

张兴臣,梁庆国,孙文,等.地震作用下黄土边坡动力响应的时频特征分析[J].地震工程学报,2022,44(5):1090-1099.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210406001

ZHANG Xingchen, LIANG Qingguo, SUN Wen, et al. Time-frequency characteristics of dynamic responses of loess slopes under earthquake action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1090-1099. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210406001

地震作用下黄土边坡动力响应的时频特征分析

张兴臣¹, 梁庆国^{1,2}, 孙文¹, 曹小平^{1,2}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 地震作用下黄土边坡的动力响应特征与变形失稳机制是具有重要理论与实践意义的课题,但从动力响应频谱特性方面开展的研究还相对较少。以大型振动台模型试验获得的黄土边坡地震动峰值加速度数据为基础,通过分析其变化规律,着重从频谱特性的角度分析,讨论黄土边坡的动力失稳机制。进一步通过对坡面不同高程测点、边坡内部垂直方向以及水平方向上测点的加速度时程进行绝对加速度反应谱分析,从频谱变化角度提出黄土边坡的动力失稳机制。研究表明,黄土边坡在地震动作用下的响应过程可以分为三个阶段:弹性阶段、塑性阶段与破坏阶段;黄土边坡进入破坏阶段时均会伴随反应谱峰值的增幅或者主周期的变化,在弹性阶段反应谱加速度峰值增幅与输入地震动幅值增幅一致,进入塑性阶段后反应谱峰值增幅比输入地震动幅值增幅小;研究提出将反应谱首峰的凸显情况作为坡体破坏程度的判断依据之一。

关键词: 振动台试验; 黄土边坡; 动力响应; 反应谱; 峰值

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)05-1090-10

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210406001

Time-frequency characteristics of dynamic responses of loess slopes under earthquake action

ZHANG Xingchen¹, LIANG Qingguo^{1,2}, SUN Wen¹, CAO Xiaoping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Research on the dynamic response characteristics and deformation and instability mechanism of loess slopes under earthquake action has important theoretical and practical significance. However, relatively few studies on this topic have been conducted from the perspective of dynamic response spectrum characteristics. The peak ground acceleration data of a loess slope obtained from large-scale shaking table model tests were used in this paper. First, the dynamic instability mechanism of the loess slope was discussed by analyzing its variation law, especially from the perspective of its frequency spectrum characteristics. Then, the analysis of the absolute acceleration response spectrum was performed on the acceleration time histories of measuring points at different elevations of the slope and the points at the vertical

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(51968041, 41562013); 兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”基金项目(2017150)

第一作者简介: 张兴臣(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: 2966239536@qq.com。

通信作者: 梁庆国(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与隧道工程方面的教学与研究工作。E-mail: lqg_39@163.com。

and horizontal directions inside the slope. Finally, the dynamic instability mechanism of the loess slope was proposed from the perspective of frequency spectrum changes. Results show that the response process of loess slope under dynamic seismic action can be divided into three stages: elastic stage, plastic stage, and failure stage. When the loess slope enters the failure stage, it is accompanied by an increase in the peak value of the response spectrum or the change of the dominant period. In the elastic phase, the increase in the peak acceleration of the response spectrum is consistent with that of the input ground motion amplitude; in the plastic stage, the increase in the peak acceleration of the response spectrum is smaller than that of the input ground motion amplitude. This study suggests that the highlight of the first peak of the response spectrum can be used as one of the bases for judging the damage degree of the slope.

Keywords: shaking table test; loess slope; dynamic response; response spectrum; peak value

0 引言

我国黄土地区大多处于地质构造发育、地震活动频繁的区域,历史上强烈地震动作用导致的以滑坡、崩塌等为主的地震地质灾害,曾造成巨大的人员伤亡和经济损失,并对自然环境造成严重破坏。因此,研究黄土边坡在地震动作用下的动力响应特征与破坏机制,并提出相应的防控措施成为岩土科学界的热点问题^[1]。早期,国内外学者^[2-4]主要从动力稳定性的角度研究边坡动力失稳,并取得大量研究成果^[5-8]。

目前,边坡动力响应和稳定性分析主要依靠数值模拟、理论分析、模型试验等方法^[9]。由于岩土的物理力学性质的复杂性,理论推导解决边坡动力问题很难实现,且其准确性很难得到验证^[10-11]。在动力作用下,边坡土体的损伤逐渐积累并导致变形及破坏失稳,而现有的有限元软件很难模拟这一过程^[12]。为了更好地理解边坡在动力作用下的失稳机制,数值模拟结果还需进一步与模型试验的结果和规律进行对比。故利用振动台进行模型试验成为必要的分析手段,诸多学者借助振动台分析边坡动力响应规律已取得了研究成果。如徐光兴等^[13]通过数值模拟和模型试验对比,讨论了地震动力作用下边坡的动力响应规律及地震动参数对边坡动力响应的影响;叶海林等^[14]将振动台试验和数值模拟相结合,得出了位移和加速度响应的突变可以作为边坡动力破坏的判据依据;孙志亮等^[15]借助大型振动台试验研究了不同含水率土边坡的加速度响应特征和位移发展趋势,并得出了不同含水率下边坡的加速度、位移等的响应特征;Brennan 和 Madabhushi^[16]通过离心机振动台试验,定量分析坡顶加速度的放大效应;王猛等^[17]采用大型振动台试验探讨了地震动力作用下隧道洞口段边坡的响应规律,以及

地震动参数对动力响应的影响。在黄土动力响应方面,乔向进^[18]研究了两种坡度的黄土边坡在动力作用下的响应过程,提出边坡失稳经历三个阶段;李福秀等^[9]分析了两种结构的黄土边坡动力响应特征,结果表明动力作用对含裂隙边坡作用更明显;刘富强等^[19-21]基于室内试验探究了不同因素对黄土动力参数的影响,得出黄土动力参数的变化规律;张泽林等^[22]基于边坡的离心机振动台试验和数值模拟分析,研究地震作用下黄土-泥岩边坡动力响应特征。

反应谱是地震动分析中揭示动力响应的重要特征。自反应谱理论提出以来,学者们已经对反应谱特征进行了众多研究。其中以谢礼立等^[23]为主的学者们基于现场实测数据计算了长周期的反应谱,并对其影响因素进行讨论;以徐龙军等^[24]为代表的学者们对地震反应谱进行了大量理论研究。但很少有学者使用反应谱对边坡破坏机制进行研究,本文基于大型振动台模型试验,研究黄土边坡的破坏机制,根据边坡的破坏过程,分析动力模型试验中土体动力响应的反应谱变化规律。着重揭示地震动力作用下边坡的加速度动力响应特征,考虑地震动力作用下黄土边坡的变形失稳过程,为黄土区边坡的安全性评价和抗震设防提供参考。

1 振动台模型试验设计

1.1 模型设计及试验材料

试验过程中采用刚性密封模型箱,根据模型箱的尺寸对原边坡尺寸按 1:20 的比例进行缩小。模型边坡尺寸:边坡底部厚 30 cm、边坡坡度为 30°、坡高 96 cm,采用分层填筑、逐层压实的填筑方法,同时在模型边坡上布置了 25 个加速度监测点,模型及监测点布置示意图如图 1 所示。其中加速度传感器采用 DH1C301 三向电容式加速度传感器,X、Y、Z

向灵敏度分别为 46.3、46.2、46.0 mV/(m·s⁻²)^[25]。

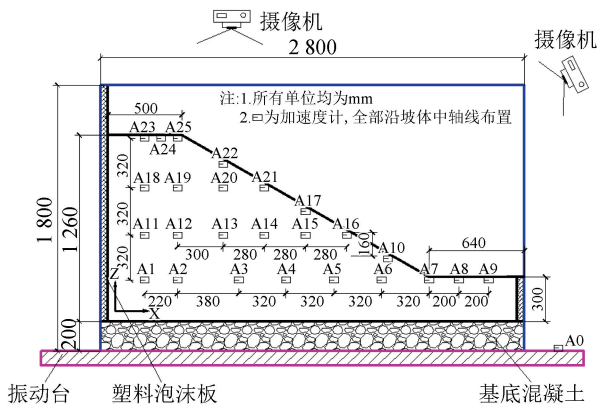


图1 边坡模型示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of model slope (Unit:mm)

为了减小模型箱的边界效应,模型箱内壁安装了聚乙烯闭孔柔性泡沫板,箱体底部铺设了一层直

表2 试验原状土物理参数

Table 2 Physical parameters of undisturbed soil used in the test

试样状态	ω /%	ω_p /%	ω_L /%	I_p	e	S_r	ρ_d /(g·cm ⁻³)
原状	11	16.4	31.96	15.56	0.64	0.97	1.5

为了满足材料相似比的要求,必须对原状黄土掺加其他成分进行配制,本次试验计划掺加重晶石粉和锯末并加水配合搅拌,最终确定以原状黄土:重晶石粉:锯末:水=0.835:0.04:0.015:0.11的配比进行重塑黄土的配制^[17],模型土体的含水率为11.4%。

表3 模型土物理参数

Table 3 Physical parameters of model soil

试样类型	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
原状土	1.5	22.4	29.8
目标模土	1.5	2.3	17.9
实际模土	1.5	39.0	31.4

对原状土和模型土分别进行了动三轴试验,获取到动强度参数,如表4所列。

表4 动强度参数

Table 4 Dynamic strength parameters

状态	振次	动强度参数	
		C_d /kPa	φ_d /(°)
模型土	30	25.14	30.01
原状土	30	15.51	28.46

1.2 地震输入加载方案

本次试验在中国地震局兰州地震研究所 4 m×6 m 大型电伺服式振动台上进行。经统计各地台站监测到的竖向加速度峰值与水平加速度峰值比为 $a_v : a_h = 0.58$ ^[27],相关规范规定竖向设计基本地震

径 3~5 cm 的鹅卵石^[26],并用水泥砂浆进行了黏结,既可达到增加摩擦阻力的效果,还可模拟实际地层的基岩。根据相似理论以及量纲分析法推导,模型的相似比见表1。试验数据显示,测点4和测点7数据异常,故剔除。

表1 相似参数^[18]

Table 1 Similarity parameters^[18]

相似参数	物理量	相似参数
几何尺寸	$C_L=20$	内摩擦角 $C_\varphi=1$
密度	$C_\rho=1$	黏聚力 $C_c=20$
震动加速度	$C_a=1$	弹性模量 $C_E=20$

本次模型试验用土取自兰州某地松散状 Q_3 原状黄土,在现场用环刀取6组原状进行室内试验,以获得现场土的物理力学特性,并为相似材料的配制提供依据。

动峰值加速度均小于水平向,不论是实际监测数据还是设计标准,竖向加速度均小于水平向加速度,因此,在震动台实验的加载工况设计中,竖向加速度小于水平向加速度。输入地震加速度由弱到强,在破坏之前,主要研究模型在地震作用下的响应特征,为了最大限度利用模型,取得更多的试验数据,加载地震波采用汶川汤峪波和 El-centro 波两种波形交替加载,逐渐增强的方式。

地震动幅值从 0.1g 开始逐级施加,直至边坡破坏,共有 18 个加载工况(下文用 GK1~GK18 表示),各加载工况对应的加载波形以及输入地震波幅值情况如表5所列。

如果根据相似性将地震波时间缩放后,试验过程太快,不便于观察破坏的过程,因此本模型试验采用实际地震波时间。其中 El-Centro 波卓越频率为 1.25~2.5 Hz,汶川汤峪坡卓越频率为 1.25~1.35 Hz,两种波加速度时程曲线和频谱图如图2所示。

2 加速度响应分析

2.1 边坡破坏特征

边坡破坏特点与地震输入加载方案密切相关,因此在本文中结合加载方案和试验现象对试验数据进行分析。

在实验过程中,每个工况结束后都观察坡体是否发生变化,表面是否有裂缝产生、裂缝是否贯通以

及裂缝的宽度。试验过程中坡面变化情况如图 3 所示。

表 5 输入地震波信息

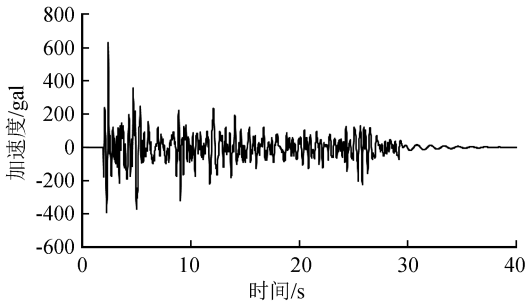
Table 5 Information of input seismic waves

加载工况 (GK)	波形	加载方向	峰值加速度 /gal
1	汶川汤峪波	X	116
2	汶川汤峪波	XZ	116/78
3	El-Centro 波	X	117
4	El-Centro 波	XZ	117/54
5	汶川汤峪波	X	233
6	汶川汤峪波	XZ	233/156
7	El-Centro 波	X	235
8	El-Centro 波	XZ	235/107
9	汶川汤峪波	X	465
10	汶川汤峪波	XZ	465/312
11	El-Centro 波	X	470
12	El-Centro 波	XZ	470/215
13	汶川汤峪波	X	698
14	汶川汤峪波	XZ	698/468
15	El-Centro 波	X	705
16	El-Centro 波	XZ	705/310
17	汶川汤峪波	X	935
18	汶川汤峪波	XZ	1 050/468

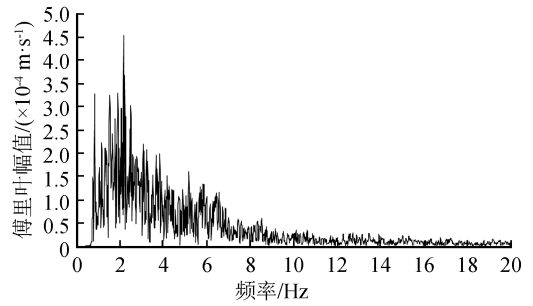
为分析边坡在整个加载过程的变形失稳过程,取三组典型断面内测点进行分析,定义坡面为断面 1,包括测点 10、16、17、21、22、25,坡体内一竖直面为断面 2,包括测点 2、12、19、25,坡体内同一水平面为断面 3,包括测点 18、19、20、21;分别绘制三个断面测点在 18 个工况下的峰值加速度 PGA 及加速度放大系数 AFA 的变化规律图,以探讨边坡的破坏机制。其中柱状图代表各工况下 PGA 随测点的变化规律,折线图代表 AFA 随测点的变化规律,如图 4 所示。

分析 PGA 和 AFA 变化规律知,随着坡面测点高程的增加, PGA 和 AFA 总体呈放大的趋势,在水平向上靠近坡体边缘放大效应较为显著。整体来看,随着输入地震波峰值加速度的逐级施加,三组测点加速度放大系数 AFA 与 PGA 整体呈递增的变化趋势,但在 GK9、GK15 加速度放大系数 AFA 明显变小。

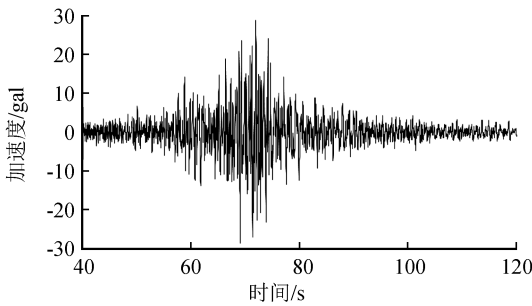
试验过程中,GK1~GK8 坡体未有明显破坏,在 GK9 加载完成后坡顶产生微小裂缝,GK15 施加



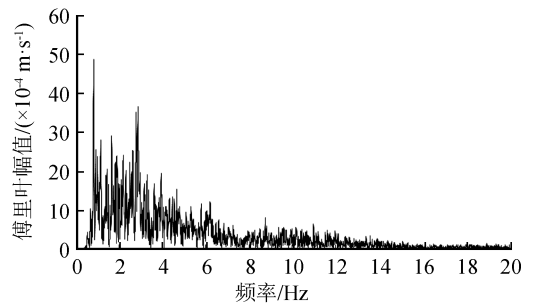
(a) El-Centro波加速度时曲线



(b) El-Centro频谱图



(c) 汶川汤峪波加速度时曲线



(d) 汶川汤峪波傅里叶谱

图 2 加载地震波波特征

Fig.2 Waveform characteristics of seismic waves

结束后边坡上部左右两侧出现长宽裂缝,GK17 加载过程中裂缝进一步产生、扩展,边坡顶部出现大量张拉破坏裂缝,震酥现象明显;将试验现象对应 AFA 的变化分析如下:测点 AFA 发生突变的工况加载结束后,坡面均出现一定程度的破坏,综上,可

将加速度放大系数的突降可以作为边坡破坏程度发生变化的判断依据。

综合试验现象与试验数据分析结果的相关性,将黄土边坡在地震动作用下响应过程分为三个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段、破坏失稳阶段。

在本次试验中 GK1~GK8 为弹性阶段,坡体未出现明显变化;GK9~GK14 为塑性阶段,坡体表面出现

裂缝并进一步扩展;GK15 进入破坏阶段,上部出现长宽裂缝,边坡逐步失稳,发生滑坡破坏。

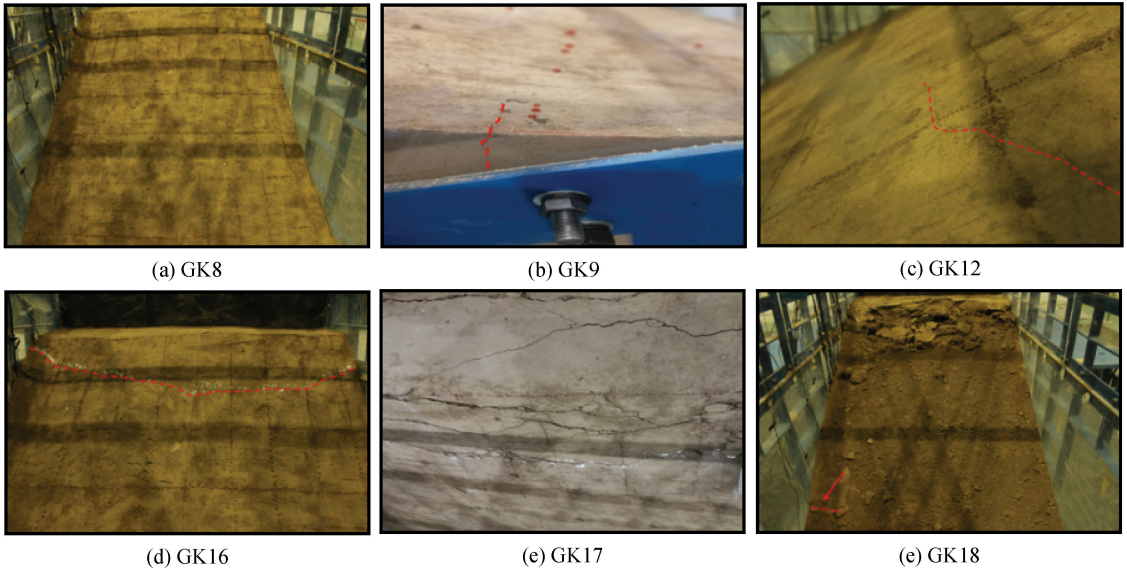


图3 加载过程中边坡破坏情况

Fig.3 Slope failure during loading

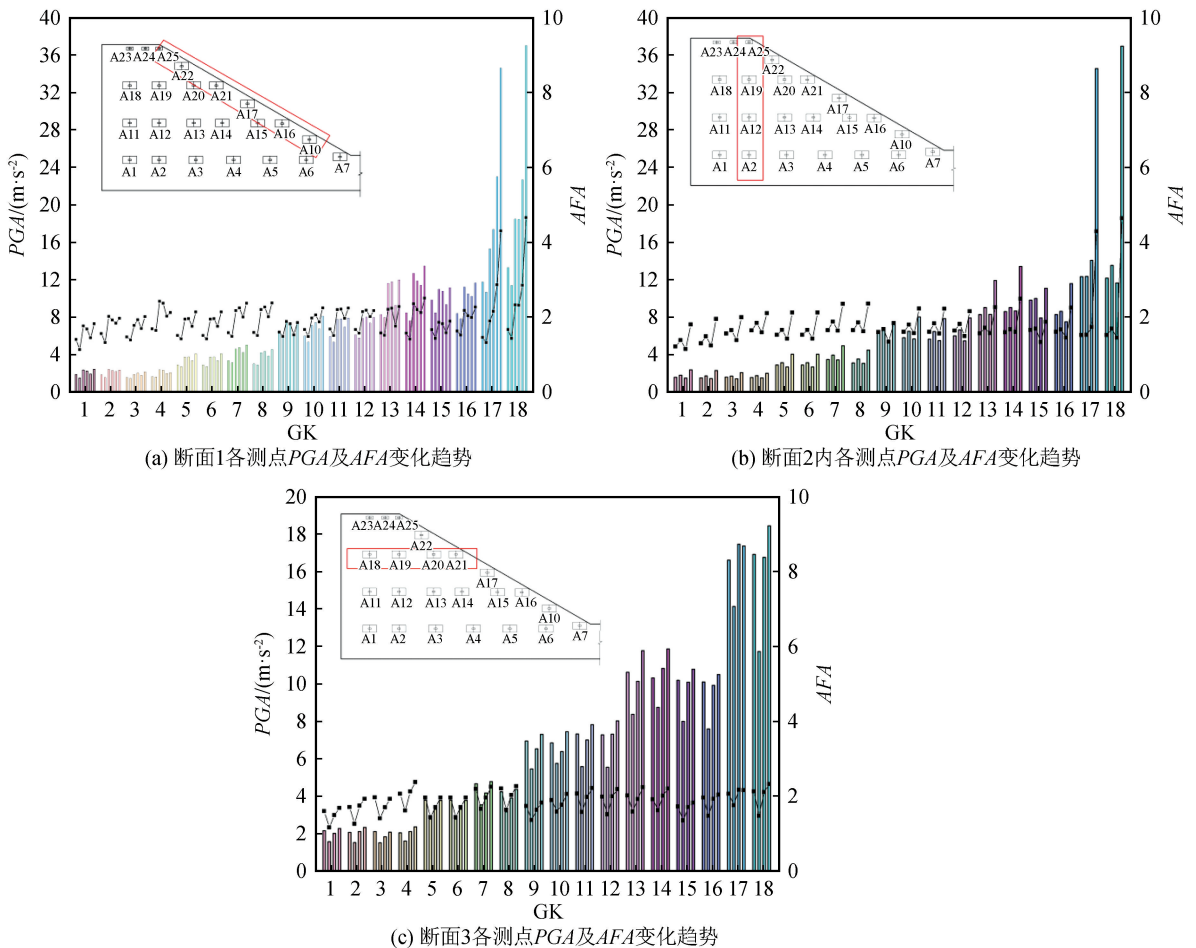


图4 三组测点PGA及AFA随加载工况的变化趋势

Fig.4 Change trend of PGA and AFA of three groups of measuring points under different loading conditions

2.2 不同方向测点加速度响应分析

为了进一步分析放大系数的变化规律及影响因素, 汶川汤峪波选取 X 向幅值为 $116 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ (GK1、GK2) 与 X 向幅值为 $465 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ (GK9、GK10) 等, El-Centro 波选取 X 向幅值为 $117 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ (GK3、GK4) 与 X 向幅值为 $470 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ (GK11、GK12) 等典型工况深入分析, 以探讨边坡坡面、边坡内部垂直方向与水平方向测点的加速度放大系数响应规律。

分析图 5 可知, 在输入地震波幅值较小时, X、Z 双向加载时的加速度放大系数大于 X 单向加载

时的放大系数, 两种地震波作用下, 坡面以及边坡内部两个方向测点均符合该特征, 说明在弱振动工况下, 双向耦合波对边坡的影响较大。在输入地震波幅值较大时, 汶川汤峪波显示 X、Z 双向加载时的加速度放大系数大于 X 单向加载时的放大系数, 而 El-centro 波显示 X、Z 双向加载与 X 单向加载时的差距较小。随试验的进行, 土体震酥现象更加明显, 能量传递效率降低, 说明在此类地震波作用下, 地震动幅值较大时, 双向耦合波对边坡的影响较小。

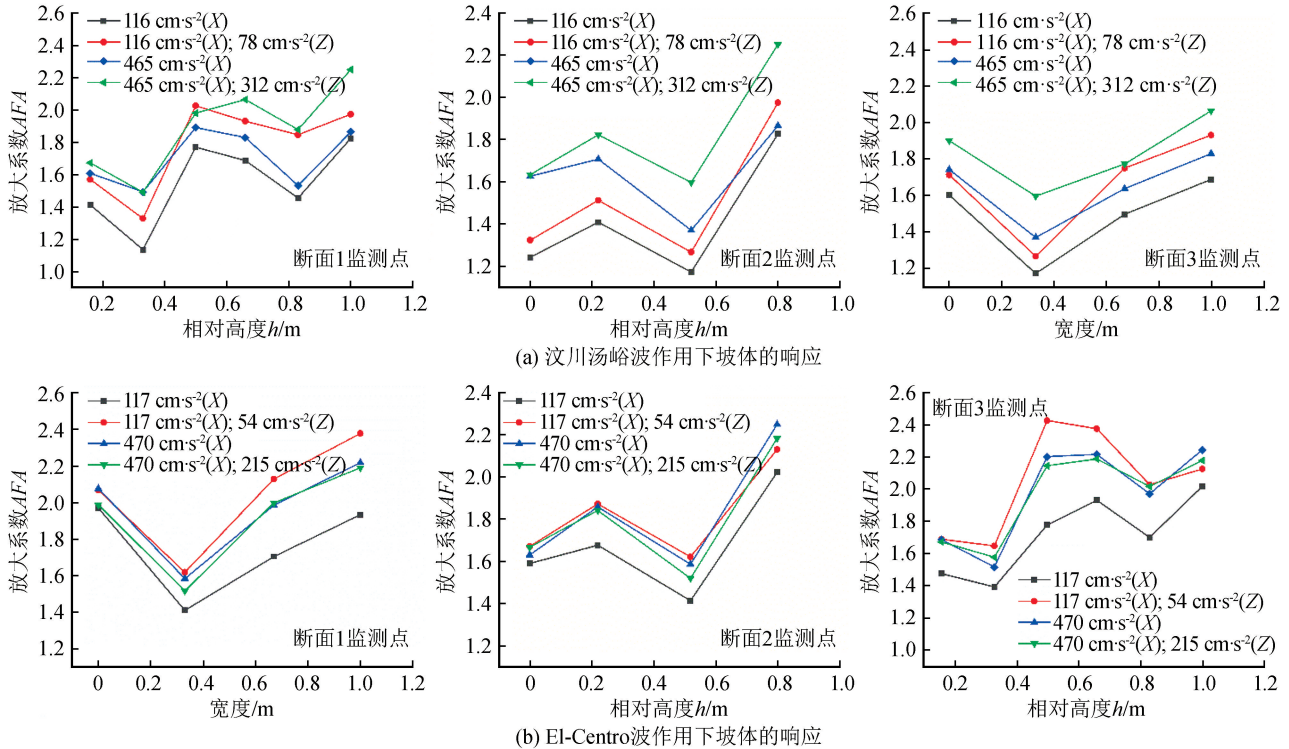


图 5 不同类型波作用下坡体各测点放大系数 AFA

Fig.5 AFA of each measuring point of the slope under different types of waves

图 5 显示 AFA 在高程上表现出非线性, 随高程的增加, AFA 整体呈现递增趋势, “高程放大效应”明显; 在水平面内, 变化规律呈“V”字型, 边缘测点受边界效应与临空面放大效应的影响^[13], 放大系数较大。在坡面上, A16 和 A22 侧点位于分层填筑交界面, 在层与层交界处采用了刮毛处理, 地震波在此处能量耗散较大, 放大效应减小, 在输入地震波幅值较大后(工况 17、18), 边坡的层间效应减小, 整体性增强, A16 测点与 A22 测点的放大效应增强。

3 反应谱分析

数据在采集过程中, 由于土体波动和周围环境

的干扰对数据具有一定的影响。为了消除这些影响, 在试验后期处理阶段使用 SeiscomSignal 软件对所有的加速度数据进行基线校正, 并对校正后的加速度波形进行 0.5~25 Hz 的带通滤波。并对个别波形异常的点, 进行剔除。采用校正后的加速度时程, 计算得到绝对加速度反应谱, 黄土的阻尼比一般在 0.05 左右, 故阻尼比取 0.05^[28]。以下主要从加速度反应谱角度出发, 在不改变谱线基本形状的前提下, 对反应谱进行适当的平滑处理, 以更好地把握变化规律。

3.1 加速度平均谱变化规律

图 6 表示坡体内所有测点在每个工况下的加速度平均谱, 其中图 6(a)表示汶川汤峪波条件下各工

况测点加速度平均谱、图 6(b) 表示 El-Centro 波条件下各工况测点加速度平均谱。以汶川汤峪波为例,在弹性变形阶段,汶川汤峪波作用下反应谱主周期为 0.35 s,主周期未随地震荷载逐级施加而出现

变化;其中当输入地震波幅值分别为 $1.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $2.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,加速度反应谱的峰值为 $3.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $7.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,两者相比可得:反应谱峰值增加幅度和输入的地震波幅值增加幅度的比例相一致。

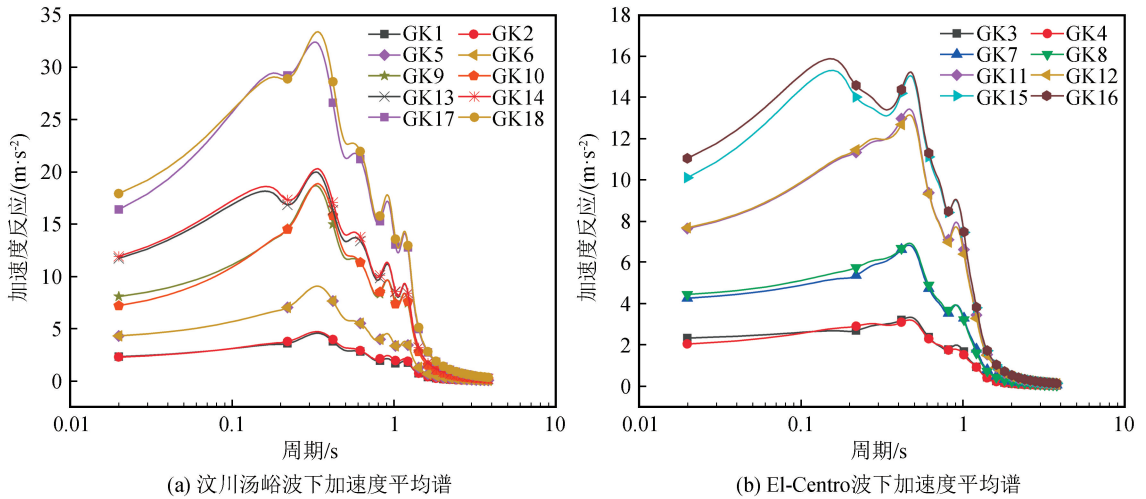


图 6 加速度平均谱

Fig.6 Average acceleration spectrum

在弹性变形阶段向塑性变形阶段过渡时,反应谱峰值增幅 120% 与实际输入的地震波幅值增幅 100% 相比发生突变,主周期未发生变化。进一步分析,在塑性变形阶段,GK9 与 GK13 相比,反应谱峰值增幅与实际输入的幅值增幅相比明显变低;且在塑性阶段的后几个加载工况中,反应谱出现两个明显峰值。根据反应谱是否发生变化可以将塑性阶段划分为两个小阶段,第一阶段,反应谱未发生较大变动,该阶段坡体为内部裂隙发展阶段;在第二阶段,反应谱出现两个明显峰值,该阶段坡体内部裂隙进一步产生、发育,表面出现微小裂缝。

破坏阶段,反应谱主周期较塑性阶段发生改变,且加速度反应谱的峰值增幅相比输入地震动幅值的增幅也发生跃变。

El-Centro 波作用下加速度反应谱随加载工况的变化规律与汶川汤峪波作用下加速度反应谱变化规律相同;但当输入地震动幅值相同时,El-Centro 波作用下反应谱峰值较小,且主周期大。在弹性变形阶段和塑性变形阶段,两种波的 XZ 双向耦合波与 X 单项波的相比,峰值和主周期的变化极小。

3.2 频谱解释

为了进一步研究边坡破坏机制和反应谱变化规律,选取典型工况下典型断面内测点加速度反应谱进行分析。El-Centro 波与汶川汤峪波具有相似的

变化规律,图 7、图 8 主要以水平(X)输入的汶川汤峪波为例,分析反应谱形状发生的变化,其中图 7 表示坡面、竖直面内测点在不同工况下的反应谱,图 8 表示距坡顶 1/3 处水平面内监测点与距坡顶 2/3 处水平面内监测点在不同工况下的反应谱。

由图 7 可以看出,反应谱峰值波动趋势与加速度放大系数的变化规律具有一致性。在小于主周期的周期内,反应谱存在两个明显峰值,且随输入地震波幅值增加,反应谱首峰越来越明显。在同一幅值条件下,中上部测点首峰较为凸显;在不同幅值条件下,中上部测点首峰出现的时间比下部测点首峰出现的时间早。当输入加速度为 698 cm/s^2 时,上部测点首峰对应的周期成为该处测点的主周期,但下部测点主周期改变有一定的滞后性。

由图 8 可知,在离坡顶 1/3 处的水平面内,坡体边缘测点加速度反应谱较大,离坡顶 2/3 处的水平面内,坡体边缘测点加速度反应谱较小,因此,测点加速度反应谱受高程影响大,且边界效应和临空面对反应谱的影响较为显著。越临近坡面,即随宽度增加,反应谱首峰越来越凸显。同一水平面内的不同测点,首峰出现的时间和主周期发生改变的工况具有一致性;不同高程处的平面相比,首峰和主周期的变化规律符合图 7 中所呈现的规律。

结合前面分析可知:

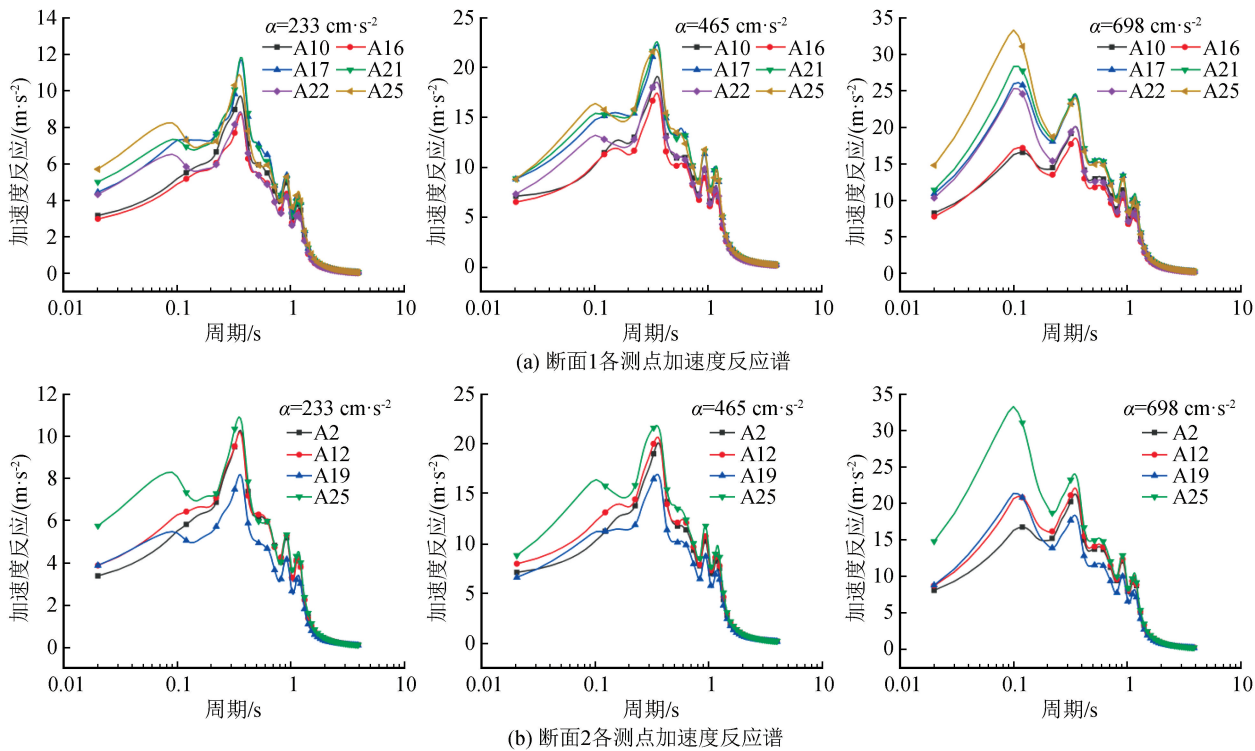


图 7 X 向汶川汤峪波作用下断面 1、断面 2 内各测点加速度反应谱
 Fig.7 Acceleration response spectrum of each measurement point in section 1 and section 2 under the action of X-direction Wenchuan Tangyu wave

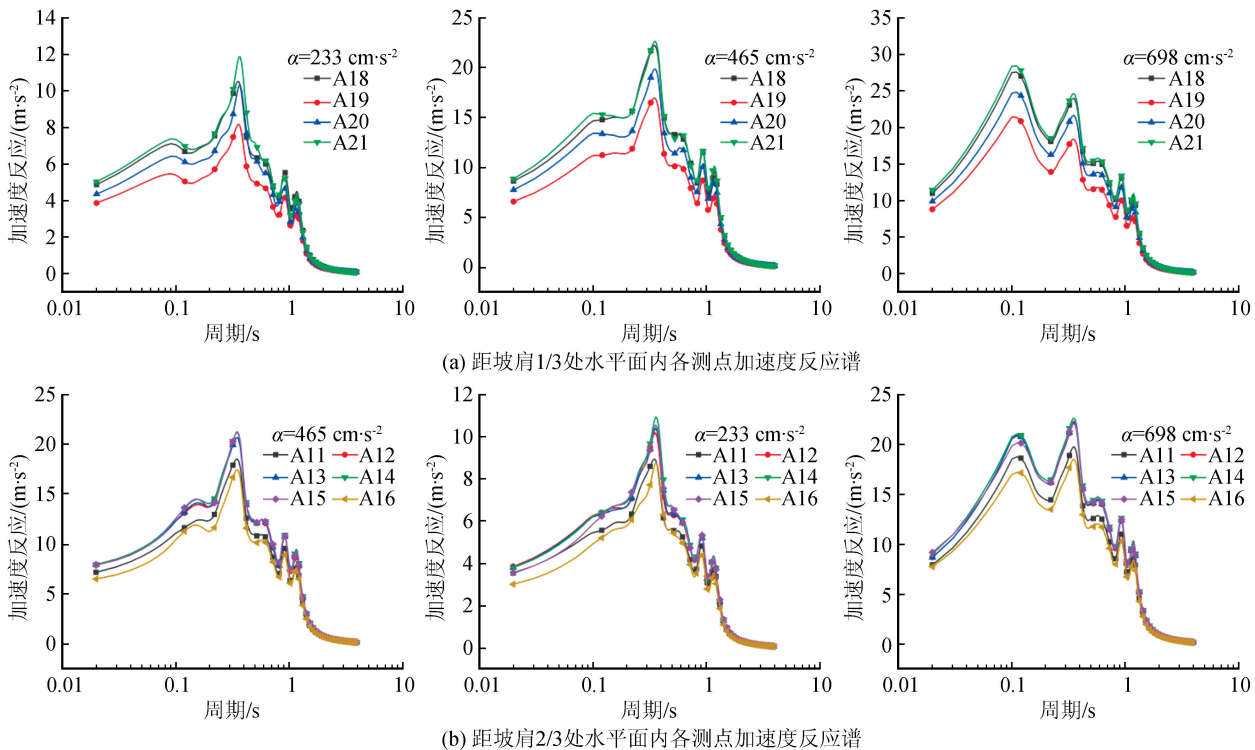


图 8 X 向汶川汤峪波作用下两组水平面内各测点加速度反应谱
 Fig.8 The acceleration response spectrum of each measuring point in the two horizontal planes under the action of X-direction Wenchuan Tangyu wave

(1) 主周期的改变,标志着坡体进入破坏阶段;而且首峰对应的周期恰为主周期发生改变后的主周期,因此首峰的凸显程度(首峰和主峰峰值之差与主峰峰值之比)可以作为边坡破坏程度的判断依据。

(2) 坡体中上部较先进入下一阶段,下部滞后上部 1~2 个加载工况,故使用整体平均谱变化规律可以分析边坡破坏机制,但有一定的局限性。

(3) 越靠近边坡中上部,测点受高程放大效应与临空面放大效应的影响越大,且失稳的可能性越大。

4 结论

本文通过振动台模型试验分析研究了黄土边坡的破坏过程,对试验数据进行处理,计算得到绝对加速度反应谱,根据黄土边坡的破坏阶段分析了反应谱的变化规律。主要结论如下:

(1) 根据 AFA 系数的变化规律将响应过程分为三个阶段:弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段,在各阶段反应谱峰值变化规律具有差异性。在弹性阶段,反应谱峰值与输入地震波幅值增幅比例一致;在塑性阶段,反应谱的峰值增幅小于输入的地震波幅值增幅。

(2) 边坡下部土体相较于中上部土体的动力响应具有滞后性,下部土体较中上部土体从弹性阶段进入塑性阶段滞后 1~2 个加载工况。平均反应谱显示随荷载的逐级施加,反应谱在小于主周期的短周期内均会出现两个峰值,可将首峰的凸显程度的增强作为坡体进入破坏的依据之一。

(3) 在弹性阶段,水平向与垂直向耦合加载对 AFA 的影响大于水平向单向加载;塑性阶段,双向耦合波相比单向波对 AFA 的影响没有弹性阶段显著。但是,在各个阶段双向耦合波下的反应谱与单向波下的反应谱差别较小。

参考文献(References)

[1] 邵帅,邵生俊,李宁,等.地震作用下黄土边坡震陷破坏的动力离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(2):245-253.
SHAO Shuai, SHAO Shengjun, LI Ning, et al. Dynamic centrifugal model tests on seismic subsidence of loess slopes under earthquake action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 245-253.

[2] SEED H B. A method for earthquake resistant design of earth dams[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(1): 13-41.

[3] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Geotechnique, 1965, 15(2): 139-160.

[4] 刘立平,雷尊宇,周富春.地震边坡稳定分析方法综述[J].重庆交通学院学报,2001,20(3):83-88.
LIU Liping, LEI Zunyu, ZHOU Fuchun. The evaluation of seismic slope stability analysis methods[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(3): 83-88.

[5] 张泽林,吴树仁,王涛,等.地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J].岩土力学,2018,39(7):2403-2412,2450.
ZHANG Zelin, WU Shuren, WANG Tao, et al. Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.

[6] KOOPIALIPOOR M, JAHED ARMAGHANI D, HEDAYAT A, et al. Applying various hybrid intelligent systems to evaluate and predict slope stability under static and dynamic conditions[J]. Soft Computing, 2019, 23(14): 5913-5929.

[7] JAHROMI H F, JAFARZADEH F, ZAKARIA M S. Experimental study of burial depth effect on embedded pipe deformations in sandy slopes under dynamic landsliding[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 114: 281-297.

[8] 张江伟,李小军,王小明,等.土质边坡地震稳定性状态判定方法研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2096-2102.
ZHANG Jiangwei, LI Xiaojun, WANG Xiaoming, et al. Method for judging seismic stability state of soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2096-2102.

[9] 李福秀,吴志坚,严武建,等.基于振动台试验的黄土原边斜坡动力响应特性研究[J].岩土力学,2020,41(9):2880-2890.
LI Fuxiu, WU Zhijian, YAN Wujian, et al. Research on dynamic response characteristics of loess tableland slopes based on shaking table test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 2880-2890.

[10] BOUCKOVALAS G D, PAPADIMITRIOU A G. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic groundmotion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7-10): 547-558.

[11] 祁生文.单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度[J].地球物理学报,2006,49(2):518-523.
QI Shengwen. Two patterns of dynamic responses of single-free-surface slopes and their threshold height[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 518-523.

[12] 蒋明镜.现代土力学研究的新视野:宏微观土力学[J].岩土工程学报,2019,41(2):195-254.
JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195-254.

[13] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等.边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):918-923.
XU Guangxing, YAO Lingkan, LI Zhaohong, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918-923.

[14] 叶海林,郑颖人,杜修力,等.边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析[J].土木工程学报,2012,45(9):128-135.

- YE Hailin, ZHENG Yingren, DU Xiuli, et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 128-135.
- [15] 孙志亮, 孔令伟, 郭爱国. 不同含水状态堆积体边坡地震响应特性大型振动台模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2433-2441, 2460.
- SUN Zhiliang, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Large-scale shaking table tests on seismic behavior of deposit slopes with varying moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2433-2441, 2460.
- [16] BRENNAN A J, MADABHUSHI S P G. Amplification of seismic accelerations at slope crests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(5): 585-594.
- [17] 王猛, 梁庆国, 王丽丽, 等. 黄土隧道边仰坡动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 141-150.
- WANG Meng, LIANG Qingguo, WANG Lili, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic response of loess tunnel side slope[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(2): 141-150.
- [18] 乔向进. 黄土边坡动力响应及失稳机制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- QIAO Xiangjin. Study on dynamic response and failure mechanism of loess slopes[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020.
- [19] 刘富强, 钟秀梅, 刘钊钊, 等. 基于细观结构的原状黄土动弹性模量和阻尼比试验研究[J]. 地震研究, 2021, 44(1): 105-112.
- LIU Fuqiang, ZHONG Xiumei, LIU Zhaozhao, et al. Experimental study on dynamic elastic modulus and damping ratio of undisturbed loess based on microstructure[J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(1): 105-112.
- [20] 袁浩. 真三轴固结条件下黄土动力特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- YUAN Hao. Experimental study on dynamic characteristics of loess under true triaxial consolidation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [21] 文少杰, 张吾渝, 王鹏. 重复循环荷载作用下原状黄土动力特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1659-1665.
- WEN Shaojie, ZHANG Wuyu, WANG Peng. Experimental study on dynamic characteristics of intact loess under repeated cyclic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1659-1665.
- [22] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.
- ZHANG Zelin, WU Shuren, WANG Tao, et al. Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.
- [23] 谢礼立, 周雍年, 胡成祥, 等. 地震动反应谱的长周期特性[J]. 地震工程与工程振动, 1990(01): 1-20.
- XIE Lili, ZHOU Yongnian, HU Chengxiang, et al. Long period characteristics of ground motion response spectrum[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990(01): 1-20.
- [24] 徐龙军, 谢礼立, 郝敏. 简谐波地震动反应谱研究[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 7-13.
- XU Longjun, XIE Lili, HAO Min. On the response spectra to harmonic ground motion[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 7-13.
- [25] 贺谱. 黄土隧道洞口段静力和地震动力响应特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- HE Pu. Study on the characteristics of static and seismic dynamic responses at the entrance section of loess tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019.
- [26] 边磊, 梁庆国, 张钦鹏. 黄土隧道边仰坡及洞口段地震动响应试验研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 79-84.
- BIAN Lei, LIANG Qingguo, ZHANG Qinpeng. Experimental study on seismic responses of slope and portal of loess tunnel[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(3): 79-84.
- [27] 韩建平, 周伟. 汶川地震竖向地震动特征初步分析[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 211-219.
- HAN Jianping, ZHOU Wei. Preliminary investigation on characteristics of vertical ground motion during Wenchuan earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 211-219.
- [28] 石树中, 沈建文, 楼梦麟. 基岩场地强地面运动加速度反应谱统计特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(11): 1300-1304.
- SHI Shuzhong, SHEN Jianwen, LOU Menglin. Statistic features of response spectra of acceleration strong ground motion at rock sites[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(11): 1300-1304.