

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.02.10

地震荷载下风积沙路堤动力响应规律

韦 锋¹, 李文菊², 张富贵³, 杨兴振⁴

(1. 榆林学院, 陕西 榆林 719000; 2. 云南省公路开发投资有限责任公司, 云南 昆明 650200; 3. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650041; 4. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了研究风积沙路堤在地震动荷载下的动力响应规律, 设计和制作了模型路堤并进行振动台试验, 通过对模型中埋设的多个加速度传感器和位移传感器记录的数据进行分析, 得出风积沙路堤模型在动荷载作用下的动力响应规律。得出如下结论: 模型路堤对输入的地震波具有明显的放大作用, 加速度反应放大系数 PGA 随着竖直高度的增加显著增大; 在路堤内同一高度沿水平坐标的增大放大效应变化不明显或稍有增加; 当控制地震波波形和强度相同时, 边坡坡率越大 PGA 放大效应越明显; 另外, 风积沙路堤的阻尼比、自震频率、动模量等参数随着动荷载作用历史的变化而变化, 从而进一步影响风积沙路堤加速度响应的频谱特性。研究风积沙路堤在动荷载作用下的动力响应, 可以为沙漠地区高填方路堤抗震设计提供技术支持。

关键词: 路堤; 边坡; 风积沙; 振动台

中图分类号: U416.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)02-0078-07

The study on dynamic responses of wind-blown sand subgrades under the earthquake load

WEI Feng¹, LI Wenju², ZHANG Fugui³, YANG Xingzhen⁴

(1. Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2. Yunnan Province Highway Development and Investment Limited Liability Company, Kunming, Yunnan 650200, China; 3. Broadvision Engineering Consultants, Kunming, Yunnan 650041, China; 4. Key Lab of Highway Engineering in Special Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: To study the seismic response of wind-blown sand embankment, built embankment model and designed shaking table model test, according to analysis the data came from the several acceleration sensors and displacement sensors, acquired the dynamic responses regulation of wind-blown sand subgrades model, on the driven of dynamic load. The conclusion was that: The subgrades model has obvious amplification effect to input seismic waves, the PGA increased obviously with the increase of vertical height; At the same height in the model, the PGA has little increased with the increase of horizontal coordinate figure; When the seismic waveform and intensity were determined, the amplification effect of PGA would be more obvious with the increased of slope rate; And, the damping ratios, vibration frequencies and dynamical modulus of wind-blown sand embankment will change obviously with the times and intensity of shake in advance. The study on dynamic responses of wind-blown sand subgrades, can provide technical support to the anti-seismic of high fill embankment in the desert.

Keywords: embankment; slope; wind-blown sand; vibrostand

0 引言

我国国土陆地面积的 13% 被沙漠覆盖, 且大多分

布在经济落后地区, 但这些地区蕴藏着丰富的石油、天然气、煤炭等矿产资源, 随着我国西部大开发战略的实施, 修建沙漠公路已成为首当其冲的要务。

收稿日期: 2016-07-25; 修订日期: 2017-02-11

基金项目: 陕西省教育厅 2016 科学研究计划项目 (16JK1897)

第一作者: 韦 锋 (1981-), 男, 陕西榆阳人, 副教授, 硕士, 从事岩土工程研究。E-mail: 16459404@qq.com

沙漠公路路堤通常较低,填方少,这样易于保证公路路堤结构的稳定性,但某些特殊地区也不可避免的会有很大的填方量,如 201 国道陕西榆林过境线二级沙漠公路填方路堤最高处可达 18.57 m。在沙漠地区修筑公路常用风积沙作为修筑材料,风积沙一般具有结构松散、级配不良、孔隙率大、透水性强、保水性较差、水稳性好、粘聚力小甚至无粘聚力、抗剪强度低的特点^[1]。风积沙的这些物理力学特性造成了路堤抗震稳定性差的特点,而在我国风积沙填筑高路堤路段,在路堤结构的稳定性分析上的研究相对较少,地震荷载对风积沙路堤稳定性的影响的研究更是很难查询。

边坡地震稳定性分析的常用方法有规范推荐的拟静力法和动力有限元法^[2-4]。国内外学者用拟静力法取得了一定的成果^[5-7];何蕴龙、陆述远在动力有限元分析方法的基础上,结合对坡高、岩体动弹模、坡度对岩石边坡地震动力系数的影响规律的研究,提出了一种岩石边坡地震作用的近似计算方法^[8];陈玲玲用动力法计算边坡地震作用的动位移、加速度和动应力,建立了评价岩质边坡稳定性的计算公式^[9]。但上述方法也存在一定的问题,拟静力法既没有考虑振动频率、次数和持时等地震的特性影响因素,又没有考虑坡身材料的动力性质和阻尼性质等,因而,无法反映边坡在地震时的反应特性^[10-12];对于动力有限元法,由于边坡土体的动剪应力随振动时间变化,所以其动力抗滑稳定性安全系数也随时间变化,因此基于动力有限元法确定边坡破坏的最小安全系数法也需进一步证明其可行性。本文采用的振动台模型试验法可以很好地模拟地震效应,得出风积沙路堤的动力响应,可为该地区路堤的地震稳定性分析做的很好的铺垫,因而成为研究边坡在地震条件下变形和破坏的重要方式。

表 1 加速度传感器布设尺寸详表 (mm)

	1: m	L0	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	H1	H2	H3	H4
模型一	1: 1.5	200	75	375	300	300	270	150	150	100	250	200	200
模型二	1: 1.2	200	60	300	240	240	480	150	150	100	250	200	200
模型三	1: 0.8	200	40	200	160	160	760	150	150	100	250	200	200

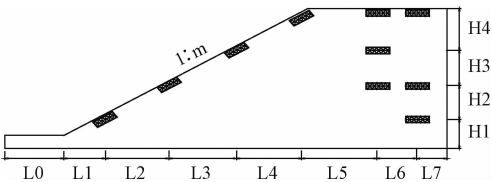


图 1 模型加速度传感器布设尺寸示意图
Fig.1 Schematic of the location of acceleration sensor in the model

1 路堤振动台模型试验设计

1.1 试验设备和模型路堤设计

振动台为日本鹭宫制作所生产,主要技术指标:台面尺寸为 2 m×2.2 m,最大试件重量为 40 kN,工作频率为 0.01 ~ 30 Hz,振动波形为正弦波、随机、地震波,最大加速度为 ±27.7 m/s²,最大振幅为 ±100 mm。数据采集系统的主要仪器为北京东方振动和噪声技术研究所研发的 INV306 型 32 通道信号采集处理分析仪;美国压电 (PCB) 公司生产的 16 通道信号调试仪;8 通道信号放大器;压电微型感应耦合等离子加速度传感器和位移传感器;佳能数码摄像机。

本试验所采用的模型箱为一个三面封闭一面开口的刚性模型箱^[13],其尺寸为 1 960 mm×1 700 mm×800 mm (长×宽×高)。本试验所要模拟的原型路堤高度为 21 m,试验模型采用 1:30 的比例进行制作,共三组试验模型,坡率分别为 1:1.5、1:1.2、1:0.8,坡高均为 700 mm,坡顶后缘长度分别为 570 mm、780 mm、1 060 mm。为减少试验成本,模型二和模型三同时设置在一个模型箱内,两模型之间用光滑刚性板隔离,使模型二和模型三之间无直接接触,同时为滑动边界。

本试验用 16 个加速度传感器和 4 个位移传感器,传感器编号及布设尺寸及位置见表 1 结合图 1。其中,在模型一上,S01 和 A01 安装在振动台台面上;S02 和 A02 安装在模型箱侧壁顶部;S1 安装在模型一顶部,S03 和 A03 安装在振动台台面上;S04 和 A04 安装在模型箱侧壁顶部;S2 和 S3 分别安装在模型二和模型三顶部。各加速度传感器和位移传感器布设位置见图 2。

1.2 相似关系设计及边界条件控制

本模型试验的主要目的就是在模型上将原型在动荷载作用下的力学现象进行模拟。试验以实际填筑路堤所用的榆林沙为主要材料,再配以石英砂为模拟材料,榆林沙的实际含水率为 3.9%,石英砂的含水率几乎为零,在实际进行模型材料配置过程中要根据实际配合比以最佳含水率进行配置,其配合比为:榆林沙:

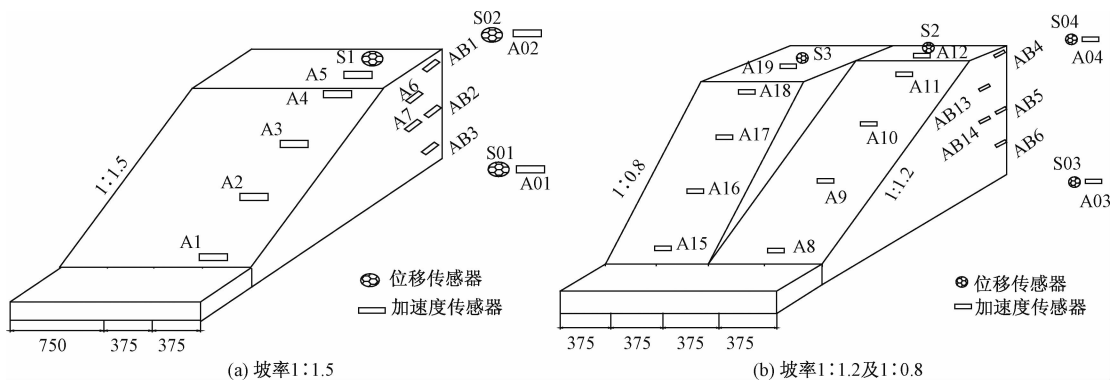


图2 传感器布设位置示意图
Fig.2 Schematic of the location of sensor

石英砂:水=10:5:2。通过对模拟土样进行筛分试验,得出其粒度成分组成见表2,采用 STD-10 型微机控制土体动三轴仪测得模型土体的动剪切模量,并对 $1/G_d \sim \gamma_d$ 拟合可得模型土层的最大动剪切模量为 18.1 MPa。经标准击实试验测得的模型土层的最佳含水率约为 14%,最大干密度为 1.74 g/cm^3 ,试验时测得的模型路堤的压实度为 86%。量纲分析法导出模型试验的相似常数(表3)。

表2 模型材料粒度组成

Table 2 Grain composition of the model material				
留筛质量百分比/%				
>0.5	0.5~0.25	0.25~0.15	0.15~0.075	<0.075
0.12	24.8	18.97	51.25	4.86

表3 振动台模型试验相似常数

Table 3 Similitude coefficients of model			
符号	项目	相似律	相似常数
L	模型尺寸	C_L	30
ρ	材料密度	C_ρ	1.02
$\ddot{u}$	加速度	$C_{\ddot{u}}$	1.0
σ	路基应力	$C_\sigma = C_\rho C_L$	30.6
ε	路基应变	$C_\varepsilon = C_\gamma = C_\rho^{-1} C_L^{-1}$	5.53
G	剪切模量	$C_G = C_\rho^{-1} C_L^{-1}$	5.53
u	位移	$C_u = C_L C_\gamma = C_\rho^{-1} C_L^{-3}$	165.95
$\dot{u}$	速度	$C_{\dot{u}} = C_\rho^{-1} C_L^{-3} C_t^{-1} = C_\rho^{-1} C_L^{-3}$	12.95
t	时间	$C_t = C_\rho^{-1} C_L^{-3}$	12.95
f	频率	$C_f = C_\rho^{-1} C_L^{-3/4}$	1/13.22
ξ	阻尼比	C_ξ	1.0
φ	摩擦系数	C_φ	1.0

在试验中,由于模型路堤土体的变形被限制在模型箱的有限的空间内,使得边界上的波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”^[14-15],为减小模型箱效

应,刚性模型箱的两侧制作成透明有机玻璃为滑动边界,另一个封闭的面处敷设 40 mm 厚的泡沫板为柔性边界,模型箱底部钢板上随机的焊接小钢片和并固定木条用以增大摩擦力,为摩擦边界。

1.3 输入地震波的选择和加载制度

由于水平地震力是引起岩土体破坏的决定性因素,在本振动台试验中,输入的均为水平向地震波,分别为 EL-Centre 波、兰州波,EL-Centre 波和兰州波交替进行加载,加载强度逐级增大,同一地震强度下,EL-Centre 波和兰州波交替进行一次为一组,每组试验完毕后,先对模型进行小幅白噪声扫频,扫频强度为 50 gal,峰值加速度与地震烈度的对应关系见表4,具体加载制度见表5。

表4 峰值加速度与地震烈度对应关系

Table 4 Relationships between peak acceleration and earthquake intensity	
峰值加速度/gal	地震烈度
62.5	VI
125.0	VII
250.0	VIII
500.0	IX
1 000.0	X

2 模型路堤加速度响应分析

模型边坡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边坡产生变形和失稳的主要原因,故本文对模型路堤的加速度动力响应进行分析。为便于分析观察实验结果,沿模型箱内壁,以距模型底部高 50 mm 处为原点,竖直向上为 Y 轴正方向,水平向左为 X 轴正方向建立平面直角坐标系。根据各测点的水平和竖直坐标值总结各测点处水平向加速度放大系数的变化情况,分析模型路堤对地震荷载的动力响应。

表 5 振动台模型试验加载制度表
Table 5 Loading rule of shaking table test

序号	地震波类型	工况	幅值/gal	序号	地震波类型	工况	幅值/gal
1	白噪声	B1	30	18	兰州波	L5	500
2	EL-Centro 波	E-0.5	50	19	白噪声	B7	30
3	兰州波	L-0.5	50	20	EL-Centro 波	E6	600
4	白噪声	B2	30	21	兰州波	L6	600
5	EL-Centro 波	E1	100	22	白噪声	B8	30
6	兰州波	L1	100	23	EL-Centro 波	E7	700
7	白噪声	B3	30	24	兰州波	L7	700
8	EL-Centro 波	E2	200	25	白噪声	B9	30
9	兰州波	L2	200	26	EL-Centro 波	E8	800
10	白噪声	B4	30	27	兰州波	L8	800
11	EL-Centro 波	E3	300	28	白噪声	B10	30
12	兰州波	L3	300	29	EL-Centro 波	E9	900
13	白噪声	B5	30	30	兰州波	L9	900
14	EL-Centro 波	E4	400	31	白噪声	B11	30
15	兰州波	L4	400	32	EL-Centro 波	E10	1 000
16	白噪声	B6	30	33	兰州波	L10	1 000
17	EL-Centro 波	E5	500				

2.1 竖直高度对 PGA 放大系数的影响

本文用坡率分别为 1:1.2 和 1:0.8 的模型边坡在各加速度幅值下的 PGA 放大系数沿坡面高度变化情况来说明竖直高度对 PGA 放大系数的影响(图 3),可得:随着竖直高度的增加,PGA 放大系数呈现明显的增大,其中在坡率 1:1.2,300 gal 时坡顶 PGA 放大系数可达到 1.7,在坡率 1:0.8,300 gal 时 PGA 放大系数也达到了 1.6,在其他加速度幅值下坡顶的 PGA 放大

系数也达到 1.2 以上,出现这种 PGA 放大系数随高度增大现象的原因是随着高度的增加,土体的围压减小,阻尼比随之减小,相应的加速的放大系数随之增大。

2.2 水平距离对 PGA 放大系数的影响

本文用同一高度不同水平位置处的加速度反应放大系数值对比说明水平距离对 PGA 放大系数的影响(图 4),由图中可得:随着水平距离的增加,PGA 放大系数略有增大或变化不明显,其中在 300 gal 加速度幅值 300 mm 高度处,模型二模型三的 PGA 放大系数沿水平方向还略有减小,结合其它工况下试验数据分析可知,水平地震荷载在水平方向上的放大效应没有在竖直方向上的放大效应明显。

2.3 坡率对 PGA 放大系数的影响

为分析研究坡率对 PGA 放大系数的影响规律,选取代表性测点,测点位置为中部坡面和顶部坡肩,以加速度幅值为 300 gal 的 EL-Centro 波作用时为例,分析不同坡率对应位置 PGA 放大系数变化规律(图 5)。由图 5 得,加速度幅值为 300 gal 的 EL-Centro 波作用时,坡率对 PGA 放大系数影响主要表现为:各组模型对应位置的 PGA 放大系数从大到小变化对应的坡率分别为 1:0.8、1:1.2、1:1.5,其中坡率为 1:0.8 和 1:1.2 时各测点对应的 PGA 放大系数相差很小,但是都明显大于坡率为 1:1.5 时各测点对应的 PGA 放大系数。

2.4 加速度幅值对 PGA 放大系数的影响

为研究加速度幅值对 PGA 放大系数的影响规律,以模型二在 EL-Centro 波作用时和模型三在兰州波作用时为例,分析研究各测点的 PGA 放大系数与加速度

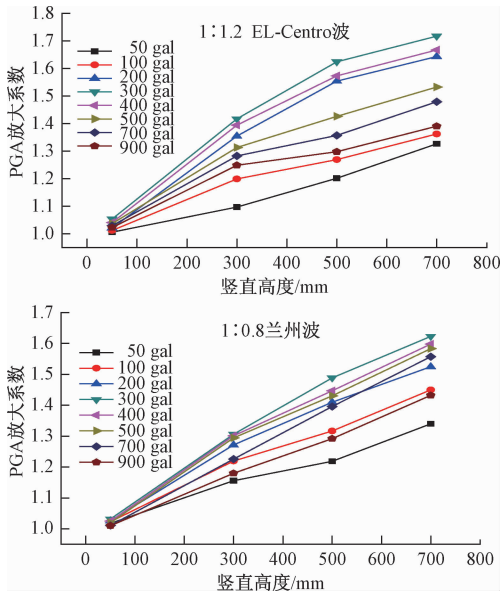


图 3 边坡表面 PGA 放大系数沿高程的变化规律曲线
Fig.3 Change laws of PGA amplification coefficients of different measuring points along slope surface with height of slope

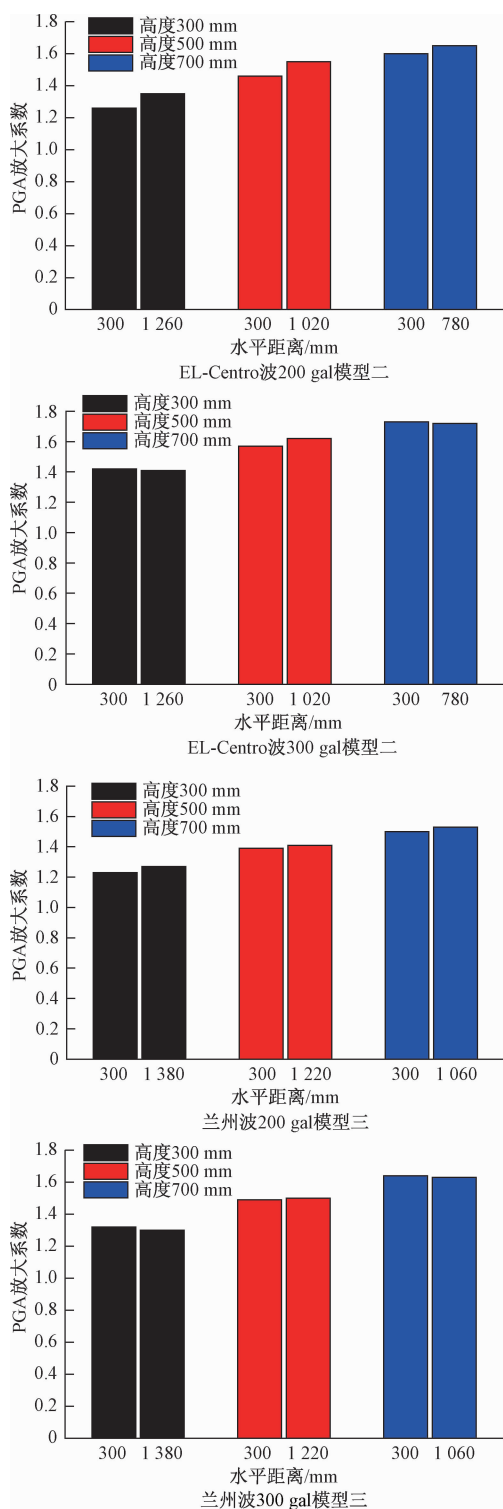


图4 水平距离对PGA放大系数的影响

Fig.4 The effect of horizontal to PGA amplification coefficients

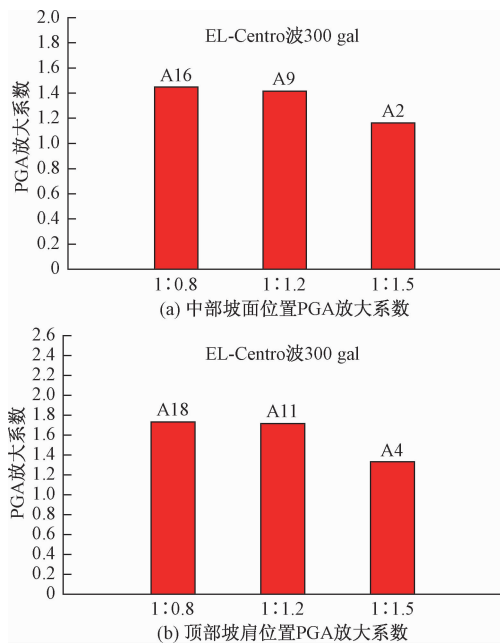


图5 路堤模型边坡坡率对PGA放大系数的影响

Fig.5 The effect of Slope rate to PGA amplification coefficients

一现象的原因是,随着振动次数增加,土体自振频率逐渐降低,阻尼比逐渐增大^[16-17],土体的抗震性能有所提高,致使PGA放大系数逐渐降低。

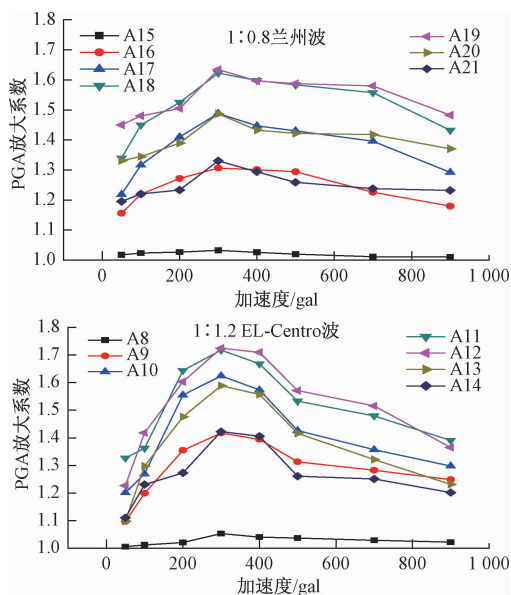


图6 PGA放大系数随加速度幅值的变化规律

Fig.6 Change laws of PGA amplification coefficients along the change of acceleration amplitude

幅值的关系,绘制关系曲线见图6。由图6的,PGA放大系数随着加速度幅值的增大而发生先大后小的变化,在加速度为300 gal时PGA放大系数最大,产生这

3 模型路堤加速度响应频谱特性分析

3.1 土层的滤波作用

由B7工况的白噪声激励时得到的模型路基地底部

(A1)、中部(A3)、顶部(A5)的傅里叶谱分析,得出在同一波激励时随着路堤高度的增大,路堤土体反应的傅里叶谱呈现规律性的变化(图7)。由图可见,经过模型土体传播后,地震波的频谱特性发生明显变化,随着测点位置的升高,高频部分的加速度反应逐渐减弱,低频部分的加速度反应加强,随着高度的升高,地震波能量逐渐向低频部分聚集。这种现象与土体自身的阻尼作用有关,使其可以吸收部分波的能量,对高频段的地震波存在滤波作用,同时对靠近路堤边坡自振频率的地震波频段能量加以放大。

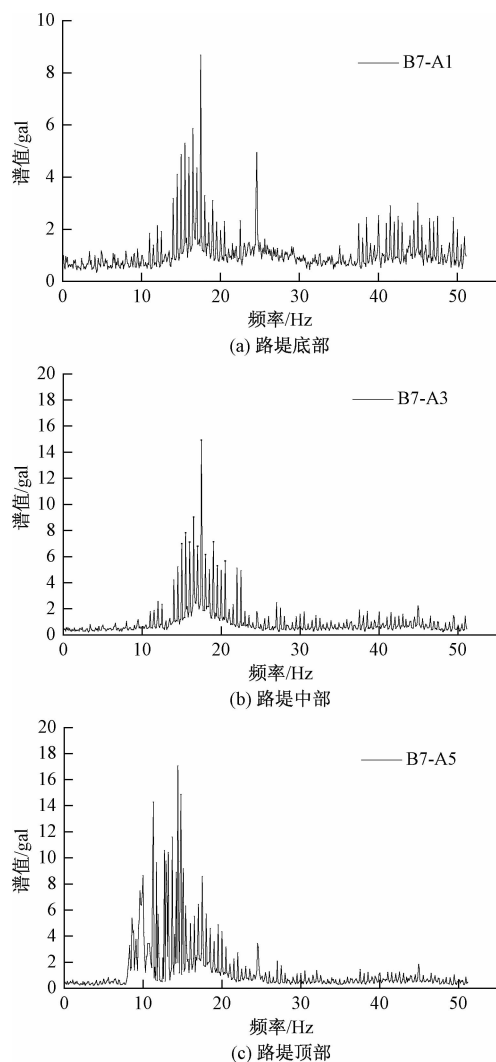


图7 不同测点在A7工况下的傅里叶反应谱

Fig.7 Different points' Fourier spectra under A7

3.2 先期震动对边坡土体加速度反应的影响。

图8为A3测点在经历不同强度和次数的先期震动后,在30 gal白噪声波激励下的加速度时程曲线图,表明在不同时刻,同一测点的加速度反应差别较大,随着先期震动强度的增大和次数的增多,A3测点处的加速度反应越来越弱,在工况B1和B4时,最大幅值可

达到100 gal,而在B8和B12工况时,最大幅值减小为60 gal左右,可见先期震动对砂土的动力响应影响较明显,其原因为随着动力作用水平的提高,砂土的动模量逐渐增加,在相同的地震波激励下,土体的地震反应就越弱。另外,随着先期震动强度和次数的增加,土体的结构越来越密实,导致模型路基的自振频率降低而与加载波的显著频率相差越来越大,从而导致土体加速度反应明显减小,另外随着先期震动强度的增加和次数的增多,模型边坡土体的阻尼比也在增大,这也是导致模型路堤加速度反应越来越小的原因之一。

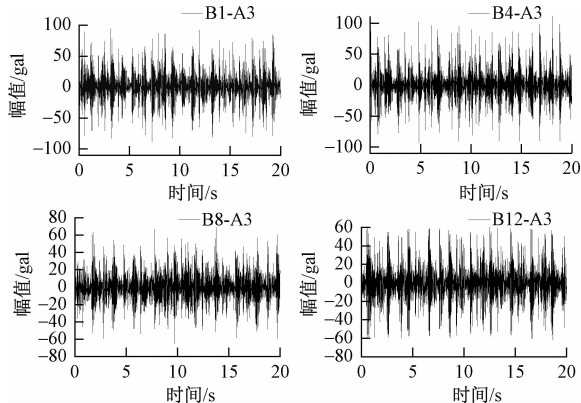


图8 A3测点在不同时刻白噪声扫描时的加速度时程曲线
Fig.8 Time history of vertical acceleration recorded of A3 at different moment

4 结论

(1)PGA放大系数沿着高程放大效应明显,但随着高度增加,放大系数增速有所减缓,且这一规律不受地震波类型影响。

(2)PGA放大系数沿水平方向变化不明显,或没有增大,说明在风积沙路堤中,同一高度处路基的地震响应基本一致,这与岩质边坡的趋表效应^[16-17]不同。

(3)边坡坡率越大,边坡坡面处的PGA放大效应越明显,坡率为1:1.5的模型PGA放大系数明显小于另外两个模型,所以在工程中,条件允许的情况下尽可能的放缓边坡,这对路基边坡的抗震有利。

(4)PGA放大系数随着加速度幅值的增大先变大后减小,这与随着震动次数增加时,土体的自震频率降低,阻尼比增大有关。

(5)风积沙土层有显著的滤波作用,随着路堤高度的增大,土体的反应波的能量逐渐向低频部分聚集,这也是造成沿边坡高度加速度放大倍数逐渐增加的原因之一。

(6)随着风积沙土体所受到的先期震动强度和次数的增加,其结构性越来越密实,阻尼比、动模量越来越

越大,致使同一土体在经历过不同的先期震动以后,在相同地震波激励下的地震动反应发生很大变化,这对指导工程实践很有意义。

参考文献:

- [1] 张展韬,龚海科,谢永利. 内蒙古自治区风积沙的工程特性[J]. 河北工业大学学报,2006,35(3):112-117.
ZHANG Zhantao, GONG Haikē, XIE Yongli. The engineering property of aeolian sand in inner Mongolia [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2006,35(3):112-117.
- [2] 郭士杰,魏红卫. 加筋土边坡地震稳定性动点安全系数分析方法[J]. 岩土力学,2014,35(2):543-571.
GUO Shijie, WEI Hongwei. Dynamic point safety factor analysis method of seismic stability of geosynthetics reinforced soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(2):543-571.
- [3] 刘晓,唐辉明,熊承仁. 考虑能量-时间分布的边坡动力可靠性分析新方法[J]. 岩土力学,2015,36(5):1428-1443.
LIU Xiao, TANG Huiming, XIONG Chengren. A new method for reliability analysis of dynamic slope stability with considering energy-time [J]. Rock and Mechanics Soil, 2015,36(5):1482-1443.
- [4] WANG Z Y, CUI P, YU G A, et al. Stability of landslide dams and development of knickpoints[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,65(4):1 067-1 080.
- [5] BOUCKOVALAS GD, PAPADIMITRIOU I A G. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005,25(7-10):547-558.
- [6] SUSUMUY. Large-scale shaking table tests on pilefoundations in liquefied ground [A]. 12WCEE [C]. Auckland IAEE, 2000.
- [7] TAMURA S, SUZUKI Y, TSUCHIYA Tetal. Dynamic response and failure mechanisms of a pile foundation during soil liquefaction by shaking table testwith a large-scale laminar shear box [A]. 12 WCEE [C]. Auckland: IAEE, 2000.
- [8] 何蕴龙,陆述远. 岩石边坡地震作用近似计算方法[J]. 岩土工程学报,1998, 20(2):66-68.
HE Wenlong, LU Shuyuan. A method for calculating the seismic action in rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(2):66-68.
- [9] 陈玲玲,陈敏中. 岩质陡高边坡地震动力稳定分析[J]. 长江科学院院报,2004,21(1):33-35.
CHEN Lingling, CHEN Minzhong. Dynamic stability analysis of steep rocky slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004,21(1):33-35.
- [10] 刘汉龙,费康. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学,2003,24(4):553-560.
LIU Hanlong, FEI Kang. Time history analysis method of slope seismic stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(4):553-560.
- [11] Taniguchi, Whimen R V, Marr W A. Prediction of Earthquake Induced Deformation of Earth dums[J]. Soils and Foundation, 1983, 23(4):120-132.
- [12] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):243-256.
CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2):243-256.
- [13] 周志军,时绍波. 一种分析路堤在地震荷载作用下稳定性的装置及制作方法 [P]. 中国专利:ZL201410729286. 7.
ZHOU Zhijun, SHI Shaobo. A kind of device to analysis the stability of subgrades under the load of dynamic loads [P]. Chinese Patent: ZL201410729286. 7.
- [14] 孙海峰,景立平,王宁伟,等. 振动台多功能叠层剪切箱研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12):2498-2506.
SUN Haifeng, JING Liping, WANG Ningwei, et al. Development of multifunctional laminar shear container for shaking table test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2498-2506.
- [15] 杜修力,李霞,陈国兴. 悬挂式层状多向剪切模型箱的设计分析及试验验证[J]. 岩土工程学报,2012, 34(3):424-432.
DU Xiuli, LI Xia, CHEN Guoxing. Design and test verification of suspension multidirectional laminar shear model box[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(3):424-432.
- [16] 李阳,李同春. 边坡动力响应特性及破坏过程的振动台试验研究[J]. 水电能源科学,2014,32(1):93-95.
LI Yang, LI Tongchun. Test on dynamic response characteristics and destruction process of slope[J]. Water Resources and Power, 2014,32(1):93-95.
- [17] 杨国香,叶海林. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(11):2214-2221.
YANG Guoxiang, YE Hailin. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(11):2214-2221.