

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201911064

# 基于动土压力响应特性的黄土滑坡振动台 试验研究\*

万金侠<sup>1</sup>, 施艳秋<sup>1,2</sup>, 陈小云<sup>3</sup>

(1. 吉林铁道职业技术学院铁道工程学院, 吉林 吉林 132200;

2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 为了探讨地震作用下动土压力沿高程和滑面的响应规律, 通过大型振动台实验输入X向和Z向地震波, 输入幅值逐级增大直到边坡破坏, 对沿滑面和沿高程的5个土压力传感器的动土压力峰值分布规律进行分析, 并利用基于小波变换的能量提取工具对加载X向和Z向的EL波进行分解, 分析其不同频带的动力响应特性, 并进行了加速度峰值分析与动土压力峰值的组合响应分析。研究表明: ①土压力沿高程和滑面都呈现非线性增加的趋势, 加载X向地震波对滑面土体应力影响较为显著, 而加载Z向地震波对坡顶面附近土体应力影响较为显著, 且加载Z向地震波土压力沿高程放大趋势比加载X向地震波更明显; ②输入加速度峰值0.6g时, 滑体开始向下滑动, 贯通破裂面的产生和动土压力峰值以及加速度峰值同时突变可作为边坡破坏的依据; ③使用基于小波变换的能量提取工具对各频段的能量进行提取, 发现第一频段的能量占比在95%以上, 说明第一频段内土体响应最为剧烈, 黄土边坡对地震波运动过程中高频部分具有“滤波作用”, 因此进行防护设计时应把这一现象作为设计的考虑因素之一。

**关键词:** 地震动土压力; 振动台; 滑面; 高程; 小波变换; 能量提取

**中图分类号:** V221.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0586-08

## Shaking Table Experiment of Loess Landslide based on Dynamic Earth Pressure Response Characteristics

WAN Jinxia<sup>1</sup>, SHI Yanqiu<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaoyun<sup>3</sup>

(1. College of Railway Engineering, Jilin Railway Technology College, Jilin 132200, China;

2. China Railway Northwest Research Institute Limited Company, Lanzhou 730000, China;

3. China Building Northwest Design and Research Institute Limited Company, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In order to study the response characteristics of dynamic soil pressure along elevation and the sliding surface under earthquake action, the X-direction and Z-direction seismic waves are input into large-scale shaking table test. The input degree increases gradually until the slope failure. Then analysis the maximum value characteristic about the dynamic soil pressure of five soil pressure sensors along the sliding surface and elevation, and the EL waves loaded in X direction and Z direction are decomposed by using the energy extraction tool based on wavelet transforming. Then analysis the dynam-

\* 收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-02-08

基金项目: 铁道部科技研究开发计划课题(2011G012-A)、吉林省职业技术教育学会年度科研重点课题(2018XHZ012) 资助

作者简介: 万金侠(1981—), 女, 硕士。主要从事路基病害教学与研究。E-mail: 1907899607@qq.com

ic response characteristics in different frequency bands. Then analysis combination response characteristics about the peak value of acceleration and dynamic soil pressure. The results show that: ① The soil pressure increases non-linearly along the elevation and the sliding surface. The stress of soil near the sliding surface is influenced obviously by waves which loading in  $X$  direction, then the stress of the soil near the top surface is influenced obviously by waves which loading in  $Z$  direction. Furthermore, when loading  $Z$  direction waves the amplification trend of soil pressure along elevation is more obvious than loading  $X$  direction waves. ② When the acceleration peak value is 0.6 g, the soil begins to slide downward. The occurrence of the continuous fracture surface, the sudden change of the dynamic soil pressure peak value and the acceleration peak value at the same time can be regard as the evidence about the failure of slope. ③ Extracting the energy of each frequency band is based on the energy extraction tool based on wavelet transforming. To indicate that the energy ratio of the first frequency band is over 95%, which show that the soil response is the most intense in the first frequency band, the Loess Slope has the function of filtering the high frequency part of the seismic waves. So this phenomenon should be considered as one of the factors in the protection design.

**Keywords:** dynamic earth pressure; shaking table; sliding surface; elevation; wavelet transform; energy extraction

## 引言

振动台模型试验是岩石力学研究领域的重要手段,尤其是在理论尚不完备、非连续数值模拟技术尚未成熟的情况下,振动台模型试验在结构物的动力特性、设备抗震性能等研究中占据重要地位<sup>[1-3]</sup>,能形象、直观地模拟工程结构物受力、变形及破坏全过程,可以比较真实地模拟复杂地质构造<sup>[4-5]</sup>,揭示不同因素对工程灾变演化过程的影响,为建立新的理论和数学模型提供依据,为灾害防控工程提供技术支持<sup>[6-7]</sup>。

众多学者对静力条件下边坡的破坏特征做了大量研究,其研究成果在静力边坡稳定性分析中得到广泛应用<sup>[8-9]</sup>。关于边坡在地震作用下的破坏研究众多学者进行了相关分析,J.J. Bommer等<sup>[10-12]</sup>通过对大量地震滑坡的统计分析,分别在震陷类型、滑面位置、位移滑速等方面对地震诱发滑坡类型进行了梳理和分类。杨超等<sup>[13]</sup>进行了软土地铁车站结构的振动台试验,以研究土体和结模模型的加速度响应、结构模型表面的动土压力以及结构构件的应变规律,并且还利用数值方法与振动台试验进行比较。许强等<sup>[14]</sup>利用振动台物理模拟试验手段,系统研究了强震作用下地震力作用方向、坡体结构、坡体形态特征等因素对边坡变形破坏的影响规律,认为地震过程中所产生的强大惯性力是导致边坡

变形破坏的主要原因。郑颖人等<sup>[15]</sup>通过采用动力有限差分程序FLAC3D计算得到地震动峰值时刻的动应力,将其施加到静力情况下,然后采用极限平衡法进行静力计算,提出边坡地震安全系数计算的新方法,即修正的时程分析法。

通过上述众多学者研究发现,目前对于边坡振动台试验研究比较深入,但是对于地震作用下动土压力沿高程和滑面的变化规律,以及针对各频段能量分布的研究较少,因此通过开展本次模型试验,探讨动土压力的分布规律,并利用基于小波变换的能量提取工具进行能量分析得到黄土边坡变形破坏机理,同时进一步揭示边坡失稳演化的发展过程。

## 1 振动台实验设计

本次模型试验原型边坡位于富县县城以南的洛阳村和段家庄村附近,为陕北延能化西厂区北连接线NK1+900~NK2+050段右侧路堑边坡,模拟坡高36 m的黄土滑坡。试验应用兰州地震局黄土地震工程实验室的振动台,尺寸为4 m×6 m。最大位移: $X$ 向为250 mm, $Z$ 向为100 mm;工作频率为0.5~50.0 Hz,使用振动台为VPS-600ES-2型垂直水平双向加载,试验准备主要包括相似设计,相似材料制作,模型填筑,传感器布设,加载方案设计。

### 1.1 模型设计

模型边坡示意如图1所示,振动台模型箱尺寸为2900 mm×1400 mm×1800 mm;根据模型箱尺寸确定相似比为1:20,模拟高度为36 m的边坡。图1所示分为左右两幅形成边坡开挖与未开挖在地震作用下不同响应的对比,模型箱右侧进行坡脚开挖,选取开挖段作为研究对象。模型与原型动力相似关系依据滑坡模型试验重力相似定律<sup>[16]</sup>及量纲分析法推导,几何相似比1:20,重力加速度1:1,密度1:1,其他参数相似比采用量纲分析法由基本量推导(表1)。

动土压力传感器与加速度传感器具体布置位置如图2所示。

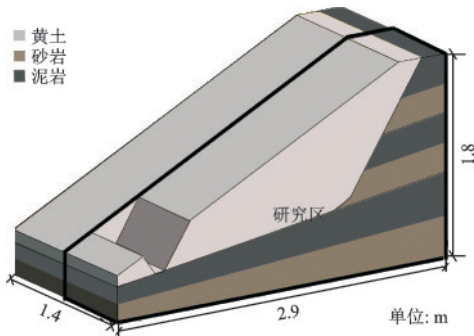


图1 振动台模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the shaking table model

表1 振动台试验相似关系

Table 1 Similarity relations in the shaking table tests

物理量	相似常数	物理量	相似常数
长度	20	加速度	1
密度	1	弹性模量	20
内聚力	20	应力	20
内摩擦角	1	应变	1

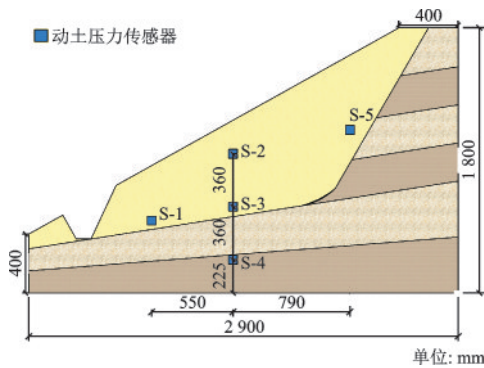


图2 振动台模型传感器布置

Fig.2 Sensor layout of the shaking table model

试验在模型箱水平振动方向两侧内壁加一层高强度50 mm厚的聚苯乙烯塑料泡沫板,为消除箱侧壁的摩擦约束,试验箱两侧均匀涂抹凡士林并粘贴一层塑料薄膜,在箱底铺设2 cm厚的粗砂材料,将其处理成摩擦边界,限制减小箱底和土体的相对位移。

(1) 内聚力相似常数:

$$C_c = \frac{c_p}{c_m} = C_\rho \cdot C_L = 20 \quad (1)$$

式中,  $C$  为相似比例常数;  $p$  代表原型;  $m$  代表模型。

(2) 应力相似常数:

$$C_\sigma = \frac{E_p}{E_m} = C_\rho \cdot C_L = 20 \quad (2)$$

(3) 弹性模量相似常数:

$$C_E = \frac{E_p}{E_m} = 20 \quad (3)$$

### 1.2 相似材料选区

材料相似表示原型和模型材料相应的质点或密度具有一定的比例关系。

$$C_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} \quad (4)$$

$$C_M = \frac{M_p}{M_m} = C_\rho \cdot C_L^3 \quad (5)$$

选择黄黏土模拟黄土边坡,其他材料参数见表2,填筑完成的试验模型如图3所示。

表2 边坡材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the slope materials

	剪切模量/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa	密度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
黄土	17	0.014	25	45	19.10
泥岩	400	0.7	35	100	24.18
砂岩	125	0.924	40	300	25.30

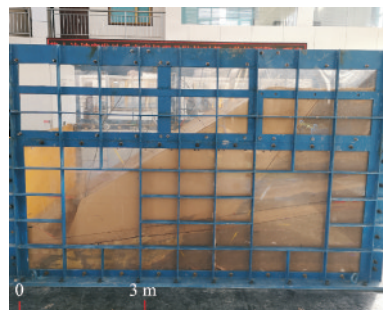


图3 填筑完成后的黄土边坡模型

Fig.3 Loess slope model after completion of filling

### 1.3 地震输入和加载方案

本文研究边坡在地震作用下的破坏特性,输入水平和垂直两个方向的地震波,采用EL-Centro波进行逐级加载,因其与我国抗震规范的设计反应谱吻合较好。为了更加明显地突出边坡在地震波作用下的动态响应,现选取EL-Centro波中卓越频段进行加载,加载时间为8.94 s,地震波加速度时程曲线如图4所示,加速度频谱曲线如图5所示,试验前输入白噪声测试模型初始动力特性,其加载制度见表3。

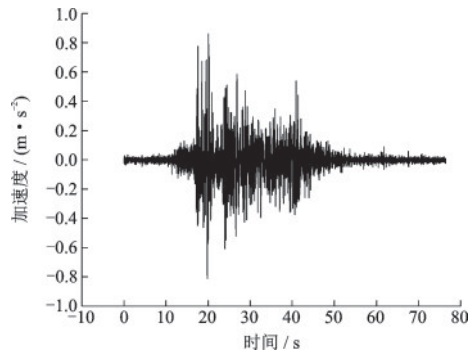


图4 EL-Centro波加速度时域曲线

Fig.4 Acceleration time-history curve of EL-Centro wave

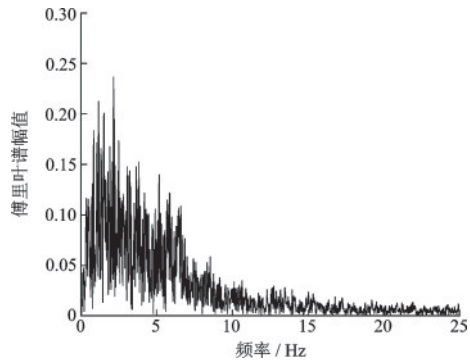


图5 EL-Centro波加速度频谱曲线

Fig.5 Acceleration spectrum curve of EL-Centro wave

表3 试验加载制度

Table 3 Loading scheme in the tests

工况	地震波	台面峰值加速度/g	加载方向
1	EL-Centro波	0.1	X
2	EL-Centro波	0.1	Z
3	EL-Centro波	0.2	X
4	EL-Centro波	0.2	Z
5	EL-Centro波	0.4	X
6	EL-Centro波	0.4	Z
7	EL-Centro波	0.6	X
8	EL-Centro波	0.6	Z
9	EL-Centro波	0.8	X
10	EL-Centro波	0.8	Z

## 2 试验现象分析

通过模型试验现场观测、录像分析,发现施加地震波峰值至0.05g时,边坡坡脚、坡面和坡顶均无明显反应,当加载到X向0.1g时坡顶出现明显的横向裂缝(图6),深度较浅无法探测深度,裂缝刚刚开始发展,此时没有向下产生剪切裂缝,坡脚产生一条细微的裂缝最大宽度为20 mm。



图6 加载0.1g X向坡顶裂缝发育

Fig.6 Crack development at the slope crest when the load is 0.1g in the X direction

当加载到0.4g时坡顶横向裂缝向两端扩展并贯通坡体,裂缝最大宽度为112 mm,裂缝深度达到20 mm,裂缝发展到整个坡体并开始向下产生剪切裂缝,坡脚处的裂缝进一步扩大,最大宽度达47 mm,分析原因,加载能量更大的地震波后,坡体向坡前临空方向滑移趋势加重,应力集中于坡脚,与结构面滑移产生剪切裂缝,致使已有裂缝进一步扩大。

逐级加载后裂缝变化如图7、8所示,当加载到0.6g时坡顶横向裂缝水平全贯通坡体,裂缝最大宽度为149 mm,此时坡体已经产生错台现象,裂缝贯通整个坡体开始向下产生剪切裂缝,同时在巨大的加速度作用下开挖侧模型坡肩位置处出现了土体坍塌现象,坡脚处的裂缝进一



图7 加载0.6g X向边坡侧面裂缝

Fig.7 Crack development at the slope side when the load is 0.6g in the X direction



图8 加载0.6g Z向坡脚裂缝发育

Fig.8 Crack development at the slope toe when the load is 0.6g in the Z direction

步扩大最大宽度达67 mm,加载能量更大的地震波后,坡体向坡前临空方向滑移趋势逐步加重,土岩接触面部位土体已发生累进剪切破坏,上部拉裂缝和下部剪切裂缝已经形成贯通的破裂面。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 沿高程动土压力分析

工况1~10分别加载X向和Z向的0.1g、0.2g、0.4g、0.6g、0.8g EL地震波,并绘制不同工况下沿高程动土压力峰值分布图,如图9所示。

随着各工况X向加载地震波过程中,土压力沿高程呈现出在滑面附近有减小的趋势,当加载到

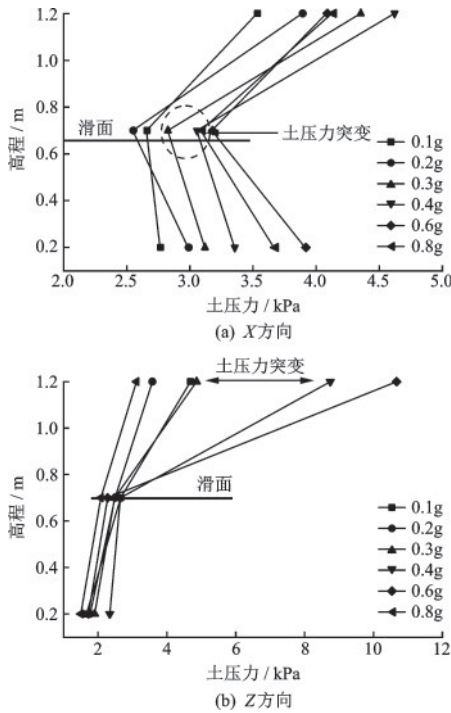


图9 土压力随高程变化

Fig.9 Changes of soil pressure with elevation

0.6g时土压力在滑面位置出现突变,变形进入累进性破坏阶段,结合现场观测、录像分析,发现施加地震波峰值0.6g时,边坡坡脚、坡面和坡顶均出现贯通裂缝边坡已经破坏,加载X向地震波对滑面土体应力影响较为显著。土压力在滑面附近减小的原因,随着输入荷载逐渐增大滑体沿滑带出现滑移现象,致使土岩交界面的土体松散引起应力重分布,也存在滑面与设计滑移面不重合,在交接部位土体内部拉剪裂缝增加、阻尼增大、动土压力响应降低,表明坡体滑面附近动土压力发生突变也是边坡动力破坏特征之一。

随着各工况Z向加载地震波过程中,土压力沿高程呈放大的趋势,同样在滑面附近出现土压力异常,当加载到0.6g时土压力在靠近滑面位置出现突变,当加载Z向0.8g时,土压力迅速减小,综合分析原因加载0.6g工况后滑体已经严重破坏,土体十分松散,动土压力响应降低。

#### 3.2 沿滑面动土压力分析

加载X向地震波土压力沿滑面变化如图10(a)所示,呈现逐渐放大的趋势。S-1与S-3土压力测点在加载到0.6g时滑面位置出现突变,沿滑面土压力的分析结果与沿高程的分析结果吻合。

S-1—S-3直线斜率大于S-3—S-5直线斜率,说明加载过程中滑坡前部围岩一直保持挤密状态,而后部S-5测点更容易因扰动干扰,土体松散造成土压力值变化。坡角处S-1测点土压力峰值变化较小,加载0.4g之前,土压力一直维持在0.2 kPa左右,围岩相对稳定。阻滑段处的抗滑力大于地震惯性力引起的下滑力,加载0.6g后土压力增大,涨到0.4 kPa,阻滑段处的抗滑力不再继续增加。

S-3测点土压力峰值对比S-1有明显增大,且从加载0.1g开始,加载高能量地震波,土压力的响应越强,直到加载到0.6g时达到土压力峰值。加载0.8g时土压力峰值出现回落,结合现场观测,加载0.6g时,边坡已经破坏。沿滑面土压力的分析结果与沿高程的分析结果趋势吻合,从数据处理结果明显看出加载X向地震波对滑面土体应力影响较为显著。

随着各工况Z向加载幅值逐级增大,土压力沿高程呈明显放大的趋势如图10(b)所示,在S-5测点出现土压力突变,而S-1与S-3测点土压力没有发生突变,当加载到0.6g时土压力最大数值达到

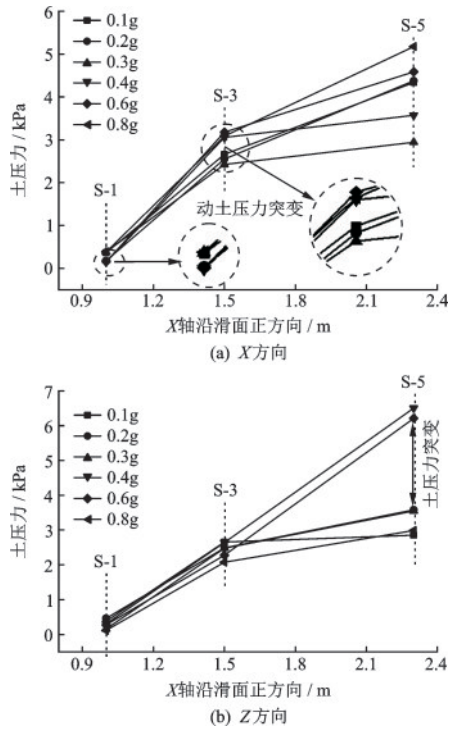


图10 土压力沿滑面变化

Fig.10 Changes of soil pressure along sliding surface

6.5 kPa,而加载X向土大力最大为5.1 kPa,表明加载Z向地震波土压力沿高程放大趋势比加载X向更明显。

### 3.3 加速度与动土压力响应分析

为方便研究加速度沿高程和滑面的响应规律,用PGA放大倍数(各个测点所测的加速度峰值与台面加速度峰值的比值)进行量化分析,并对X向和Z向加载的10组工况进行峰值提取,并作出沿高程和滑面测点的PGA放大系数对比图,如图11、12所示。

加载X向沿高程测点的加速度响应均随高程呈现在滑面位置削弱后于坡顶增强的趋势,趋于坡顶时最强烈,具有明显的高程放大效应。滑面处PGA放大系数最小,坡顶最大,以加载X向0.6g为例,此时PGA放大系数在滑面处和坡顶处均出现突变,坡顶约为滑面的1.5倍,所得数据结论与土压力数据吻合,整个滑动过程中PGA系数始终保持“正三角形”分布。加载0.8g时PGA系数在滑面和坡顶均有削弱,结合试验现象和录像分析发现坡体在加载0.6g和0.8g工况时已经破坏,加载0.1g时土体比较松散,因此出现削弱现象。加载Z向沿高程测点的加速度响应与加载X向变化趋势一致,且加载Z向

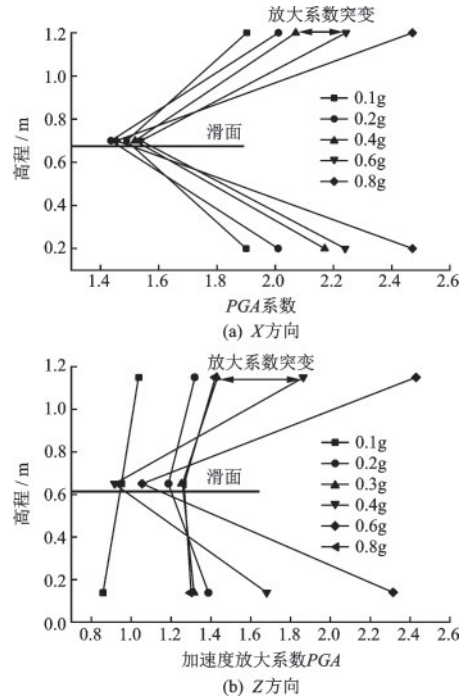


图11 加速度放大系数沿高程变化

Fig.11 Amplification factor along elevation

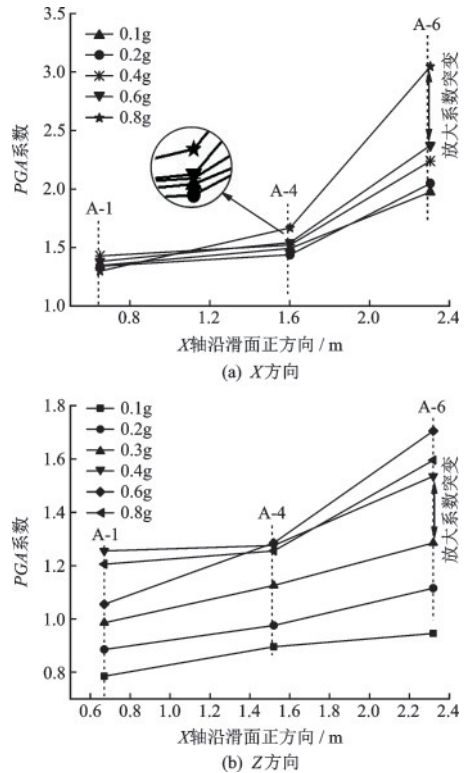


图12 加速度放大系数沿滑面变化

Fig.12 Acceleration amplification factor along sliding surface

坡顶位置加速度突变更为明显。

加载X向和Z向滑面测点的加速度响应均随高程增大而增强,趋于坡顶A-6测点时最强烈,具有明

显的沿滑面放大效应。其中以加载0.6g工况为例,加载0.6g工况时测点均相对前一工况发生突变,加载X向A-6测点PGA加速度放大系数是A-1的2倍,是A-4的1.8倍,加载Z向A-6测点PGA加速度放大系数是A-1的1.5倍,是A-4的1.3倍。对比加载X向和Z向PGA放大系数可以看出,在坡体破坏后加载X向的PGA放大系数明显大于加载Z向。

### 3.4 能量占比分析

选取S-5测点加载0.2g,0.6g,0.8g,X,Z两个方向进行能量占比分析,选取沿高程S-2,S-3,S-4加载0.2g,0.6g,0.8g,X,Z两个方向进行能量占比分析,选取沿滑面S-1,S-3,S-5加载0.2g,0.6g,0.8g,X,Z两个方向进行能量占比分析,得出如下数据(表4)。

表4 各工况能量占比  
Table 4 Proportion of energy for each working condition

加载工况	能量占比	频带划分							
		第一频带	第二频带	第三频带	第四频带	第五频带	第六频带	第七频带	第八频带
加载X向工况S-5能量占比	S-5加载0.2g	98.61	1.21	0.02	0.07	0.01	0.01	0.04	0.02
	S-5加载0.6g	97.37	1.95	0.05	0.26	0.03	0.03	0.17	0.05
	S-5加载0.8g	99.81	0.14	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
加载Z向工况S-5能量占比	S-5加载0.2g	96.72	3.01	0.07	0.18	0	0	0.01	0.01
	S-5加载0.6g	95.27	4.51	0.01	0.06	0.01	0.01	0.07	0.05
	S-5加载0.8g	97.04	2.73	0.04	0.07	0.01	0.01	0.06	0.04
加载X向沿高程测点能量占比	S-2加载0.2g	96.39	2.66	0.07	0.87	0.04	0.04	0.24	0.19
	S-3加载0.6g	96.41	1.45	0.05	0.48	0.12	0.13	0.78	0.59
	S-4加载0.8g	99.41	0.48	0.01	0.06	0	0	0.01	0.01
加载Z向沿高程测点能量占比	S-2加载0.2g	99.36	0.59	0.01	0.03	0	0	0	0
	S-3加载0.6g	98.20	1.73	0.02	0.04	0	0	0	0
	S-4加载0.8g	99.78	0.619	0	0.01	0	0	0.01	0.01
加载X向沿滑面测点能量占比	S-1加载0.2g	97.69	2.12	0.05	0.07	0.01	0.01	0.03	0.02
	S-3加载0.6g	96.41	1.46	0.05	0.48	0.12	0.13	0.78	0.59
	S-5加载0.8g	97.37	1.95	0.05	0.26	0.03	0.03	0.17	0.14
加载Z向沿滑面测点能量占比	S-1加载0.2g	98.18	1.73	0.04	0	0.01	0.01	0.01	0
	S-3加载0.6g	98.20	1.73	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0
	S-5加载0.8g	99.27	0.51	0.06	0.01	0.01	0.01	0.07	0.05

分析如上各测点不同工况不同频带能量分布占比得知,不同幅值地震波加载工况下测点的能量占比基本全部存在于第一频带,且每个工况第一频带能量占比均保持在95%以上,说明第一频带起主导作用,此时土体响应最为剧烈,从表中可以明显看出随着频带数增加,其能量占比均表现出逐渐减少的趋势,不同工况下边坡土体对于动土压力响应的低频段部分具有放大作用,对于高频段部分具有滤波作用。

## 4 结论

本文设计并完成了1:20比例的黄土滑坡大型振动台试验,探讨了边坡在X向和Z向激振下动力

响应破坏的基本规律,对沿滑面和沿高程的5个土压力传感器的动土压力峰值分布规律进行了分析,并通过各工况加速度峰值变化分析加速度与动土压力的响应规律。得到以下结论:

(1)不同工况地震波加载过程中,土压力沿高程和滑面都呈现非线性增加的趋势,加载X向地震波对滑面土体应力影响较为显著,而加载Z向地震波对坡顶面附近土体应力影响较为显著,且加载Z向地震波土压力沿高程放大趋势比加载X向地震波更明显。

(2)输入加速度峰值0.6g时,滑体开始向下滑动,贯通破裂面的产生和动土压力峰值以及加速度峰值同时突变可作为边坡破坏的依据。

(3)使用基于小波变换的能量提取工具对各類

段的能量进行提取,第一频带的能量占比在95%以上,第一频带内土体响应最为剧烈,黄土边坡对地震波运动过程中高频部分具有“滤波作用”,防护设计时应尽可能减轻第一频带的地震能量对坡体的影响。

## 参考文献:

- [1] Plummer A R. Modal control for a class of multi-axis vibration table [C] //Mini Symposia Ukacc Control. Bath, UK: Institution of Engineering and Technology, 2004:116-121.
- [2] 周颖, 卢文胜, 吕西林. 模拟地震振动台模型实用设计方法[J]. 结构工程师, 2003, 19(3):30-33.  
Zhou Y, Lu W Sh, Lyu X L. Practical design method of shaking table model for simulated earthquake [J]. Structural Engineer, 2003, 19(3): 30-33. (in Chinese)
- [3] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁. 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, 27(3):624-624.  
Xu G X, Yao L K, Gao Zh N. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic response of slope [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (3): 624-624. (in Chinese)
- [4] 楼梦麟, 朱彤. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 10(4): 30-36.  
Lou M L, Zhu T. Soil boundary effect in shaking table model test of soil-structure system [J]. Seismic Engineering and Engineering Vibration, 2000, 10(4): 30-36. (in Chinese)
- [5] 董金玉, 杨国香, 伍法权. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10):2977-2982.  
Dong J Y, Yang G X, Wu F Q. Large-scale shaking table test of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake [J]. Geotechnical Mechanics, 2011, 32 (10): 2977-2982. (in Chinese)
- [6] 韦晓, 范立础, 王君杰. 考虑桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 91-97.  
Wei X, Fan L Q, Wang J J. Shaking table test considering pile-soil-bridge interaction [J]. Journal of Civil Engineering, 2002, 35 (4): 91-97. (in Chinese)
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座——II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2):332-336.  
Zhao Sh Y, Zheng Y R, Zhang Y F. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method [J]. Geotechnical Mechanics, 2005, 26 (2): 332-336. (in Chinese)
- [8] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12):39-61.  
Zheng Y R, Zhao Sh Y, Deng Ch J. Development of finite element limit analysis method and its application in geotechnical engineering [J]. China Engineering Science, 2006, 8(12): 39-61. (in Chinese)
- [9] Bommer J J, Rodriguez C E. Earthquake-induced landslides in central america [J]. Engineering Geology, 2002, 63(3):189-220.
- [10] Ling H I, Cheng H D. Rock sliding induced by seismic force [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997, 34(6): 1021-1029.
- [11] Ma H S, Yang C W. The Research of seismic active earth pressure with mode of translation by horizontal slices analysis method and shaking table tests [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 90-93:1942-1949.
- [12] Keefer D K. Statistical analysis of an earthquake induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta, California event [J]. Engineering Geology, 2000, 58 (3): 231-249.
- [13] 杨超, 杨林德, 季倩倩. 软土地铁车站地震响应数值计算方法的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1):87-91, 95.  
Yang Ch, Yang L D, Ji Q Q. Study on the numerical calculation method of seismic response of subway station in soft soil [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1):87-91, 95. (in Chinese)
- [14] 许强, 陈建君, 冯文凯, 等. 边坡地震响应的物理模拟试验研究[J]. 工程科学与技术, 2009, 41(3):266-272.  
Xu Q, Chen J J, Feng W K, et al. Physical simulation test of slope seismic response [J]. Engineering Science and Technology, 2009, 41 (3): 266-272. (in Chinese)
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.  
Zheng Y R, Zhao Sh Y. Application of finite element strength reduction method in soil and rock slopes [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (19): 3381-3388. (in Chinese)
- [16] 杨星宇, 周火明, 王中豪. 重力相似条件对现场隧道锚模型试验的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增1):96-101, 151.  
Yang X Y, Zhou H M, Wang Zh H. Gravity similarity conditions on field tunnel anchor model test [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Sup 1): 96-101, 151. (in Chinese)

(本文责编:池营营)