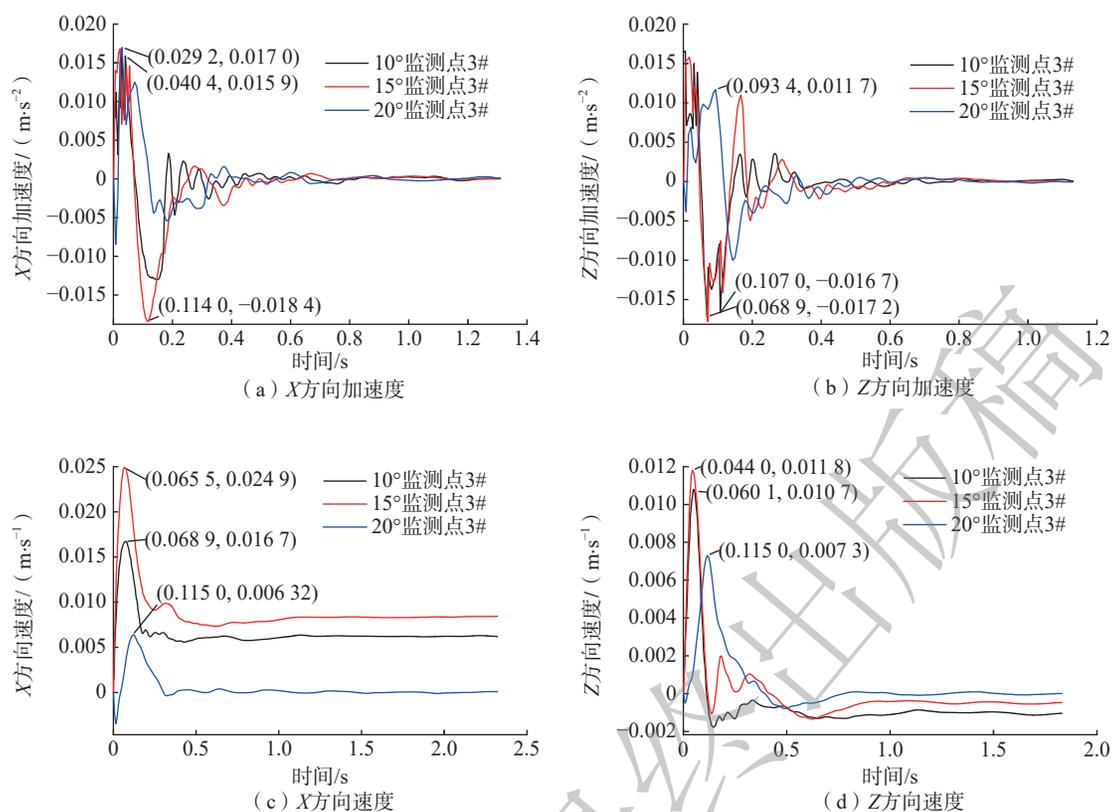


图 8 双弱层不同倾角监测点 3# 的加速度和速度时程曲线

Fig. 8 Time history curves of acceleration and velocity at monitoring point 3# with different dip angles in double weak layer

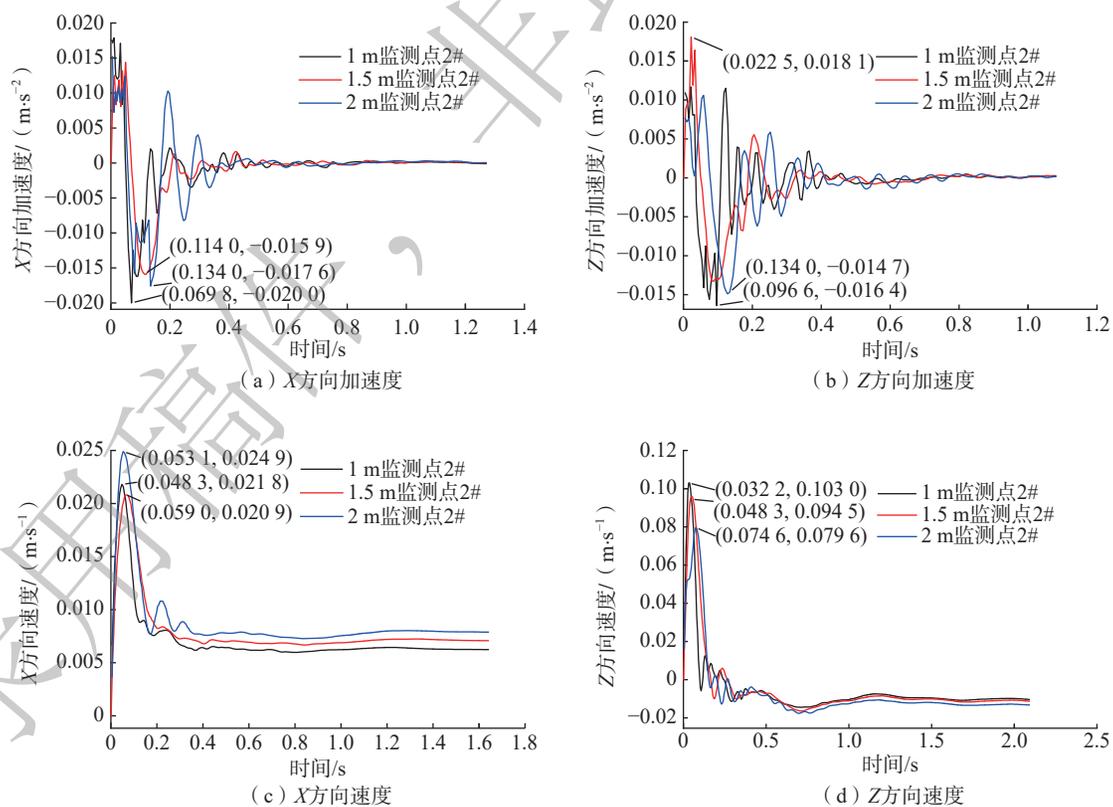


图 9 双弱层不同厚度监测点 2# 的加速度和速度时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of acceleration and velocity at monitoring point 2# with different thicknesses in double weak layer

面加速度放大效应最明显。随着斜坡高度的增加, 斜坡坡面和坡顶的监测点加速度幅值变化均逐渐增大; 随着弱层的位置和厚度从高到低的变化, 坡面上的监测点加速度逐渐增大, 靠近坡肩点的加速度变化最为明显, 并且幅值变化越来越剧烈。对于速度变化的情况而言, 随着弱层的厚度增大, 沿着斜坡坡面水平方向的位移趋势越明显; 而对于垂直方向的速度而言, 弱层厚度越薄垂直向上的运动趋势越明显, 也就是斜坡的响应越迫切。

图 10 是含双弱层不同厚度斜坡监测点 3# 的加速度和速度时程曲线图, 由于高程位置的不同, 监测点 3# 与监测点 2# 存在着明显的区别。由图 10(a)(b) 可得, 厚

度对于斜坡稳定性的影响程度没那么明显。随着双弱层的厚度增大, 水平方向的加速度急剧增加的幅值情况无太大波动, 这与弱层所处的位置有着不可分割的关系。弱层所的位置越高, 地震作用对斜坡的稳定程度影响越大。这与王学伍等<sup>[13]</sup>对含弱层斜坡位置地震响应规律研究相似: 含有弱层的顺向坡监测点加速度放大系数会随着高程的增加而增大, 幅值变化情况更加明显; 处于坡顶位置, 监测点加速度达到最大。弱层厚度越厚水平方向的速度越大, 横向位移趋势也越大, 斜坡就会越来越不稳定, 易产生水平滑移破坏<sup>[25-26]</sup>。

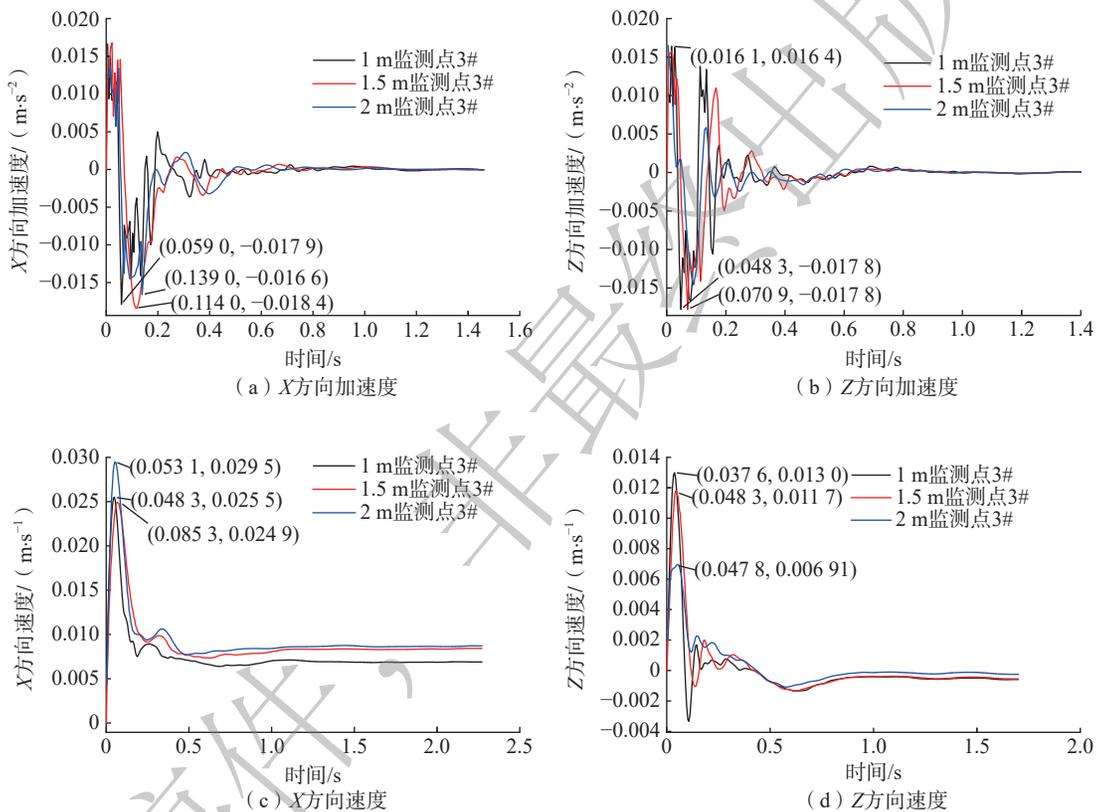


图 10 双弱层不同厚度监测点 3# 的加速度和速度时程曲线

Fig. 10 Time history curves of acceleration and velocity at monitoring point 3# with different thicknesses of double weak layer

综上所述, 弱层的角度和厚度均对斜坡的坡面产生一定影响, 即便是双弱层倾角相同的情况下, 两处监测点的加速度和速度也会不同, 即在地震作用下, 弱层与斜坡相交部位的滑移程度不同。

## 5 结论

(1) 含单一弱层不同倾角和不同厚度 2 种条件下的斜坡动力响应不同, 单一弱层的厚度起到决定性的作用, 在倾角相同的情况下, 弱层的厚度越厚, 对于斜坡坡

面的加速度和速度幅值变化越大。

(2) 地震作用下双弱层倾角对斜坡的响应规律随着弱层倾角的增大而变得不稳定, 地震作用下双弱层厚度对斜坡的响应规律起着主导作用。在含弱层斜坡的灾害与防治中, 应考虑弱层的倾斜角度和厚度等特性, 进行相应的预防。

(3) 随着弱层厚度、弱层位置从斜坡的高位向低位的变化过程中, 斜坡坡面和坡顶面向坡肩监测点逐渐增大, 靠近双弱层斜坡坡肩的监测点加速度变化最显著,

并且加速度幅值变化越来越明显。由于顺向坡内部有弱层的存在,使得弱层上坡面,以及靠近坡肩的坡顶面监测点存在加速度逐渐增大的情况。

### 参考文献(References):

- [1] 王志民, 罗刚, 王媛, 等. 切割斜坡断层的几何形态对斜坡地震响应影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 147-157. [WANG Zhimin, LUO Gang, WANG Yuan, et al. A study of the influence of the crossing-slope fault geometry on the slope seismic response [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 147-157. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 闫孔明, 刘飞成, 朱崇浩, 等. 地震作用下含倾斜软弱夹层斜坡场地的动力响应特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2686-2698. [YAN Kongming, LIU Feicheng, ZHU Chonghao, et al. Dynamic responses of slopes with intercalated soft layers under seismic excitations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2686-2698. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄润秋, 余嘉顺. 软弱夹层的地震动强度效应研究 [J]. 自然科学进展, 2003, 13(11): 1177-1181. [HUANG Runqiu, YU Jiashun. Study on intensity effect of ground motion of weak interlayer [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(11): 1177-1181. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈国兴, 陈继华. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(3): 66-73. [CHEN Guoxing, CHEN Jihua. The effect of depth and thickness of soft soil layer on earthquake response for deep soft sites [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2004, 20(3): 66-73. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘小丽, 周德培. 有软弱夹层岩体边坡的稳定性评价 [J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(4): 382-386. [LIU Xiaoli, ZHOU Depei. Stability evaluation of rock mass slope with weak intercalated layers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(4): 382-386. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 许宝田, 钱七虎, 阎长虹, 等. 多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3959-3964. [XU Baotian, QIAN Qihu, YAN Changhong, et al. Stability and strengthening analyses of slope rock mass containing multi-weak interlayers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 2): 3959-3964. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王浩然, 黄茂松, 刘怡林. 含软弱夹层边坡的三维稳定性极限分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 156-160. [WANG Haoran, HUANG Maosong, LIU Yilin. Three-dimensional stability analysis of slope with weak interlayer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2): 156-160. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘汉香, 许强, 周飞, 等. 含软弱夹层斜坡地震动力响应特性的振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 994-1005. [LIU Hanxiang, XU Qiang, ZHOU Fei, et al. Shaking table test for seismic responses of slopes with a weak interlayer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 994-1005. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘汉香, 许强, 侯红娟. 岩性及岩体结构对斜坡地震加速度响应的影响 [J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2482-2488. [LIU Hanxiang, XU Qiang, HOU Hongjuan. Influence of lithology and rock structure on slope seismic acceleration responses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2482-2488. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 周飞, 许强, 刘汉香, 等. 地震作用下含水平软弱夹层斜坡动力响应特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 133-139. [ZHOU Fei, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. An experimental study of dynamic response characteristics of slope with horizontal weak interlayer under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 133-139. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李慧, 石乃鑫, 杜永峰. 含软弱夹层边坡的地震时程响应分析 [J]. 低温建筑技术, 2010, 32(8): 54-56. [LI Hui, SHI Naixin, DU Yongfeng. Seismic time-history response analysis of rock slope containing soft soil layer [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(8): 54-56. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杨乾, 杨庆华, 姚锦涛. 含软弱夹层场地中埋地管道的地震反应特性研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(4): 520-526. [YANG Qian, YANG Qinghua, YAO Jintao. Seismic response characteristics of the buried pipeline in soil with soft interlayer [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 520-526. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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)]
- [14] 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)]

- abstract) ]
- [ 15 ] 靳鹏,申力,韩晓极,等. 辽宁抚顺西露天矿地质灾害时空分布特征及影响因素分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 68 – 76. [ JIN Peng, SHEN Li, HAN Xiaoji, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of geological disasters in the open-pit mining area of western Fushun, Liaoning Province [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 68 – 76. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] KAWAMURA S, KAWAJIRI S, HIROSE W, et al. Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake [ J ] . *Soils and Foundations*, 2019, 59(6): 2376 – 2395.
- [ 17 ] 王来贵,向丽,赵娜,等. 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 18 – 25. [ WANG Laigui, XIANG Li, ZHAO Na, et al. Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 18 – 25. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D基础与工程实例 [ M ] . 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [ CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and engineering example [ M ] . 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 刘红帅,齐文浩,郑桐. 强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡动力响应与破坏机理 [ M ] . 北京: 地震出版社, 2016. [ LIU Hongshuai, QI Wenhao, ZHENG Tong. Dynamic response and failure mechanism of forward-dip and reverse-dip rock slopes under strong vibration [ M ] . Beijing: Seismological Press, 2016. (in Chinese) ]
- [ 20 ] 董金玉,杨继红,伍法权,等. 顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3861 – 3867. [ DONG Jinyu, YANG Jihong, WU Faquan, et al. Large-scale shaking table test research on acceleration response rules of bedding layered rock slope and its blocking mechanism of river [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3861 – 3867. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 谢丰蔚. 地震动记录选择和调幅方法的研究及评价 [ D ] . 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. [ XIE Fengwei. Study and evaluation on selecting and scaling of ground motions [ D ] . Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 刘立平,杨实君,李英民. 软夹层参数对边坡动力特性的影响分析 [ J ] . 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(5): 31 – 34. [ LIU Liping, YANG Shijun, LI Yingmin. Influence of soft soil layer on dynamic characteristic of the slope [ J ] . Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(5): 31 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 张谦,李贵平. 含弱层顺倾岩质边坡稳定性影响因素分析 [ J ] . 中国安全生产科学技术, 2022, 18(增刊1): 79 – 85. [ ZHANG Qian, LI Guiping. Analysis of the influencing factors on stability of inclined rock slopes containing weak layers [ J ] . Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(Sup 1): 79 – 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] 于龙. 含软弱夹层顺层岩质边坡地震响应与变形破坏机理研究 [ D ] . 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010. [ YU Long. Study on seismic response and deformation failure mechanism of bedding rock slopes within weak interlayer [ D ] . Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] 蔡国军,陈锡锐,孙文鹏,等. 强震作用下斜坡表面放大效应的三维离散元模拟 [ J ] . 地质科技通报, 2022, 41(2): 104 – 112. [ CAI Guojun, CHEN Xirui, SUN Wenpeng, et al. Three-dimensional discrete element simulation of the amplification effect of the slope surface under the action of strong earthquakes [ J ] . Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 104 – 112. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] 赵方彬,王运生,寇瑞斌,等. 四川珙县下软上硬山岭地貌斜坡地震动响应特征 [ J ] . 地质科技通报, 2023, 42(2): 279 – 287. [ ZHAO Fangbin, WANG Yunsheng, KOU Ruibin, et al. Seismic dynamic response characteristics of the lower soft and upper hard mountain slopes in Gongxian, Sichuan [ J ] . Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 279 – 287. (in Chinese with English abstract) ]