

肖文静,廖佳名,张亮亮.孤立山体地震动力响应的振动台试验研究[J].地震工程学报,2018,40(3):582-590.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.582

XIAO Wenjing, LIAO Jiaming, ZHANG Liangliang. Shaking Table Test on Seismic Dynamic Responses of Isolated Mountains [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 582-590. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.582

# 孤立山体地震动力响应的振动台试验研究

肖文静<sup>1</sup>, 廖佳名<sup>2</sup>, 张亮亮<sup>3</sup>

(1. 四川工程职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 四川省德阳市政府投资审计中心, 四川 德阳 618000;  
3. 重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:**设计并完成1:10的孤立山体大型振动台模型试验。试验模型尺寸为4.4 m×4.4 m×1.8 m(长×宽×高),该模型表面共包含30°、45°、50°及60°四个不同坡度的坡面。通过输入不同类型、幅值、频率的地震波,探讨地震作用下孤立山体模型的地震动响应规律以及地震动参数对其的影响。采用三维局部坐标系,即山体的临空面方向 $L$ 、坡面走向方向 $M$ 及竖直方向 $N$ 来对试验结果进行分析。试验结果表明:随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,当坡面角度为45°,加速度放大效应突然增大,当坡面角度为50°,加速度放大效应渐趋平缓,而边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应基本上不随坡面角度的增大而变化,其台阶也相对较为平缓;随着输入PGA的增大,临空面方向、坡面走向方向及竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐减小,表现出“量级饱和”特性。试验结果有助于揭示边坡在地震作用下的失稳机制,为边坡工程的抗震设计提供有益的参考。

**关键词:**孤立山体;动力响应;振动台试验;地震动参数

**中图分类号:** TU43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2018)03-0582-09

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.582

## Shaking Table Test on Seismic Dynamic Responses of Isolated Mountains

XIAO Wenjing<sup>1</sup>, LIAO Jiaming<sup>2</sup>, ZHANG Liangliang<sup>3</sup>

(1. Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, Sichuan, China;

2. Deyang Municipal Government Investment Audit Center, Deyang, 618000, Sichuan, China;

3. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper conducts a large-scale shaking table model test of an isolated mountain on a scale of 1:10. The model is constructed using soil and has a height of 1.8 m, length of 4.4 m, width of 4.4 m, and four slope angles of 30°, 45°, 50°, and 60°. A series of tests are performed with different input seismic wave types, amplitudes, and frequencies. Dynamic response characteristics of isolated mountains under earthquakes are discussed, as well as the influence of ground motion parameters. Conclusions obtained are as follows: (1) the topographic amplification effect of peak accelerations in the vertical direction and free-surface direction gradually increases with an

increase in the slope angle; when the slope angle is  $45^\circ$ , the amplification effect of peak accelerations suddenly increases but decelerates when the angle is  $50^\circ$ . However, there is minimal change in the amplification effect of peak acceleration along the slope strike direction with an increase in the slope angle. (2) There is a gradual reduction in the topographic amplification effect of peak accelerations in the vertical direction, free-surface direction, and slope strike direction with an increase in the peak ground accelerations of the input wave, revealing an intensity saturation phenomenon. These results reveal the mechanism of slope instability under earthquakes and can be used as a reference for seismic design during slope engineering.

**Key words:** isolated mountain; dynamic response; shaking table test; ground motion parameter

## 0 引言

我国西部山区大都处于高烈度地区,地震作用下山体的稳定性是我国西部大发展面临的重要问题。“5·12”汶川地震发生以后,许多学者对灾区内崩塌滑坡的分布规律、发生规模、支护结构的抗震性能等进行调查研究,获得了大量资料<sup>[1-5]</sup>,其中发现:汶川地震中多面孤立的山体破坏最为严重,且大多数滑坡发生在坡面角度为  $45^\circ$  以上的斜坡<sup>[6-9]</sup>。目前关于上述现象的研究主要停留在现场调查、数值分析等<sup>[10-12]</sup>方面,很少通过物理模型试验进行分析。

迄今为止,振动台试验是实验室模拟地震的重要手段,比较接近实际地震时地面的运动情况以及地震对结构物的作用情况,是研究结构物在地震作用下的破坏机理和破坏模式、评价整体抗震能力的重要手段和方法,因而在地震工程的理论研究和工程实际中得到广泛的应用<sup>[13]</sup>。本文基于汶川地震的现场调查结果,设计并完成包含4个不同角度坡面的孤立山体动力响应规律的大型振动台模型试验,分析地震作用下孤立山体动力响应规律以及参数对动力响应规律的影响规律。

## 1 振动台模型试验的设计

试验是在中国地震局工程力学研究所地震模拟开放实验室的三相电液伺服驱动式地震模拟振动台上进行的。振动台台面尺寸为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ,最大负荷重量  $30\text{ t}$ ,最大位移:  $X$ 、 $Y$  向为  $80\text{ mm}$ ,  $Z$  向为  $50\text{ mm}$ ,最大速度:  $50\text{ cm/s}$ ,最大加速度:  $X$ 、 $Y$  向为  $1.0g$ ,  $Z$  向为  $0.7g$ ,工作频率范围为  $0.5 \sim 50\text{ Hz}$ 。

### 1.1 相似关系设计

模型试验结果的可靠性取决于试验模型是否真实地再现原型结构体系的实际工作状态。但由于岩土体的物理力学性质十分复杂,在应变水平较低时就开始出现非线性,且其力学特性随岩土体的组分、

应力状态、荷载水平和加载频率、历时和历史等的不同而变化,很难找到一种能全面考虑这些特性和影响因素的模拟材料,所以本次试验只能针对本研究的主要目的,使其中某一项或某几项指标与原型参数相似或接近相似来进行。因此本试验配制相似材料,以模型长度( $L$ )、质量密度( $M$ )和时间( $T$ )为控制量,按 Buckingham  $\pi$  定理导出各物理量之间的相似关系。模型主要相似常数列于表1。

表1 模型的主要相似常数

Table 1 Main similarity constants of model

序号	物理量	相似关系	相似常数	备注
1	几何尺寸 $L$	$C_L$	10	控制量
2	时间 $T$	$C_T = C_L$	3.16	控制量
3	土体重度 $\gamma$	$C_\gamma = 1$	1	控制量
4	频率 $\omega$	$C_\omega = C_L$	0.316	
5	速度 $V$	$C_V = C_L$	10	
6	位移 $S$	$C_S = C_L$	10	
7	黏聚力 $c$	$C_c = C_L$	10	
8	内摩擦角 $\phi$	$C_\phi = 1$	1	
9	加速度 $a$	$C_a = 1$	1	

### 1.2 相似材料的配制

试验中模型相似材料的正确选取对试验的成功有着非常重要的意义。该岩质孤立山体所处的地层岩性主要有两大类:第一类是以厚层块砂岩为主的硬岩;第二类是以泥岩为代表的软岩。因此本次模型试验基于上述的相似体系,选取软岩和硬岩两种代表性材料作为岩质边坡的组成材料,并采用重晶石粉、河砂、石膏、黏土和水作为原材料,参考文献<sup>[14-15]</sup>所总结的相似材料配比,通过使用不同的原料和调整各种原料的比例来调节相似材料的主要参数,最终得到制作振动台试验过程中所需相似材料配比,即软岩采用的材料配比为河砂:石膏:水:黏土 =  $60.5 : 16.1 : 7.3 : 16.1$ ,硬岩的材料配比为河砂:石膏:水:黏土:重晶石粉 =  $31.4 : 15.7 : 8.8 : 18.9 : 25.2$ 。相似材料的具体物理力学指标列于表2。

表2 试验材料中硬岩、软岩的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of hard rock and soft rock in test material

岩性	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水率 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )
软岩	2.2	7.826	104	41
硬岩	2.3	9.655	200	45

### 1.3 岩土体的边界条件

孤立山体的基岩作为一种半无限体,理论上是没有边界的,但在振动台试验中须将模型土盛在有限尺寸的容器内。这样由于其边界上的波动反射以及体系振动形态的变化将会给试验结果带来一定的误差,即所谓的“模型箱效应”。成功的土体边界条件模拟应使容器中的模型土在地震作用下以与原型自由场同样的方式变形,减小边界条件的影响。因此,为避免振动波在模型箱边界的反射,最大程度地消除“边界效应”对试验的影响,本次试验在模型振动方向两端壁加贴厚度 30 mm 的吸波材料(泡沫)(图 1)。

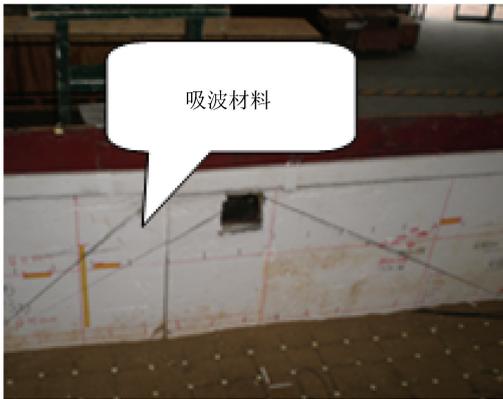


图1 模型试验的边界条件处理

Fig.1 Boundary condition of model test

### 1.4 模型设计

针对汶川地震震区普遍发育的两大类岩体:硬岩类和软岩类,本试验采用的不同岩性包括以砂岩为代表的硬岩体和以泥岩为代表的软岩体。其中山体采用软质岩体模拟,而基岩则采用硬质岩体来模拟。为简化试验影响因素,试验模型采用均质结构,模型特征详见图 2。按照相似关系,原型与模型的长度比尺为 10 : 1,山体模型的主要参数如下:(1)模型总高 1.8 m,其中山体高 0.8 m,下覆软岩 0.5 m,硬岩 0.5 m;模型长 4.4 m,宽 4.4 m;(2)山体模型的底部长 3.53 m,宽 1.55 m;上顶面长 0.78 m,宽 0.1 m;(3)山体模型表面共包含 4 个不同坡度的坡面,即  $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$  以及  $60^{\circ}$ ; (4)模型的物质组成:岩质边坡,山体采用软质岩体,以泥岩的岩体力学参

数来模拟;基岩采用硬质岩体,以砂岩的岩体力学参数来模拟。



(a) 侧视图

(b) 轴视图

图2 振动台试验模型

Fig.2 Shaking table test model

### 1.5 测点布置

本次试验在模型内不同位置处布置单向加速度传感器和三向加速度计,以获取加载过程中山体加速度响应。同时为了更加精确地描述地震过程中整个模型表面位移场的变化过程,还采用自主研发的高频数字摄像系统对其进行监测,具体如下:

#### (1) 单向加速度传感器的布置

单向加速度传感器主要用于监测地震作用下自由场内的加速度响应。本次试验设置了两处自由场测点,其中自由场 1 自上而下布置了三组加速度测点,而自由场 2 则仅在场地表面布置了 1 组加速度测点。其具体情况见图 3、图 4。此处自由场监测点主要是为了研究加速度高程放大效应设置的基准点,不能说是严格意义上的自由场。

#### (2) 三向加速度传感器的布置

三向加速度传感器主要用于监测地震作用下山体内加速度沿高程的放大效应。本次振动台试验在  $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$  以及  $60^{\circ}$  面上自上而下均布置了 4 个加速度测点。其具体情况见图 5。

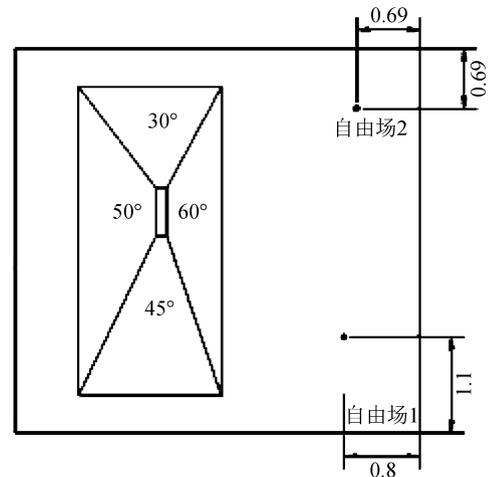
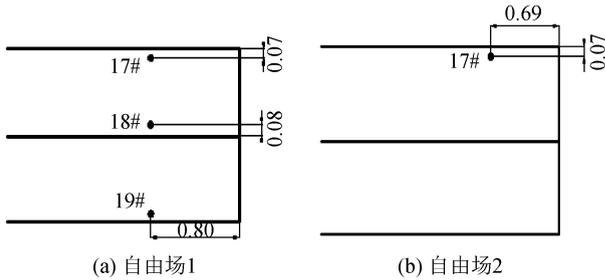


图3 平面布置图

Fig.3 Plan layout of monitoring points

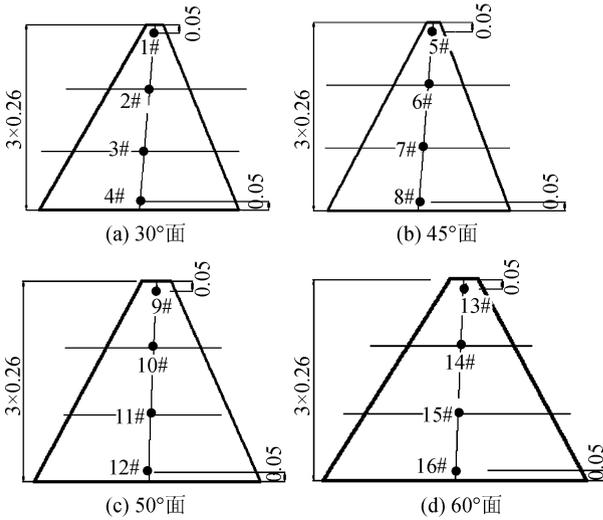


(a) 自由场1

(b) 自由场2

图 4 自由场 1 和自由场 2 断面图

Fig.4 Cross-section of free field 1 and 2



(a) 30°面

(b) 45°面

(c) 50°面

(d) 60°面

图 5 4 个不同坡度坡面的加速度传感器布置图

Fig.5 Layout of acceleration sensors on four slopes with different degree

(3) 高频数字化摄像系统的监测点布置

高频数字化摄像系统主要用于研究地震过程中坡体的变形情况以及整个模型表面位移场的分布。本次振动台试验设置的监测点满足整个模型表面,呈 0.2 m×0.2 m 的网状分布(图 2)。

1.6 加载制度

本次试验采用输入加速度时程来实现地震波的模拟。根据相似原理,模型与原型输入地震加速度时程的波形是完全相同的,仅按照时间相似比进行了调整。本次试验旨在研究地震波类型、频率以及振幅对岩质山体动力响应规律的研究,故首先对输入地震波进行归一化处理,之后通过调节其幅值来施加Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度烈度的众值地震、设计地震和罕遇地震下汶川卧龙地震波、EL Centro 地震波以及 Kobe 地震波的三向地震动加速度时程。试验开始前先进行白噪声(WN)扫描以测定模型的动力特性。在加速度峰值及时间压缩比改变时,均输入微弱白噪声激励,观察模型动力特性的变化情况。具体加载制度如表 3 所列。

2 模型的动力响应

模型的动力响应包括加速度、速度、动位移、动应力和动应变响应等。震害调查表明,与加速度有关的地震惯性力是山体产生变形和失稳的主要原

表 3 振动台试验的加载工况

Table 3 Loading condition of test

加载顺序:首先 0.05g 白噪声,之后依次加载					
工况	最大峰值加速度		工况	最大峰值加速度	
1		Kobe 波	17		Kobe 波
2	Ⅶ度众值地震[0.08g]	El Centro 波	18	Ⅸ度众值地震[0.32g]	El Centro 波
3		汶川波	19		汶川波
4	0.05g	白噪声	20	0.05g	白噪声
5		Kobe 波	21		Kobe 波
6	Ⅶ度基本烈度[0.10g]	El Centro 波	22	Ⅸ度基本烈度[0.40g]	El Centro 波
7		汶川波	23		汶川波
8	0.05g	白噪声	24	0.05g	白噪声
9		Kobe 波	25		Kobe 波
10	Ⅷ度众值地震[0.16g]	El Centro 波	26	Ⅶ度罕遇地震[0.50g]	El Centro 波
11		汶川波	27		汶川波
12	0.05g	白噪声	28	0.05g	白噪声
13		Kobe 波	29		Kobe 波
14	Ⅷ度基本烈度[0.20g]	El Centro 波	30	Ⅷ度罕遇地震[0.90g]	El Centro 波
15		汶川波	31		汶川波
16	0.05g	白噪声	32	0.05g	白噪声
33					白噪声 0.05g

因。因此本文对上述 4 个坡面上的加速度动力响应进行探讨。

2.1 坐标系变换

本次试验模型是包含 4 个坡面的山体,如果按照

常规的方法使用 X、Y、Z 三向坐标系进行分析,则会造成 30°面、45°面的临空面的方向是 50°面、60°面边坡的走向方向,很难研究坡面角度对加速度高程放大效应的影响。基于此,本节以工况 7 的计算结果为例,选取两种坐标系对加速度的高程放大效应进行研究,第一种是使用最为广泛的 X、Y、Z 三向坐标系,对上述问题进行简单的说明;第二种是局部坐标系,即边坡的临空面方向 L、边坡的走向 M, 垂直方向 N。整体坐标系和局部坐标系的具体情况见图 6。两种坐标系下振动台试验分析结果分别见图 7、图 8。

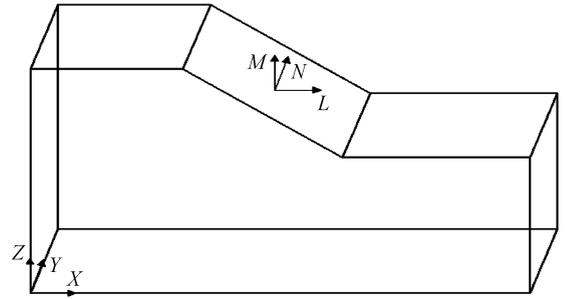


图 6 坐标系变换示意图

Fig.6 Coordinate system transformation

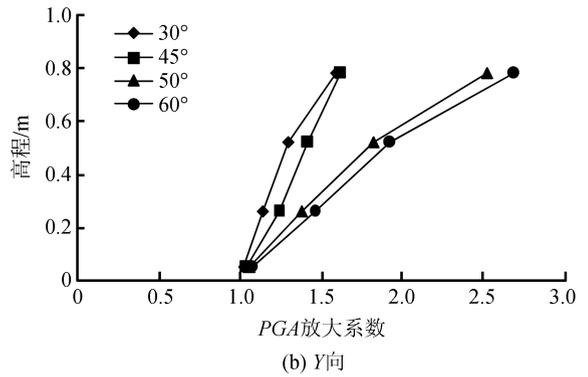
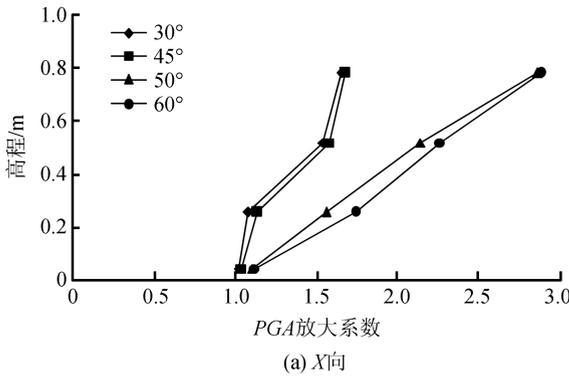


图 7 整体坐标系下峰值加速度放大系数(0.1g)

Fig.7 Amplification coefficient of PGA in global coordinate system (0.1g)

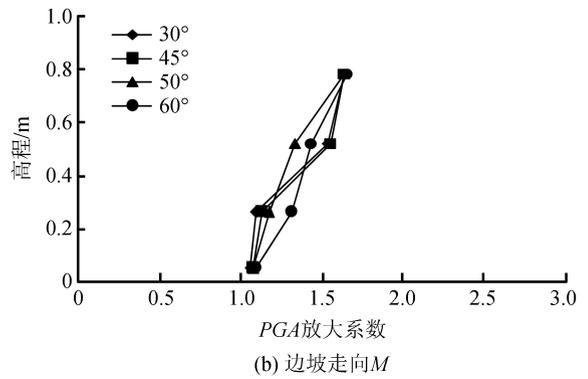
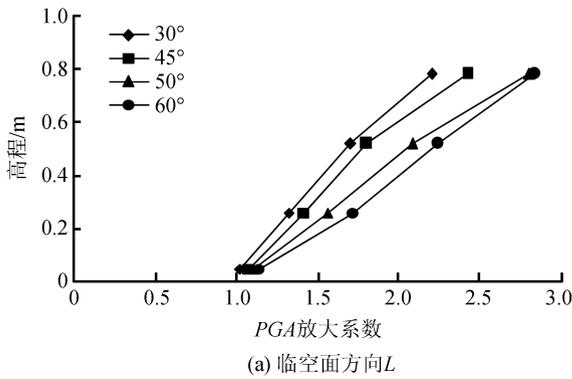


图 8 局部坐标系下峰值加速度放大系数(0.1g)

Fig.8 Amplification coefficient of PGA in local coordinate system (0.1g)

综合分析图 7、图 8 可知,在  $PGA = 0.1g$  的汶川卧龙地震波作用下,30°、45°、50°以及 60°面上的 X、Y 方向峰值加速度沿高程均具有不同程度的放大。对于 X 方向的加速度来讲,各个坡面的加速度放大性规律为:60°面>50°面>45°面>30°面;对于 Y 方向的加速度来讲,各个坡面的加速度放大性规律为:45°面>30°面>60°面>50°面。然而在局部坐标系(L, M, N)下,对于 L 方向的加速度来讲,各个坡面的加速度放大性规律为:60°面>50°面>45°面>30°面;对于 M 方向的加速度来讲,各个坡面的加

速度放大性规律为 4 个坡面上的加速度放大性基本一致。由此可知,在整体和局部坐标系下得到的结果是不一致的。出现上述现象可能是由于 X(Y)方向对于 50°、60°面来讲是临空面方向(边坡走向),对于 30°面、45°面来讲则是边坡的走向(临空面方向)。由此可见,将边坡临空面的试验结果与边坡走向的试验结果进行对比来研究加速度的高程放大效应具有一定的片面性,很难清晰地研究坡面角度对坡面上加速度高程放大效应的影响。因此本文将选取局部坐标系对加速度高程放大效应进行的阐述。

### 2.2 模型边坡的加速度响应规律

为了方便研究加速度峰值的动力响应规律,在图中将加速度峰值简写为  $PGA$ ,将加速度放大系数定义为边坡内加速度峰值与自由场加速度峰值的比值,并以  $L$  向加速度为例来加以说明:假定坡体内任意一点  $x$  的  $L$  向加速度峰值为  $A_{xL}$ ,自由场  $y$  点的  $X$  向加速度峰值为  $A_{yL}$ ,参见图 9,则该点  $L$  向加速度放大系数  $\delta_L$  就可以表示为: $\delta_L = A_{xL} / A_{yL}$ 。

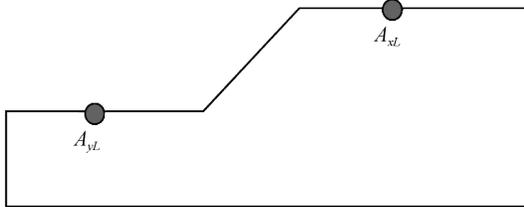


图 9 模型示意图

Fig.9 Sketch map of model

试验结果表明,在各工况地震波的激励下,模型边坡加速度响应具有相似的规律,现以加载工况 11 中  $60^\circ$  面为例进行描述:在汶川卧龙地震波作用下,  $60^\circ$  面上边坡的临空面方向  $L$ 、边坡的走向  $M$ 、竖直方向  $N$  的峰值加速度沿高程均具有不同程度的放大(图 10)。

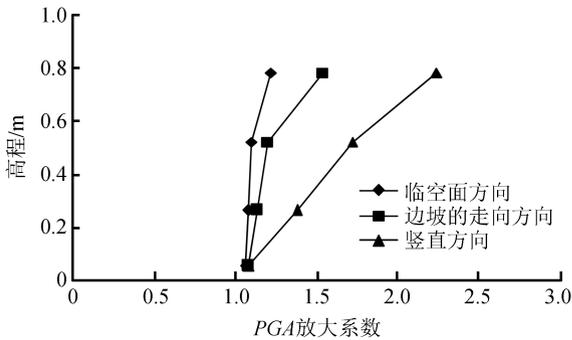


图 10 峰值加速度高程放大系数( $60^\circ$ 坡面)

Fig.10 Elevation amplification coefficient of PGA

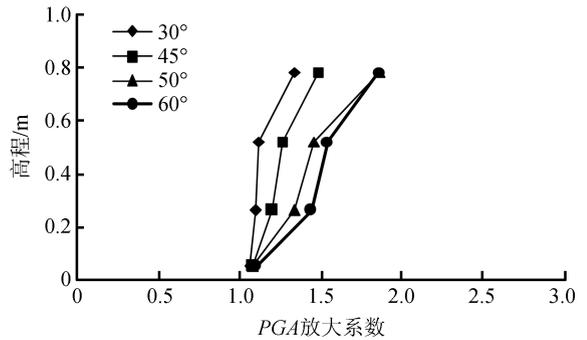
(slope angle of  $60^\circ$ )

### 2.3 地震动参数对边坡动力响应的影响

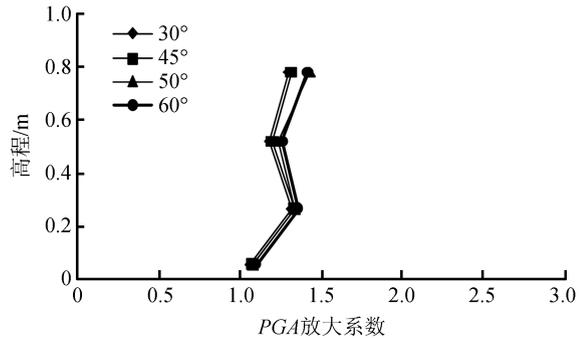
坡面角度、地震烈度以及地震动输入波参数的差异对岩质边坡地震动特性均具有显著的影响,因此本文建立了包含  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  以及  $60^\circ$  坡面的试验模型,输入汶川卧龙地震波、EL Centro 地震波以及 Kobe 地震波,其峰值为 VII 度、VIII 度以及 IX 度的众值地震、设计地震、罕遇地震,进而研究上述三类条件对岩质边坡加速度高程放大效应的影响。

(1) 坡面角度对加速度峰值高程放大效应的影响  
目前大量研究成果表明坡面角度对地震动加速

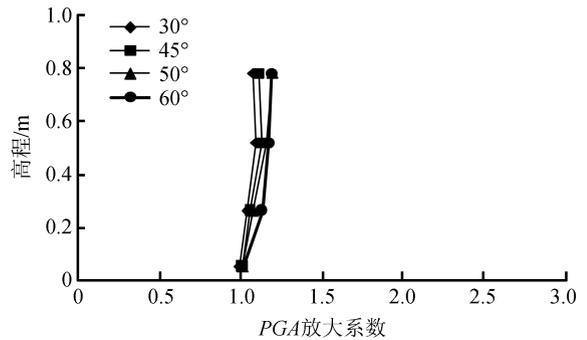
度的放大效应具有显著的影响。为清晰地说明坡面角度对加速度峰值高程放大效应的影响,本节仅选取峰值加速度为  $0.4g$  的汶川卧龙地震波作用下  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  以及  $60^\circ$  坡面上各个测点的  $L$ 、 $M$ 、 $N$  三向加速度的峰值进行分析,结果见图 11。



(a) 临空面方向



(b) 边坡走向



(c) 竖直方向

图 11 坡面角度对加速度峰值高程放大效应的影响( $0.4g$ )

Fig.11 Influence of slope angle on elevation amplification effect of PGA ( $0.4g$ )

由图 11 可知,在  $PGA = 0.4g$  的汶川卧龙地震波作用下,  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  以及  $60^\circ$  面上边坡的临空面方向  $L$ 、边坡的走向  $M$ 、竖直方向  $N$  的峰值加速度沿高程均具有不同程度的放大。对于  $L$  方向来讲,各个坡面的加速度放大性规律如下: $60^\circ$ 面  $>$   $50^\circ$ 面  $>$   $45^\circ$ 面  $>$   $30^\circ$ 面;对于  $M$  方向来讲,各个坡面的加速度放大性规律如下: $60^\circ$ 面、 $50^\circ$ 面、 $45^\circ$ 面以及  $30^\circ$

面的加速度放大性基本一致;对于  $N$  向来讲,各个坡面的加速度放大性规律如下: $60^\circ$ 面 $>50^\circ$ 面 $>45^\circ$ 面 $>30^\circ$ 面。因此,随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,而沿边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应则基本不变,这就充分说明了岩质边坡问题可以近似地简化为平面应变问题。为了更加清晰地揭示地震作用下边坡坡度对  $L$ 、 $M$ 、 $N$  三向加速度峰值的影响程度,本节仅选取了距离坡顶  $H/4$  处的测点作为研究对象来开展研究,具体结果见图 12。

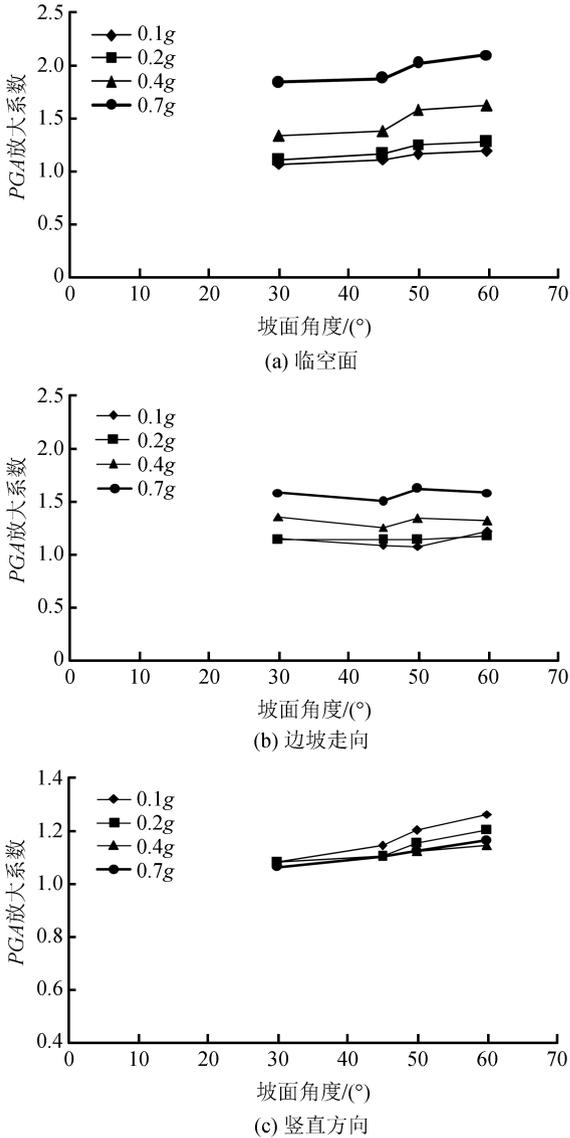


图 12 坡面角度对加速度峰值的影响(距离坡顶  $H/4$  处)

Fig.12 Influence of slope angle on PGA ( $H/4$  from slope top)

由图 12 可知,随着坡面角度的增大,临空面方向、边坡走向及竖直方向的峰值加速度放大系数逐渐增大,并且呈“台阶状”分布,即坡面在  $30^\circ$ 至  $45^\circ$ 、

$50^\circ$ 至  $60^\circ$ 两个范围内放大系数均是略有增加,而在  $45^\circ$ 至  $50^\circ$ 范围内放大系数则是突然增大。另外,峰值加速放大系数台阶高度的变化规律如下:临空面方向 $>$ 竖直方向 $>$ 边坡走向,并且在峰值为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$  及  $0.7g$  的汶川卧龙地震波作用下, $50^\circ$ 坡面的临空面方向峰值加速度的放大系数较  $45^\circ$ 坡面分别高出  $42.3\%$ 、 $19.7\%$ 、 $19.7\%$  及  $13.8\%$ 。上述分析结果充分说明:随着坡面角度的增大,峰值加速度的放大效应并不是一味的增大,而是存在两个拐点,即  $45^\circ$ 坡面是峰值加速度放大效应突然增大的拐点,而  $50^\circ$ 坡面是峰值加速度放大效应渐趋平缓的拐点。因此,坡面为  $45^\circ$ 以上岩质边坡的地震动响应将会明显高于  $45^\circ$ 以下岩质边坡的动力响应,这与“滑坡灾害主要发生在  $40^\circ$ 以上的斜坡”这一汶川地震震害调查结果吻合。

综上所述,随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,而在增强的过程中同时存在突然增大的拐点  $45^\circ$ 和渐趋平缓的拐点  $50^\circ$ 。然而边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应基本上不随坡面角度的增大而变化,其台阶也相对较为平缓。

(2) 地震烈度对加速度峰值高程放大效应的影响

为了能够清晰地说明地震烈度对加速度高程放大效应的影响,本节仅选取峰值加速度为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.7g$  的汶川卧龙地震波作用下  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 以及  $60^\circ$ 坡面上距离坡顶  $H/4$  处测点的  $L$ 、 $M$ 、 $N$  三向加速度的峰值进行分析,具体计算结果见图 13。

由图 13 可知,随着输入地震动  $PGA$  的增加,临空面方向、边坡走向及竖直方向的峰值加速度的高程放大效应逐渐减小,表现出“量级饱和”特性。“量级饱和”特性主要是指随着输入地震动峰值加速度的增大,土体的动剪切强度和动剪切模量下降,土体的阻尼比增加,非线性特征逐渐增强,地震波的耗能增大,进而造了加速度放大效应的减弱,岩土体的隔震、减震效果增强。综上所述,随着输入地震动  $PGA$  的增大,临空面方向、边坡走向方向及竖直方向的峰值加速度的高程放大效应逐渐减小,表现出“量级饱和”特性。

(3) 地震波输入类型对加速度峰值高程放大效应的影响

为了能够清晰地说明地震动输入波类型对加速

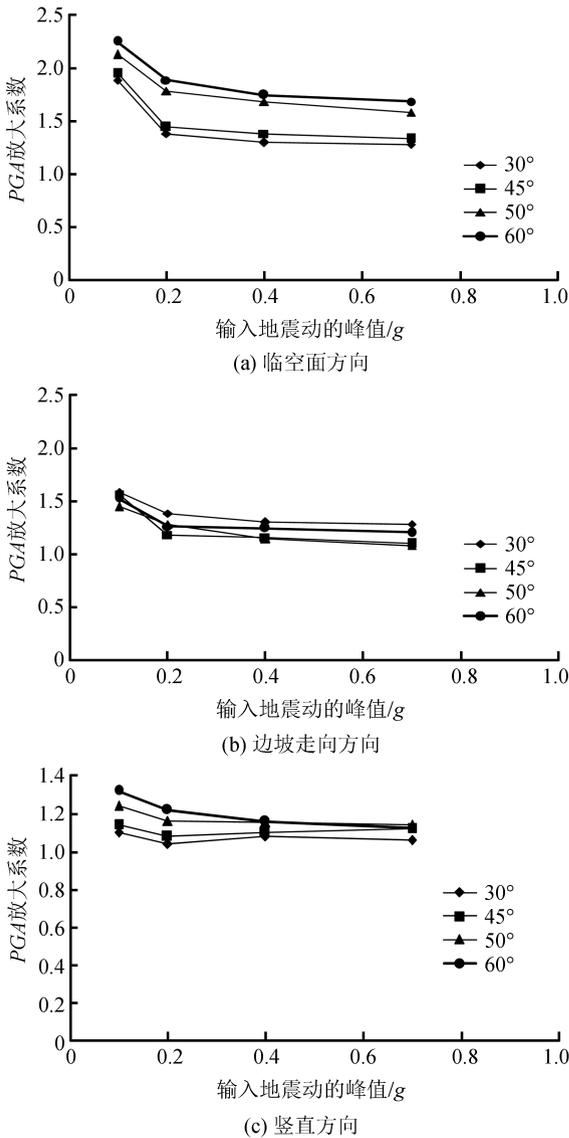


图 13 地震烈度对加速度峰值高程放大效应的影响

Fig.13 Influence of seismic intensity on elevation amplification effect of PGA

度高程放大效应的影响,本节仅选取峰值加速度为 0.2g 的汶川卧龙地震波、EL Centro 地震波及 Kobe 地震波作用下 60°坡面上各个测点三向加速度的峰值进行分析,具体结果见图 14。

由图 14 可知,在  $PGA=0.2g$  的汶川卧龙地震波、EL Centro 地震波及 Kobe 地震波作用下,60°坡面上边坡的临空面方向 L、边坡的走向方向 M 及竖直方向 N 的峰值加速度放大效应随输入地震波类型的变化规律基本一致,即 EL Centro 地震波 > 汶川卧龙地震波 > Kobe 地震波。出现上述现象可能是由于 EL Centro 地震波、Kobe 地震波及汶川卧龙地震波压缩波的频谱特性存在较大差异造成的。

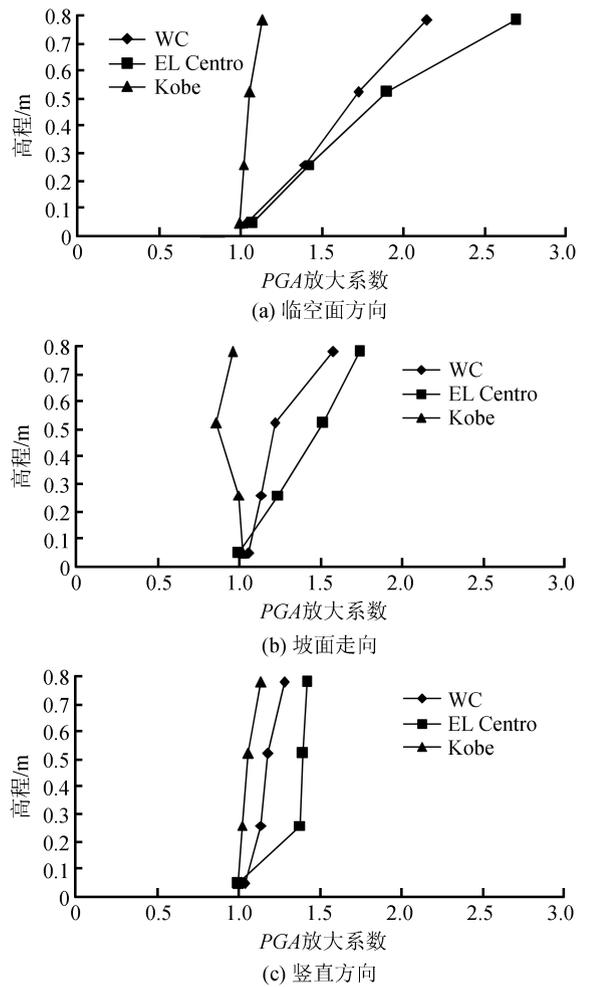


图 14 地震波输入类型对加速度的高程放大效应的影响(60°坡面)

Fig.14 Influence of the type of input seismic waves on elevation amplification effect of PGA (slope angle of 60°)

### 3 结论与讨论

本文设计并完成了 1 : 10 孤立山体的振动台模型试验,研究了地震作用下模型的动力响应规律以及地震动参数对动力特性和动力响应的影响规律。得到以下几点结论:

(1) 随着坡面角度的增大,临空面方向、竖直方向峰值加速度的高程放大效应逐渐增强,而在增强的过程中同时存在突然增大的拐点 45°和渐趋平缓的拐点 50°。然而边坡走向方向的峰值加速度高程放大效应基本上不随坡面角度的增大而变化,其台阶也相对较为平缓。

(2) 随着输入地震动 PGA 的增大,临空面方向、边坡走向方向及竖直方向的峰值加速度的高程放大效应逐渐减小,表现出“量级饱和”特性;在 EL Centro 地震波、汶川卧龙地震波及 Kobe 地震波作

用下,临空面方向、边坡走向方向及竖直方向峰值加速度的高程放大效应规律如下:EL Centro 地震波 > 汶川卧龙地震波 > Kobe 地震波。

## 参考文献(References)

- [1] 雷用,郝江南,肖强.高边坡设计中的几个问题探讨[J].岩土工程学报,2010,32(增刊2):598-602.  
LEI Yong,HAO Jiangnan,XIAO Qiang.Inquiring Some Problem in High Slope Design[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(Supp2):598-602.
- [2] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等.基于汶川地震强震动记录的边坡永久位移预测模型[J].岩土工程学报,2012,34(6):1131-1136.  
XU Guangxing,YAO Lingkan,LI Chaohong,et al.Predictive Models for Permanent Displacement of Slopes Based on Recorded Strong-motion Data of Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(6):1131-1136.
- [3] 冯文凯,许强,黄润秋.斜坡震裂变形力学机制初探[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3124-3130.  
FENG Wenkai,XU Qiang,HUANG Runqiu.Preliminary Study on Mechanical Mechanism of Slope Earthquake-induced Deformation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Supp1):3125-3129.
- [4] 叶海林,黄润秋,郑颖人,等.岩质边坡锚杆支护参数地震敏感性分析[J].岩土工程学报,2010,32(9):1374-1379.  
YE Hailin,HUANG Runqiu,ZHENG Yingren,et al.Sensitivity Analysis of Parameters for Bolts in Rock Slopes under Earthquakes[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(9):1374-1379.
- [5] 许强,李为乐.汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J].工程地质学报,2010,18(6):818-825.  
XU Qiang,LI Weile.Distribution of Large-scale Landslides Induced by the Wenchuan Earthquake[J].Journal of Engineering Geology,2010,18(6):818-825.
- [6] 祁生文,许强,刘春玲,等.汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J].工程地质学报,2009,17(1):39-49.  
QI Shengwen,XU Qiang,LIU Chunling,et al.Slope Instabilities in the Severest Disaster Areas of 5·12 Wenchuan Earthquake[J].Journal of Engineering Geology,2009,17(1):39-49.
- [7] 王秀英,聂高众.汶川  $M_s8.0$  级地震诱发崩滑特点及其与地震动参数对应关系初析[J].岩土工程学报,2009,31(9):1378-1383.  
WANG Xiuying,NIE Gaozhong.Characteristics of Landslides Induced by Wenchuan  $M_s8.0$  Earthquake and Preliminary Analysis of Their Relations with Ground Motion Parameters [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(9):1378-1383.
- [8] 钟秀梅,陈文凯,侯景瑞,等.汶川地震触发武都区 and 文县地质灾害发育特征研究[J].岩土工程学报,2011,33(增刊1):349-353.  
ZHONG Xiumei,CHEN Wenkai,HOU Jingrui,et al.Distribution Rules of Geo-hazard Induced by Wenchuan Earthquake [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(Supp1):349-353.
- [9] YANG Changwei,ZHAMG Jianjing.A Prediction Model for Horizontal Run-out Distance of Landslides Triggered by Wenchuan Earthquake[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2013,12(2):1-8.
- [10] 毛彦龙,胡广韬,毛新虎,等.地震滑坡启程刷动的机制研究及离散元模拟[J].工程地质学报,2001,9(1):74-80.  
MAO Yanlong,HU Guangtao,MAO Xinhui,et al.Mechanism of Set-out Violent-slide of Slope Mass During Earthquake and Its Simulation by Using Discrete Element Method[J].Journal of Engineering Geology,2001,9(1):74-80.
- [11] 祁生文,伍法权,刘春玲,等.地震边坡稳定性的工程地质分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2792-2797.  
QI Shengwen,WU Faquan,LIU Chunling,et al.Engineering Geology Analysis on Stability of Slope under Earthquake[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(16):2792-2797.
- [12] 李世海,刘天萍,刘晓宇.论滑坡稳定性分析方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3309-3324.  
LI Shihai,LIU Tianping,LIU Xiaoyu.Analysis Method for Landslide Stability[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Supp2):3309-3324.
- [13] 张海峰.振动台试验模型尺寸误差分析与研究[D].上海:同济大学,2006.  
ZHANG Haifeng.Model Size Error Analysis and Research of Shaking Table Test[D].Shanghai:Tongji University,2006.
- [14] 左保成,陈从新,刘才华,等.相似材料试验研究[J].岩石力学,2004,25(11):1805-1808.  
ZUO Baocheng,CHEN Congxin,LIU Caihua,et al.Research on Similar Material of Slope Simulation Experiment[J].Rock and Soil Mechanics,2004,25(11):1805-1808.
- [15] 顾大钊.相似材料与相似模型[M].北京:中国矿业大学出版社,1995.  
GU Dazhao.Similar Material and Similar Model[M].Beijing:China University of Mining and Technology Press,1995.