

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

孙志亮, 孔令伟, 郭爱国

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 堆积体边坡动力响应特性复杂, 影响因素众多。已有的大型动三轴试验结果表明, 含水状态对堆积体的动剪切模量比与阻尼比有重要影响。针对含水状态这一因素, 开展了 2 组不同含水率的 1:12 比尺的大型振动台堆积体边坡模型试验, 对比分析了其在连续地震荷载序列作用下的加速度响应特性与坡顶位移发展趋势。试验结果表明: 2 组边坡模型均表现出第一阶自振频率随着加载序列递减、阻尼比随着加载序列增大的现象, 但含水率为 6.6% 时, 边坡第 1 阶自振频率与阻尼比均大于含水率为 0.7% 的堆积体边坡。堆积体边坡含水率为 6.6% 时的输入地震动峰值加速度 (PGA) 放大系数大于堆积体边坡含水率为 0.7% 时的工况。2 组模型坡顶水平响应加速度的傅里叶频谱特征相似, 均表现出输入地震波的特征频率越接近模型第 1 阶自振频率, 坡顶水平加速度放大效应越明显, 而且从低频侧接近第 1 阶自振频率的响应比从高频侧接近的要显著。含水率为 6.6% 的堆积体边坡在多级地震荷载作用下的坡顶永久位移均大于含水率为 0.7% 的边坡, 堆积体边坡含水率为 6.6%, 坡顶永久位移对输入地震波的频谱特性更敏感。研究结论有助于增强不同含水状态对堆积体边坡动力响应规律影响的认识。

关 键 词: 堆积体边坡; 含水状态; 振动台模型试验; 加速度响应; 永久位移

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2433-10

Large-scale shaking table tests on seismic behavior of deposit slopes with varying moisture content

SUN Zhi-liang, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Dynamic response of deposit slopes is complex with multiple influencing factors. The large-scale dynamic triaxial tests reveal that moisture content affects greatly on dynamic shear modulus and damping ratio of deposit. As such, two groups of large-scale shaking table model with scale of 1:12 of deposit slopes are tested with different moisture contents. Comparisons of acceleration and crest displacements distribution of 2 deposit slopes under multiple sequential ground motions show that, in either 2 models with different moisture conditions, the first order natural frequencies of model slopes decrease with the increasing loading sequence, while the corresponding damping ratios increase with its increasing. The slope model with 6.6% moisture content has larger numbers of first order natural frequency, damping ratio and peak ground acceleration (PGA) amplification coefficients than the numbers for model with 0.7% moisture content. The Fourier spectrum of slope crest accelerations of these 2 models are similar. The amplification effect of crest acceleration enhances evidently when the predominant frequencies of input seismic waves approach to the first order natural frequencies of the deposit slope. the input frequencies of seismic waves approaching the first order natural frequency from the lower frequencies side of slope amplifies PGA significantly than from the higher frequencies side. The permanent displacements of deposit slope crest with 6.6% moisture content are larger than that of 0.7% moisture content slope. In addition, the crest permanent displacements with higher moisture content are more sensitive to the spectra characteristics of input seismic waves.

Keywords: deposit slope; moisture condition; shaking table model test; acceleration response; permanent displacement

收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41372314, No. 41702348)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372314, 41702348).

第一作者简介: 孙志亮, 男, 1987 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事特殊土力学等方面的研究工作。E-mail: whrsm_sunzhi-liang@163.com

通讯作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

1 引言

堆积体是一类介于岩石与土体之间的土石混合体,在我国西南地区广泛分布,其成因复杂,粒径分布差异明显,对水的侵入敏感,同时西南地区强震频发,堆积体边坡地震稳定性问题十分突出。田海等^[1]通过离心模型试验研究了降雨条件下堆积体边坡的稳定性,孙志亮等^[2]通过大型三轴试验研究了不同含水状态对堆积体动力参数的影响,发现风干状态堆积体的动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 与剪应变 γ 关系相较于饱和状态表现出更明显的非线性,阻尼比 D 也较大。以上前期工作基于模型试验、单元试验等手段,研究了含水状态对堆积体边坡静力稳定性与堆积体动力特性的影响,不同含水状态堆积体边坡地震响应规律的异同与趋势仍待进一步探索。

堆积体边坡在地震荷载下的响应规律以及失稳破坏模式受地震荷载特征及边坡的初始物理状态等因素影响,在相关理论尚不成熟的情况下,开展物理模型试验,分析其地震响应特性及滑坡失稳机制是有效的技术手段和可行的研究方法之一。

由于大型振动台模型试验在可控情况下能在一定程度上再现边坡的地震响应过程,可以较直观地监测边坡土体响应特性和失稳破坏模式,为数值模拟结果的验证提供了依据,目前已积累了大量的试验经验与成果^[3-9]。大型振动台 1g 模型试验虽然不能模拟原型自重应力水平,受力状态与原型有差异,

但大型振动台试验模型的尺寸较大,对于含大颗粒的堆积体岩土材料 ($d_{max}=60\text{ mm}$),制作边坡模型时能较好地考虑原型材料宽级配、粗粒径的特性,因此,应用大型振动台进行较大比尺的堆积体边坡模型试验有一定优势。

为此,本文基于大型振动台试验手段开展 2 组堆积体边坡模型试验,对比 2 组不同含水率的堆积体边坡在地震荷载下的加速度、位移的响应特性的异同点,分析含水状态对堆积体边坡的地震加速度响应与永久位移的影响,以期对堆积体边坡分布地区的地震防震减灾提供参考。

2 试验概况

本次试验所采用的振动台设备和模型箱详见文献^[10]所述,堆积体试验材料基本物理力学特性如表 1 所示,相对密度 $G_s=2.657$,饱和含水率 $w_{sat}\approx 15.0\%$,其中强度参数摩擦角与黏聚力为大型三轴试验结果。通过大型动三轴试验数据,得到动剪切模量比表达式为 $G_d/G_{dmax}=1/(1+k\gamma_{dn})$,饱和状态参数 $k_1=11.7$,风干状态参数 $k_2=25.8$ ^[2]。开展 2 组边坡模型试验,1#模型为风干状态堆积体边坡 ($w\approx 0.7\%$,风干状态),2#模型为含水率较高的堆积体边坡 ($w\approx 6.6\%$,饱和度 $S_r\approx 44\%$)。

本次振动台模型试验属于 1g 模型,根据试验目的,满足其中一部分主要关系,忽略其他次要关系,试验采用表 2 所示相似关系。

表 1 堆积体试料物理力学特性
Table 1 Physical and mechanical properties of deposit

颗粒组成/%					强度参数			
60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm	$w\approx 0.7\%$	$w\approx 6.6\%$		
					c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
14.2	28.7	26.8	12.4	17.9	0	47	38.7	42

表 2 振动台模型试验相似关系

Table 2 Scaling relationships for shaking table model tests

物理量	相似率	相似比尺	相似系数
几何尺寸 l	C_l	n	12
加速度 a	C_a	1	1
密度 ρ	C_ρ	1	1
系数 K	C_K	1	1
应力 σ	$C_\sigma = C_\rho C_a C_l$	n	12
应变 ε	$C_\varepsilon = C_K^{-1} C_\rho^{1/2} C_a^{1/2} C_l^{1/2}$	$n^{1/2}$	3.464
位移 u	$C_u = C_K^{-1} C_\rho^{1/2} C_a^{1/2} C_l^{3/2}$	$n^{3/2}$	41.569
速度 v	$C_v = C_K^{-1/2} C_\rho^{1/4} C_a^{1/4} C_l^{3/4}$	$n^{3/4}$	6.447
剪切模量 G	$C_G = C_K C_\rho^{1/2} C_a^{1/2} C_l^{1/2}$	$n^{1/2}$	3.464
时间 t	$C_t = C_K^{-1/2} C_\rho^{1/4} C_a^{1/4} C_l^{3/4}$	$n^{3/4}$	6.447
频率 f	$C_f = C_K^{1/2} C_\rho^{-1/4} C_a^{-1/4} C_l^{-3/4}$	$n^{-3/4}$	0.155

2.1 模型设计

本次试验堆积体边坡概化模型的设计坡度角为 40° ,模型坡高为 120 cm,几何比尺 $n=12$,即原型坡高为 14.4 m,堆积体边坡模型设计如图 1 所示。

边坡模型基岩用浇筑的混凝土模拟,密度约为 2.30 g/cm^3 ,表面拉毛,风干状态下在基岩上将堆积体按每层 10 cm 的厚度填筑,控制干密度为 1.90 g/cm^3 。对于含水率为 6.6%的边坡模型,先按风干土料质量加入所需的水,拌合均匀后再按模型设计分层填筑,模型制作完成后静置 24 h 以上再开展试验。填筑到高出相应传感器的设计高程为 10 cm 左右时,埋设加速度传感器,传感器布置坐标见表 3。

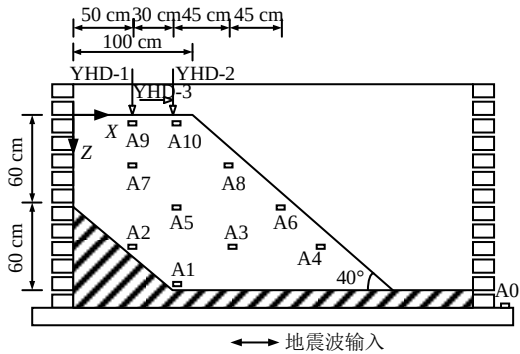


图 1 堆积体边坡模型与传感器布置
Fig.1 Deposit slope model and location of sensors

表 3 传感器初始坐标
Table 3 Initial coordinates of sensors

传感器	X/cm	Z/cm	传感器	X/cm	Z/cm
A1	80	111	A8	125	31
A2	50	91	A9	50	11
A3	125	91	A10	81	11
A4	125	91	YHD-1	50	0
A5	80	62	YHD-2	80	0
A6	170	62	YHD-3	80	0
A7	50	31			

2.2 地震波加载序列

振动台模型试验选用 El Centro 波（冲击型）、

Taft 波（振动型）及 Wolong 波（现场真实波）作为输入波，为了分析堆积体边坡模型的频谱特性，2 组试验在加载的不同阶段进行了 180 s 左右的白噪声扫频，同时对 Wolong 波进行了 $C_t = \lambda^{3/4}$ 、 $\lambda^{1/2}$ 、 $\lambda^{1/4}$ 共 3 种不同的时间缩尺作为输入地震波以考虑其频率对堆积体边坡的动力响应的影响。具体的加载序列见表 4。

3 试验结果分析

3.1 白噪声激励下不同含水状态边坡模型动力特性分析

边坡动力响应，是地震波由深部基岩向表层传播的激励及坡体的响应过程。地震波不可预测，但边坡本身的地质结构特性是确定的。地震波经过边坡自身的传递，受边坡结构自身的自振频率、阻尼特性等基本要素的影响，形成传递到坡体表层的地震波，因此，在坡体上监测到的波动信号包含有坡体自振频率与阻尼比的信息。振动台试验通过输入一定时长的微幅白噪声，建立振动输入与输出之间的传递函数来确定边坡模型的自振频率与阻尼比特性。

表 4 堆积体边坡模型试验地震波加载序列
Table 4 Seismic wave loading sequence of deposit slope modeling tests

1#模型 ($w \approx 0.7\%$)				2#模型 ($w \approx 6.6\%$)			
工况	输入波	加速度/ g	时间比尺 C_t	工况	输入波	加速度/ g	时间比尺 C_t
W-1	白噪声	0.03	/	W-1	白噪声	0.03	/
1	El Centro	0.10	6.447	1	El Centro	0.10	6.447
2	Taft	0.10	6.447	2	Taft	0.10	6.447
3	Wolong	0.10	6.447	3	Wolong	0.10	6.447
4	El Centro	0.20	6.447	W-2	白噪声	0.03	/
5	Taft	0.20	6.447	4	El Centro	0.20	6.447
6	Wolong	0.20	6.447	5	Taft	0.20	6.447
7	Wolong	0.20	3.464	6	Wolong	0.20	6.447
8	Wolong	0.20	1.861	W-3	白噪声	0.03	/
W-2	白噪声	0.03	/	7	Wolong	0.20	3.464
9	El Centro	0.30	6.447	8	Wolong	0.20	1.861
10	Taft	0.30	6.447	W-4	白噪声	0.03	/
11	Wolong	0.30	6.447	9	El Centro	0.30	6.447
12	Wolong	0.40	6.447	10	Taft	0.30	6.447
13	Wolong	0.50	6.447	11	Wolong	0.30	6.447
W-3	白噪声	0.05	/	W-5	白噪声	0.05	/
14	Wolong	0.80	6.447	12	Wolong	0.40	6.447
15	Taft	0.80	6.447	W-6	白噪声	0.05	/
16	El Centro	0.80	6.447	13	Wolong	0.50	6.447
17	Wolong	0.90	6.447	W-7	白噪声	0.05	/
				14	Wolong	0.80	6.447
				W-8	白噪声	0.05	/

本试验在初始阶段和试验过程中的不同阶段(详细加载序列见表4),输入了振幅为 $0.03g$ 或 $0.05g$ 的白噪声,利用 Matlab 信号处理工具箱中的 $tffestimate(\cdot)$ 函数^[11]来计算堆积体边坡模型坡体不同高度、不同地震荷载作用阶段的传递函数曲线。按蒋良潍等^[12]推荐的方法,振动台试验按传递函数虚频特征曲线 $T_{xy}(f)$ 得到的自振频率及其阻尼比误差较小,本文主要分析2组试验不同含水率坡面加速度传感器 A4、A6、A8 以及 A10 与台面传感器 A0 之间传递函数的虚频特征曲线。

试验结果表明各传感器的传递函数虚频特征曲线显示的第1阶模态优势明显,各传感器之间第1阶频率 f_1 差值很小,具有很好的辨识度,第2阶频率 f_2 噪声较大,只能大致分辨其范围,因此具体分析第1阶频率 f_1 及其阻尼比 λ_1 在不同工况下的变化规律,详见图2所示。

将2组模型第1阶自振频率及其阻尼比随地震加载序列变化的关系绘于图3中。总体趋势上,随着地震波的逐级加载,2组边坡模型均表现为第1阶自振频率随加载序列逐渐降低,第1阶阻尼比逐渐增大,堆积体边坡模型在连续地震荷载的作用下,模型损伤累积,剪切模量降低,阻尼比增大,自振频率降低。整个加载序列作用下,1#模型($w \approx 0.7\%$)第1阶自振频率约降低8%,阻尼比约增大28%,2#模型($w \approx 6.6\%$)第1阶自振频率约降低10%,阻尼比约增大24%。从图3中可以看出,堆积体边坡模型的第1阶自振频率大致在 $11.1 \sim 12.5$ Hz 间变化,对应的第1阶阻尼比在 $6.5\% \sim 8.0\%$ 之间,含水率 $w \approx 6.6\%$ 时模型的一阶频率及其对应的阻尼比均大于 $w \approx 0.7\%$ 时的模型,这种初始差异性主要可能是由不同含水率堆积体边坡形成不同的土体内部结构引起的。

在输入地震波幅值 $PGA=0.1g$ 与 $PGA=0.2g$ 的地震荷载序列作用下,第1阶自振频率及其阻尼比变化幅度最明显,1#模型($w \approx 0.7\%$)在这2级地震荷载作用下,自振频率降低幅度占总幅度的69%左右,阻尼比增大幅度则占到了总幅度的88%之多,2#模型($w \approx 6.6\%$)在这2级地震荷载作用下,自振频率降低幅度约占总幅度的65%,阻尼比增大幅度约占总幅度的87%(图3)。可见,初始2级连续地震荷载作用对堆积体边坡模型第1阶自振频率及其阻尼比的变化影响最大,这与一般的土体边坡模型不同^[6],由于此次试验用堆积体边坡模型材料含大量粗颗粒砾石($d_{\max} = 60$ mm),制作的模型在振动初始阶段内部结构变化程度更大。初始阶段模型产生

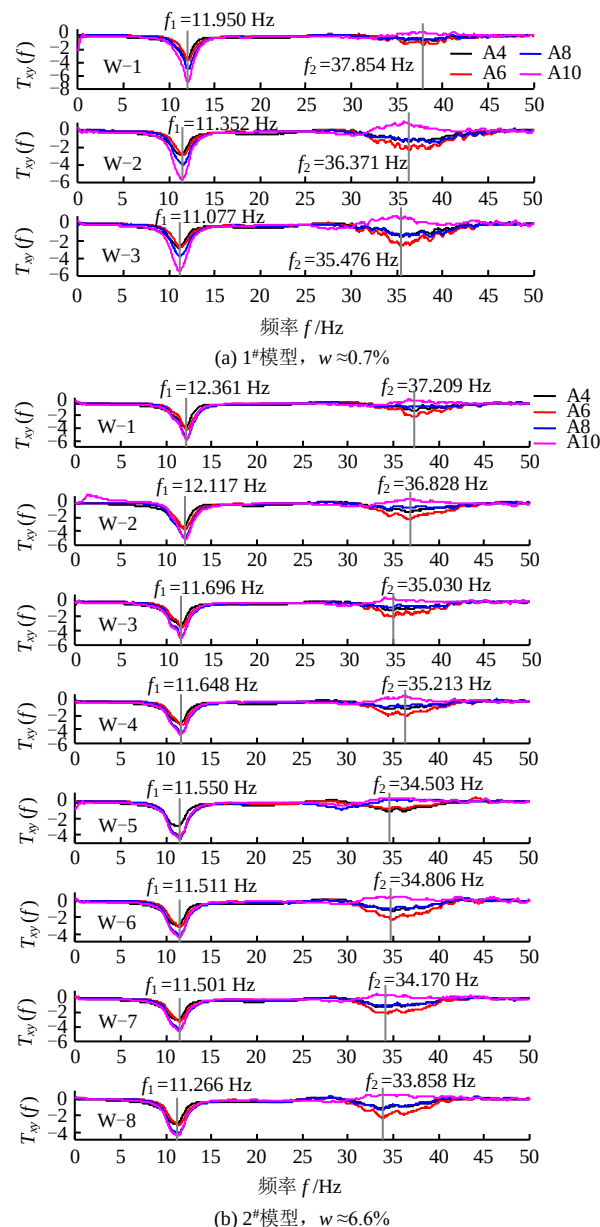


图2 坡面各测点加速度传递函数虚频特性曲线
Fig.2 Curves of imaginary frequency property of acceleration transfer functions in different measuring points of slope surface

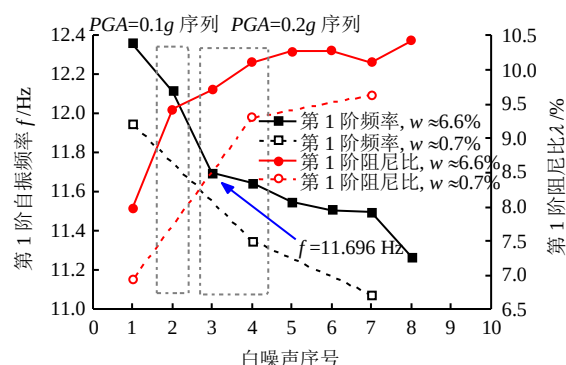


图3 堆积体边坡第1阶自振频率及其阻尼比随加载序列变化曲线

Fig.3 Curves of the first order frequency and corresponding damping ratio with the load sequences of deposit slope

的内部结构变化使得其第1阶自振频率及其阻尼比发生显著变化,在随后的多级地震荷载作用下,堆积体边坡模型的自振频率及其阻尼比变化幅度降低。

3.2 水平地震加速度响应分析

3.2.1 不同 PGA 输入地震波下堆积体边坡水平加速度响应

定义 PGA 水平向放大系数为边坡模型内各加速度测点水平响应加速度的峰值与振动台的台面输出加速度峰值的比值。

如图4所示,2组模型表现出相同的趋势,即随着输入地震波峰值加速度 PGA (0.1g、0.2g、0.3g) 的逐级增大,对应的 PGA 放大系数逐渐减小,如1#模型在 El Centro 波作用下, A10 测点在输入地震波峰值 PGA 分别为 0.1g、0.2g、0.3g 工况下:其 PGA 放大系数分别为 1.47、1.44 与 1.31。Wolong 波在 PGA > 0.2g 的工况时,PGA 放大系数甚至小于 1。分析原因,堆积体材料具有明显的非线性特征,随着输入动荷载的逐渐增大,堆积体边坡内部动力响应的增大幅度逐渐降低,剪应变越大,刚度相应降低,阻尼比增大,即表现为 PGA 放大系数随输入地震波幅值的增大而逐渐减小。另外,连续多级地震荷载对边坡模型的振密作用也会一定程度减小 PGA 放大系数。

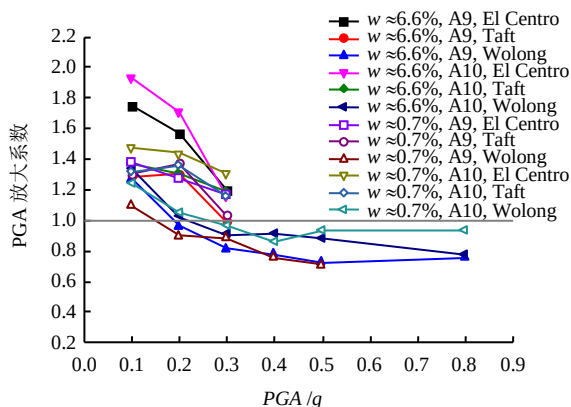


图4 A9与A10测点PGA放大系数与输入PGA关系
Fig.4 Relationships of PGA amplification coefficients and input PGA in measuring points A9 and A10

3.2.2 不同含水率堆积体边坡水平加速度响应

对比2组不同含水状态下的坡内放大系数与坡面放大系数,以A9测点与A10测点在各工况下的PGA放大系数为例进行对比,如图5所示。1#、2#模型A10测得的加速度响应PGA放大系数普遍要大于A9测点的PGA放大系数,总体上坡面PGA放大系数要大于坡内的放大系数。这种坡内与坡面

PGA放大系数不一致的现象可能就是地震滑坡多以浅层剥皮型滑坡为主的原因,临空面使坡体下面传来的地震波在浅表层形成反射与叠加,致使坡面的加速度响应要大于坡体内部,坡面表层与坡体内部不一致的加速度响应导致其水平向位移量值(通过测点加速度对时间积分得到)也出现差异,进而产生表层与坡体内部的相对位移,当地震荷载强度较大,相对位移达到一定量值后就会引发滑坡。

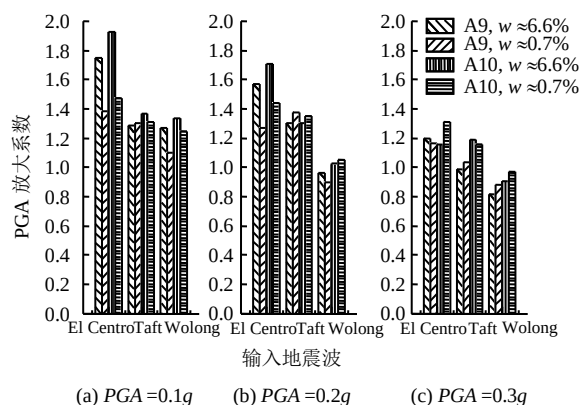


图5 不同含水状态坡顶水平向PGA放大系数对比
Fig.5 Comparison of horizontal PGA amplification coefficients at slope crests under different moisture conditions

分析边坡含水率的影响,对比1#模型($w \approx 0.7\%$)与2#模型($w \approx 6.6\%$),可以发现堆积体模型在较高含水率条件下,无论是坡内还是坡面,PGA放大系数总体上要大于较低含水率的模型,见图5中峰值加速度为0.1g的El Centro的地震荷载作用下,含水率为6.6%的堆积体模型A9加速度放大系数比含水率为0.7%的模型大27%左右,A10放大系数的差值达到了31%。这说明当堆积体边坡含水率增大后,对水平激振竖向传播地震波的放大作用更明显,响应加强,这与文献[2]中不同含水状态堆积体加速度反应谱的变化规律一致。

3.2.3 不同频谱特征输入地震波下堆积体边坡水平加速度响应

从图4与图5中发现,输入El Centro波、Taft波时坡顶放大作用要强于输入Wolong波,Taft波的坡顶PGA放大系数又大于El Centro波。2#模型在PGA=0.2g系列输入地震波作用下,A0加速度计实测地震波傅里叶谱见图6所示,发现Taft波卓越频率区间大致在6.5~11 Hz之间,频带较宽,属于振动型地震波,而且略小于该工况下堆积体边坡模型的第1阶自振频率(11.696 Hz左右,详见图3),El Centro波卓越频率区间大致分布在6~8 Hz与

9~10 Hz 两个较窄的频带之间,属于冲击型地震波,Wolong 波卓越频率区间约为 14~16 Hz 之间,高于模型的第 1 阶自振频率。Taft 波与 El Centro 波的卓越频率明显低于 Wolong 波卓越频率的分布区间,这表明边坡对与其自振频率接近的输入地震波低频频谱分量比较敏感,放大效应明显。对于卓越频率大小接近的地震波,振动型地震波作用下的边坡动力加速度响应又要强于冲击型地震波。1#模型的输入地震波与 2#模型相同,只是一阶自振频率略小(11.352 Hz 左右),因此,1#模型对 3 种不同频谱特征地震波的加速度响应规律趋势与 2#模型类似,量值不同。

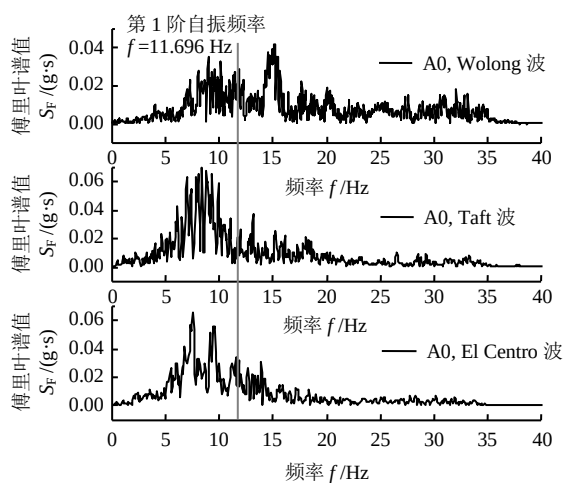


图 6 2#模型 A0 加速度计实测加速度傅里叶谱(PGA=0.2g)
Fig.6 Fourier spectra of measured acceleration obtained by acceleration sensors A0 of model 2# (PGA=0.2g)

分析相同地震波按不同时间缩尺比输入下的边坡水平加速度响应。以 2#模型 PGA=0.2g 的 Wolong 波为例,控制时间缩尺比例 C_t 分别为 6.447、3.464、1.861 ($C_t = t_p/t_m$, 即原型动力时间 t_p 与模型动力时间 t_m 之比),分析加速度计 A0、A7 和 A9 实测 PGA 放大系数及其加速度傅里叶谱。如图 7 所示,在 2 组不同含水率的边坡下,随着时间缩尺比的逐渐减小,坡顶 PGA 放大系数先增大,随后出现了逐渐降低的趋势。

时间缩尺比 $C_t = 6.447$ 时,输入 Wolong 波卓越频率主要分布在 14~16 Hz 与 17~19 Hz 频段,当地震波传播至坡顶时,加速度计 A9 实测数据的傅里叶谱显示卓越频率分布在 14~16 Hz 频段,要大于模型当前一阶自振频率 $f_1 = 11.969$ Hz; 当 $C_t = 3.464$ 时,输入 Wolong 波卓越频率主要分布在 7.5~9.0 Hz 与 12~15 Hz 频段,坡顶加速度计 A9 测得的 Wolong 波卓越频率则主要分布在 7.5~9.0 Hz 频

段,略小于模型一阶自振频率 $f_1 = 11.969$ Hz; 当 $C_t = 1.861$ 时,输入 Wolong 波卓越频率主要分布在 4~5 Hz 频段,坡顶响应的卓越频率则主要分布在 4~5 Hz 与 5.5~8.6 Hz 频段,与模型一阶自振频率 $f_1 = 11.969$ Hz 线的距离大于 $C_t = 3.464$ 时的情况。

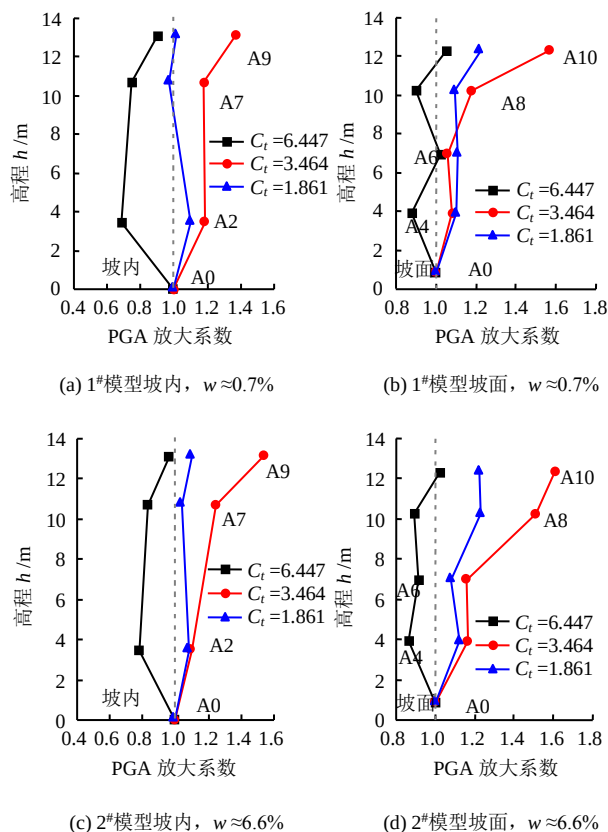


图 7 输入不同时间缩尺比 Wolong 波下 PGA 放大系数随高程变化规律 (PGA=0.2g)
Fig.7 Change laws of PGA amplification coefficients of input Wolong waves with various time reduced scales with height of slope (PGA=0.2g)

将图 7 中 PGA 放大系数与图 8 中响应地震波卓越频率分布及边坡模型一阶自振频率综合考虑,可以发现当输入地震波的卓越频率明显高于边坡的基频时,边坡沿高程方向对其放大效应不明显,甚至有衰减作用;而输入地震波的卓越频率略小于边坡的基频时,沿边坡高程方向加速度放大效应明显,输入地震波的卓越频率越靠近边坡一阶自振频率放大效应越显著。同时,沿高程方向地震波的频谱发生了明显变化,在 3 种时间缩尺比例下,都出现了低频放大,高频减小的现象。放大的频段部分大致集中在 8~12 Hz 频段,接近于堆积体边坡模型的自振频率 f_1 左侧。坡体含水率的变化并不会改变这一总体规律,只是 $w \approx 6.6\%$ 的堆积体边坡 PGA 放大系数总体上大于 $w \approx 0.7\%$ 的边坡(见图 7)。

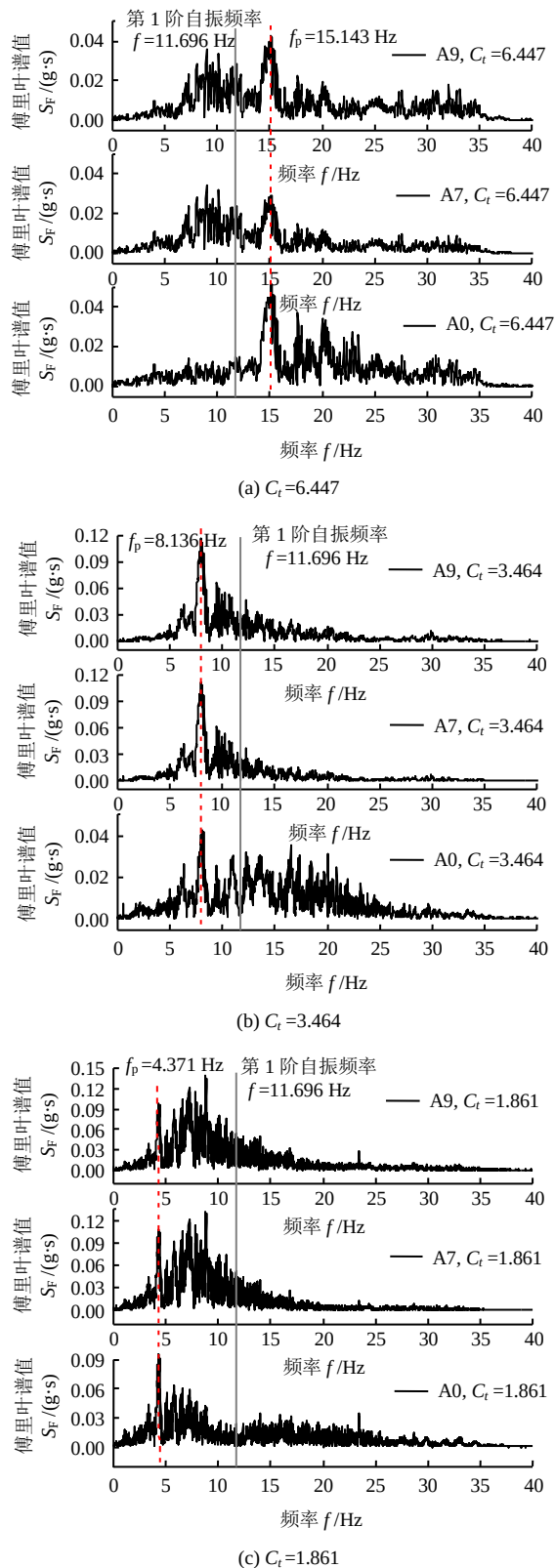


图8 2#模型 Wolong 波输入不同时间缩尺比
傅里叶谱 ($PGA = 0.2g$)

Fig.8 Fourier spectra of model 2# under Wolong wave
excitations at different time scale ratios ($PGA = 0.2g$)

3.3 永久位移响应分析

试验地震波输入序列 (见表4) 中序号1、4、9
与16为El Centro波, 输入序号2、5、10与15为

Taft波, 输入序号3、6、7、8、11、12、13、14与
17为Wolong波。位移传感器YHD-1、YHD-2及
YHD-3 (坡顶面) 所测得的永久位移数据 (模型比
例) 见表5。图9所示为Wolong波作用下坡顶面典
型位移曲线, YHD-3位移传感器是固定在与振动台
底面刚性连接的剪切模型箱支架上, 所测位移为坡
顶面与振动台底面之间的水平相对位移。

表5 各工况永久位移 (模型比例)

Table 5 Permanent displacements of each loading
form(model scale)

工况	1#模型 ($w \approx 0.7\%$) 测量值/mm			2#模型 ($w \approx 6.6\%$) 测量值/mm		
	YHD-1	YHD-2	YHD-3	YHD-1	YHD-2	YHD-3
1	0	0	0.01	1	0	0
2	0	0	0.03	2	0	0
3	0	0	0.03	3	0	0
4	0.06	0.20	0.15	4	0.47	1.00
5	0.14	0.20	0.18	5	1.42	1.21
6	0.14	0.17	0.03	6	0.05	0.97
7	0.11	0.31	0.29	7	1.14	1.60
8	0.34	0.34	0.27	8	1.82	2.52
9	0.23	0.52	0.40	9	0.71	3.16
10	0.32	0.40	0.34	10	0.85	3.01
11	0.11	0.23	0.20	11	0.13	0.52
12	0.20	0.26	0.47	12	0.77	2.64
13	0.40	0.52	2.20	13	1.40	5.09
14	1.26	1.60	7.51	14	6.53	11.97
15	8.87	9.16	32.17			
16	3.89	3.32	超量程			
17	1.72	2.26				

注: 每一级工况施加完成后, 位移清零, 非累计位移值。

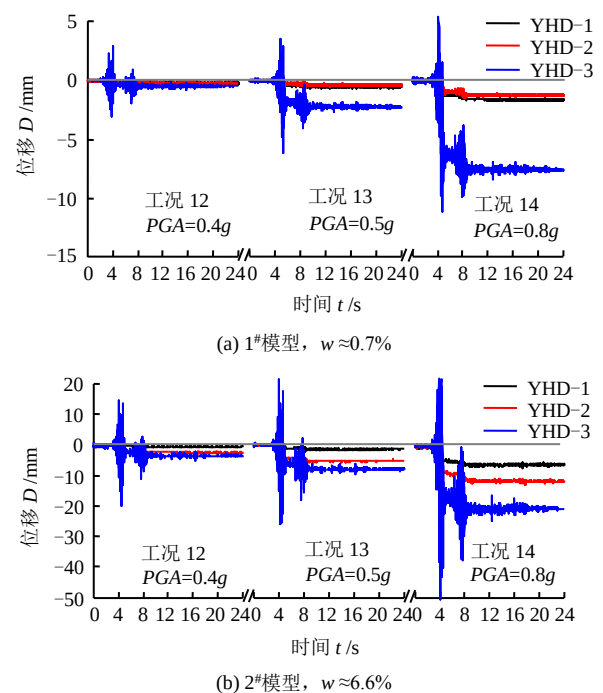


图9 Wolong 波作用下坡顶面典型位移时程曲线
Fig.9 Typical displacement time history curves of slope
crest under Wolong wave excitations

考虑不同时间缩尺比地震波对堆积体坡面位移的影响,以 Wolong 波 ($PGA=0.2g$) 为输入地震波 (表 4 加载序列 6、7 和 8),坡顶面测点处还没有发生失稳破坏,不同时间缩尺比地震波输入下的堆积体坡面位移差异明显,将表 5 中不同时间缩尺比 Wolong 波作用下的坡顶面永久位移绘于图 10 中,发现时间缩尺比越小,水平位移越大,而且还不包括先期振动的影响。这一点与输入不同时间缩尺比的 Wolong 波下的坡顶水平加速度响应趋势有所不同。分析原因,一是 Kramer^[13]认为地震波卓越频率较低时,相应的剪切波长较大,潜在滑坡体的竖向长度小于 $1/4$ 剪切波长时,潜在滑坡体的水平加速度分布基本同相位,随着输入地震波频率的提高,潜在滑坡体的水平加速度分布不同相,这时水平方向上作用在潜在滑坡体质点上的惯性力方向不一致,水平滑坡方向的合力较小,形成的永久滑动位移相应减小;另外,时间比尺越小,输出地震波的卓越频率越低,振动台的台面位移越大,振动持时越长,而振动持时是影响边坡地震响应永久位移的重要影响因素,故坡顶的响应位移越大。

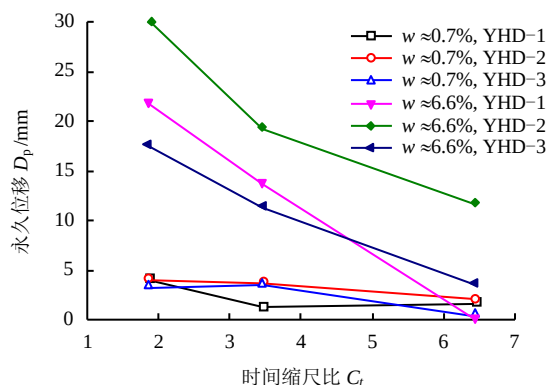
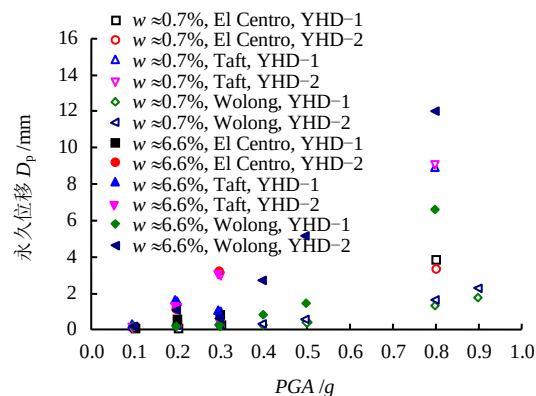


图 10 Wolong 波不同时间缩尺比下坡顶永久位移 ($PGA=0.2g$, 原型比例)

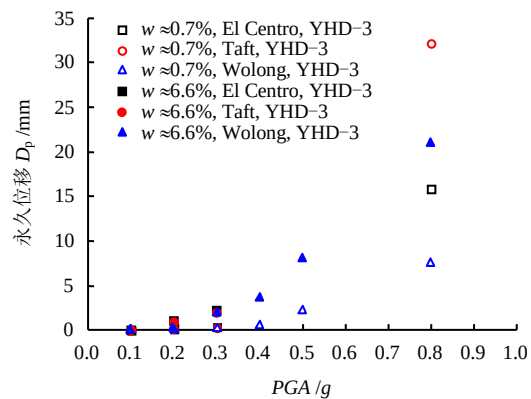
Fig.10 Permanent displacements of slope crest under Wolong wave excitations at different time scale ratios ($PGA=0.2g$, prototype scale)

从图 10 中观察到,含水率 $w \approx 6.6\%$ 的堆积体边坡测得的位移普遍大于 $w \approx 0.7\%$ 的边坡。含水率 $w \approx 0.7\%$ 的堆积体边坡在不同时间缩尺比输入 Wolong 波 ($PGA=0.2g$) 作用下的坡顶永久位移变化幅度很小。而含水率 $w \approx 6.6\%$ 的堆积体边坡坡顶永久位移大小在不同时间缩尺比的输入 Wolong 波作用下的变化幅度则明显增大, YHD-2 在 $C_t=1.861$ 时测得的坡顶永久位移为 11.6 mm, 在 $C_t=6.447$ 时永久位移则增大至 30.3 mm。试验结果表明,堆积体边坡含水率从 $w \approx 0.7\%$ 增长到 $w \approx 6.6\%$ 时,坡顶永久位移对输入地震波的频谱特性更加敏感。

图 11(a)为位移传感器 YHD-1 与 YHD-2 测得的堆积体边坡坡顶竖向永久位移,多级地震荷载作用下,堆积体边坡含水率为 6.6% 时的坡顶竖向永久位移一般均大于含水率为 0.7% 状态下的坡顶竖向永久位移。如 $PGA=0.8g$ 时,14 号工况 Wolong 波作用下, $w \approx 6.6\%$ 时 YHD-2 测得的沉降为 11.97 mm, 在 $w \approx 0.7\%$ 时则仅为 1.60 mm。 $w \approx 6.6\%$ 时的堆积体边坡竖向永久位移的启动加速度在 $PGA=0.3g$ 左右, 小于 $w \approx 0.7\%$ 时的 $0.4g$ 左右。图 11(b)为位移传感器 YHD-3 测得的堆积体边坡坡顶水平向永久位移,含水率为 6.6% 时的坡顶水平永久位移亦大于含水率为 0.7% 状态下的坡顶水平向永久位移。总体来看,堆积体边坡含水率为 0.7% 左右时,当输入地震波 PGA 超过一临界加速度^[14]后,永久位移即开始“突变”增大,而堆积体边坡含水率增至 6.6% 以后,永久位移的发展规律随 PGA 的变化则相对平缓,这主要是由于含水率增大后,堆积体的强度参数发生改变,峰值内摩擦角由 47° 降为 42° ,黏聚力则由 0 kPa 增至 38.7 kPa,开始发挥作用。在 $PGA>0.3g$ 后, YHD-3 测点的水平永久位移测量值开始快速增大,说明此时边坡坡顶趋于失稳。



(a) 竖向永久位移



(b) 水平永久位移

图 11 坡顶永久位移与输入 PGA 关系
Fig.11 Relationships of permanent displacements of slope crest and input PGA

4 结 论

(1) 在2种含水状态下, 堆积体边坡模型初始的第1阶自振频率范围大致为11.5~12.5 Hz, 对应的第一阶阻尼比在6.5%~8.0%之间。总体趋势上, 随着地震波的逐级加载, 堆积体边坡模型第1阶自振频率逐渐降低, 第1阶阻尼比逐渐增大。在整个加载序列作用下, 1#模型($w \approx 0.7\%$)的第1阶自振频率约降低了8%, 阻尼比增大28%左右; 2#模型($w \approx 6.6\%$)第1阶自振频率约降低10%, 阻尼比增大24%。

(2) 2组堆积体边坡模型的PGA放大系数随输入地震波幅值的增大而逐渐减小, 总体上坡面PGA放大系数要大于坡内的放大系数。当堆积体边坡含水率由0.7%增至6.6%后, 对水平激振、竖向传播地震波的水平放大作用更明显。

(3) 2组堆积体边坡模型在不同频谱特征输入地震波下的动力响应趋势基本类似。当输入地震波的卓越频率明显高于边坡的第1阶自振频率时, 边坡沿高程方向对其放大效应不明显, 甚至有衰减作用; 而输入地震波的卓越频率略小于边坡的基频时, 沿边坡高程方向加速度放大明显, 输入地震波的卓越频率越靠近边坡一阶自振频率放大效应越显著。

(4) 输入地震波时间缩尺比越小, 水平位移越大。堆积体边坡含水状态从风干增长到含水率为 $w=6.6\%$ 时, 坡顶永久位移对输入地震波的频谱特性更敏感。多级地震荷载作用下, 堆积体边坡含水率为6.6%时的坡顶永久位移一般均大于含水率为0.7%状态下边坡的坡顶永久位移。

致谢: 试验过程中得到了南京工业大学岩土工程研究所庄海洋教授、南京工业大学江苏省土木工程与防灾减灾重点实验室万里老师的指导与大力支持, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 田海, 孔令伟, 李波. 降雨条件下松散堆积体边坡稳定性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3180—3186.
TIAN Hai, KONG Ling-wei, LI Bo. Centrifugal modeling tests on stability of deposits slope under rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3180—3186.
- [2] 孙志亮, 孔令伟, 郭爱国, 等. 应力比与含水状态对松散堆积体动力参数及地表反应谱的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2765—2772.
SUN Zhi-liang, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Effects of stress ratio and moisture condition of loose deposits on their dynamic parameters and ground response spectrum[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2765—2772.
- [3] WARTMAN J. Physical model studies of seismically induced deformations in slopes[D]. Berkeley: University of California, 1999.
- [4] WANG K L, LIN M L. Initiation and displacement of landslide induced by earthquake—a study of shaking table model slope test[J]. **Engineering Geology**, 2011, 122(1—2): 106—114.
- [5] LIN M L, WANG K L. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test[J]. **Engineering Geology**, 2006, 86(2—3), 118—133.
- [6] 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, 27(3): 624—632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale shaking table model test on the dynamic characteristics and seismic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 624—632.
- [7] 刘婧雯, 黄博, 邓辉, 等. 地震作用下堆积体边坡振动台模型试验及抛出现象分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 308—311.
LIU Jing-wen, HUANG Bo, DENG Hui, et al. Shaking table tests and throwing phenomenon of deposit slopes under earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(2): 308—311.
- [8] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420—2428.
XU Qiang, LIU Han-xiang, ZOU Wei, et al. Study on slope dynamic responses of accelerations by large-scale shaking table test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2420—2428.
- [9] 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 Hai-lin, ZHENG Ying-ren, DU Xiu-li, 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.