

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0729

纵向非一致激励下自由场土体的非线性地震反应研究

韩俊艳, 钟紫蓝, 李立云, 赵 密, 万宁潭, 杜修力

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 土体地震反应分析对结构的地震反应和抗震安全性评价具有重要的意义, 以大型振动台模型试验为手段, 研究一致激励和非一致激励下自由场土体的非线性地震反应规律及其影响因素, 能够为结构的地震破坏机制分析提供支撑。通过对场地土体的动力特性、加速度响应、剪应力-剪应变曲线以及土体沉降的分析, 研究了不同地震动、不同地震强度作用下自由场土体的地震反应特性及其变化规律。研究结果表明: 土体的非线性发展程度不仅与地震动记录有关, 还与地震动输入方式、加载等级有关; 在大震或纵向非一致激励作用下, 土体运动的不一致性导致了更强的土体结构性变化, 频率降低, 阻尼比增大, 土体刚度弱化, 土体的非线性发展相对较快; 土体剪应力-剪应变曲线和沉降曲线的变化规律一定程度上也反映了土体的塑性发展情况。所得结论和自由场地震反应宏观现象一致, 彼此佐证了结论的合理性。

关 键 词: 非一致激励; 振动台试验; 地震响应; 土体非线性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 07-2581-12

Nonlinear seismic response of free-field soil under longitudinal non-uniform seismic excitations

HAN Jun-yan, ZHONG Zi-lan, LI Li-yun, ZHAO Mi, WAN Ning-tan, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Soil seismic response analysis is of great meaning to the seismic response and seismic safety evaluation of structures. In this study, the non-linear seismic response law of soil in free field under uniform and non-uniform excitation and its influencing factors are studied by means of large-scale shaking table model test, which can provide support for analyzing the seismic failure mechanism of structures. By analyzing the dynamic characteristics of soil, acceleration peak magnification coefficient, shear stress-shear strain curve and soil settlement, the ground motion response characteristics and variation of free-field soil under different earthquake motions and different seismic intensities are studied. The results show that the non-linear development degree of soil is not only related to the record of ground motion, but also to the input mode and loading level of ground motion. In the case of large earthquake or longitudinal non-uniform excitation, inconsistent movement of free-field soil leads to stronger soil structural change, decrease of frequency, increase of damping ratio, weakening of soil stiffness and relatively faster nonlinear development of soil. The variation law of soil shear stress-shear strain curve and settlement curve also reflected the plasticity development of soil. The conclusions obtained are consistent with the observed macroscopic phenomena of the free-field seismic response, which mutually corroborated the rationality of the results.

Keywords: non-uniform excitations; shaking table test; seismic response; soil nonlinear

1 引 言

目前土-结构相互作用和多点非一致输入共同

作用下结构地震反应的分析方法主要有^[1]: 子结构法、直接法。在进行土-结构相互作用分析时, 无论是直接法还是子结构法, 其中很关键的一部分工作

收稿日期: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体(No. 51421005); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(No. 2015CB057902); 国家青年科学基金项目(No. 51808018); 北京市科技计划课题(No. Z181100009018001); 北京市青年科学基金项目(No. 8184062); 北京市教委科技一般项目(No. KM201910005022)。This work was supported by the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51421005), the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2015CB057902), the National Youth Science Foundation of China (51808018), Beijing Science and Technology Plan Project (Z181100009018001), Beijing National Youth Science Foundation of China (8184062) and Beijing Municipal Education Commission Science and Technology General Project (KM201910005022).

第一作者简介: 韩俊艳, 女, 1983年生, 博士, 讲师, 主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: junyanhan@bjut.edu.cn

通讯作者: 李立云, 男, 1973年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地下结构抗震方面的研究工作。E-mail: lly@bjut.edu.cn

都是如何对土体地震反应进行恰当的分析,主要是分析土层地震动场的分布规律。土体地震反应分析的研究正在且已经引起学术界和工程界的高度重视与发展。

土体地震反应分析是估计场地条件对地震动响应的有效办法。以确定性分析方法为主,Idriss 等^[2]提出了等效线性化方法以近似处理土体的非线性特性。廖振鹏^[3]基于一维波动理论,对水平层状土层采用等效线性化分析。梁建文等^[4]采用等效线性化方法模拟土体非线性,建立地下隧道地震响应分析模型。

上述研究均基于等效线性化方法开展研究,然而,等效线性化方法只是对土体非线性特性的一个粗略估计,不能完全反映土体在地震动作用下的真实运动状态,解决这一问题需要进行土体地震非线性反应分析,李小军^[5]采用文献^[6]中土剪切动力本构关系,结合显式差分数值积分方法给出了一种土层非线性地震反应分析的计算方法。栾茂田等^[7]运用广义 Masing 准则计算土体在地震荷载作用下的非线性滞变特性,将逐步积分法与不平衡荷载转移法相结合提出了动力非线性分析的一种增量迭代格式。金星等^[8]首先推导了李小军提出的积分格式的增量形式,并据此离散动力平衡方程,同时采用 Pyke 提出的土动力本构模型以及多次透射人工边界条件,提出了一种水平成层场地地震反应非线性分析的显式有限元方法。杨繁等^[9]建立 4 种不同的自由场地计算模型,通过对比,系统分析土体分层特性、土体非线性以及地震波类型等因素对场地土体地震响应的影响。陈斌等^[10]利用编写的 Davidenkov 模型计算程序计算分析宁波深厚软土的地震响应规律,研究成果对确定深厚软土地区土体动力特性及其地震响应研究提供了合理的计算方法。齐文浩等^[11]基于适用于非对称循环荷载的土体动力本构模型——UE 模型,采用时空交叠积分格式,结合多次透射边界条件,形成一种新的土层非线性地震反应分析方法,并对新方法进行了检验。杨笑梅等^[12]借鉴目前一维成层场地地震反应分析中广泛使用的频域等效线性化思想,将其推广至时域及二维问题,提出了可用于考虑非线性特征的时域显式有限元方法,适用于复杂工程场地地震反应分析。李瑞山^[13]瞄准国际上软弱土层地震动计算结果“矮粗胖”和硬土中等效线性化缺少高频分量等求解难点,提出了动剪模量阻尼比直接频率相关计算方法,研发了新一代土层地震反应分析方法和程序 SOILQUAKE (“首克”)。刘晶波等^[14-15]提出计算地

震动倾斜入射下水平成层场地反应的一维化有限元法。Zhao 等^[16]改进了该方法并将其用于三维地下结构地震反应分析^[17]。

除了上述的理论分析和数值模拟研究,利用振动台试验研究土层地震动场的分布规律在土体地震反应研究中也得到了广泛应用。殷琳等^[18]进行了土-地下结构动力相互作用的大型振动台模型试验,分别测出了模型土中不同部位的加速度反应和地下结构的加速度与应变反应。马洪生等^[19]利用大型振动台试验研究了水平成层场地的地震动反应谱和场地放大效应及地层分界面的动力特性。吴祚菊等^[20]通过大型振动台试验获得原始试验数据,采用傅立叶变换、时频分析与分段时频分析相结合的手段,详细研究了均质及复杂非均质场地中地震动的放大效应,得到了一系列与地震动竖向传播放大效应相关的研究规律。可见,振动台模型试验已成为验证理论模型及探索场地地震响应特性和规律的一种重要研究手段。

而目前利用振动台试验研究非一致激励下自由场土体的地震反应方面的成果还很鲜见。笔者通过所开展的自由场三台阵大型振动台试验,对自由场土体的加速度、沉降量等试验数据进行场地土的动力特性、加速度响应、剪应力-剪应变曲线以及土体沉降的分析,研究了不同地震动、不同地震强度作用下自由场土体的地震动反应特性及其变化规律,揭示了纵向非一致激励下自由场土体的非线性地震反应规律及其影响因素。

2 振动台模型试验介绍

2.1 振动台概况

本试验在北京工业大学多维多点地震振动台台阵系统上进行,模拟地震振动台由美国 MTS 公司生产,可实现三向六自由度加载。单台面尺寸均为 1 000 mm×1 000 mm,最大载重为 5 t,作动器行程为±75 mm,频率范围为 0.1~50.0 Hz,峰值加速度为 2.0g(X)、1.0g(Z),振动方向 X、Y、Z 三向六自由度,输出波形为正弦波、白噪声、冲击波及地震波。

2.2 模型的相似比设计

根据试验目的,笔者运用有限元软件对原型和不同相似比的管-土相互作用数值模型进行了专项研究,由模型结果按照相似关系推出原型反应,并通过与原型动力反应比较,确定了适宜于本次试验的模型相似关系,具体相似关系确定详见文献^[21]。试验中长度 l 、弹性模量 E 、密度 ρ 、应力 σ 、应变 ε 、频率 f 、加速度 a 及重力加速度 g 相似比如

表 1 所示。

表 1 模型试验主要物理量相似常数

Table 1 Key similitude constants of model test

材料	S_l	S_E	S_p	S_σ	S_ε	S_f	S_a	S_g
土	1/10	1/4	1	1/4	1	5	2.5	/

2.3 试验模型介绍

本试验采用课题组研制的由刚性箱和悬挂软连接箱相组成的悬挂式连续体模型箱^[22-23]。内空净尺寸为 7.0 m×1.0 m×1.2 m (长×宽×高)，为了减小模型箱效应，在模型箱内的四周设置泡沫垫层，模拟吸波材料^[24]，试验时紧贴箱体内部纵向放置厚 200 mm 的泡沫塑料板，横向放置厚 150 mm 的泡沫塑料板，如图 1 所示。试验模型土为取自北京地铁 14 号线北京工业大学地铁站深度 10 m 的砂土。试验测得砂土密度为 1 740 kg/m³，天然含水率为 8.78%，粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量超过全重的 50%，达到 77%，属于中砂。自由场土体尺寸为 7.0 m×1.0 m×1.0 m (长×宽×高)，如图 2 所示。

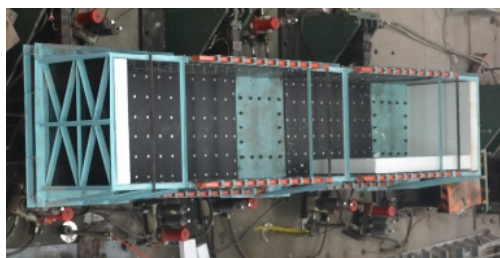


图 1 连续体模型箱

Fig.1 The continuum model box



图 2 自由场振动台模型试验

Fig.2 Free field shaking table model test

2.4 输入地震动及加载制度

本试验选用场地类别为 III 类，场地特征周期为 0.10~0.65 s。据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[25]第 5.1.2 条文说明规定，选取了 Elcentro 地震动记录 (N-S 分量)、阪神地震 Kobe 地震动记录 (N-S 分量)、北京人工合成地震动记录作为输入地震动，3 条地震动记录的加速度时程及其傅氏谱如图 3、4 所示。一致激励时输入地震动的时间间隔

和加速度峰值根据前述相似关系进行调整；非一致激励时，除应按相似关系进行调整外，还应考虑地震动传播行波效应的影响，各台阵输入地震波时间延迟 1 s^[26]。试验时输入纵向(X)地震动，采用三级加载(0.25g、0.50g、1.00g)，加载制度如表 2 所示。

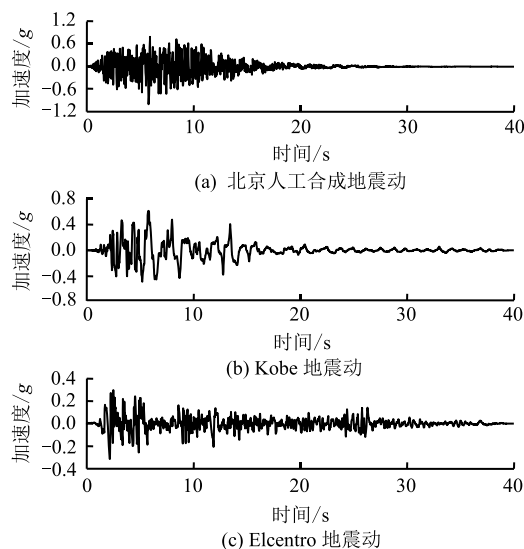


图 3 地震动的加速度时程

Fig.3 Time histories of earthquake motion acceleration

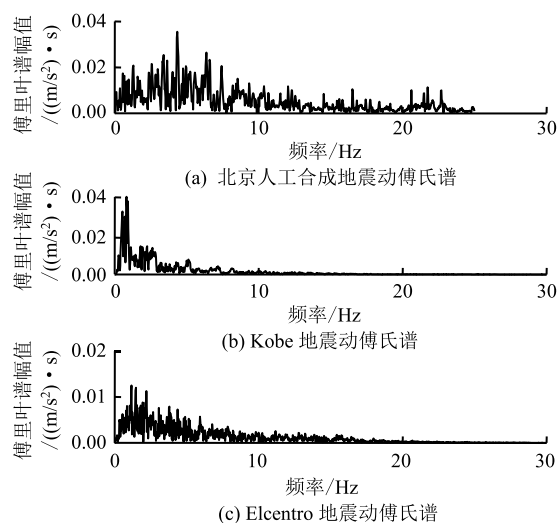


图 4 地震动加速度傅氏谱

Fig.4 Fourier spectrum of earthquake motion acceleration

表 2 振动台试验加载制度

Table 2 Loading system of the shaking table test

序号	输入波	加速度峰值/g		地震裂度
		原型	1/10 模型	
1	WN1	0.05	0.05	
2、3、4	EL1、Kobe1、BJ1	0.10	0.25	Ⅶ度
5	WN2	0.05	0.05	
6、7、8	EL2、Kobe2、BJ2	0.20	0.50	Ⅷ度
9	WN3	0.05	0.05	
10、11、12	EL3、Kobe3、BJ3	0.40	1.00	Ⅸ度

注：EL-Elcentro 地震动，BJ-北京人工合成地震动，WN-白噪声。

2.5 自由场传感器布置

自由场振动台试验中使用了加速度传感器和位移传感器。为研究场地自下而上土体的地震响应规律,沿模型土体的竖向中心线布置加速度传感器;为考察结构的存在对模型土振动特性的影响范围和程度,在横断面内布置一系列与竖向中心线平行的加速度传感器;为考察沿场地土纵向的地震响应规律,在土体表面布置一排加速度传感器;为监测振动台台面的加速度,在台面上安装了 2 个加速度传感器;为测量模型场地土的沉降,在刚性箱体 1、3、5 土表面上方布置激光位移传感器。图中传感器编号头字母 ZA 代表自由场加速度计, D 代表激光位移传

感器(共 3 个)。如图 5、6 所示。

3 试验结果及分析

3.1 自由场地震反应宏观现象

图 7、8 是三级加载(1.00g)时土体表面的破坏情况。在一致激励下,一级加载(0.25g)和二级加载(0.50g)时箱土整体较为平稳,摆动不明显,未出现裂缝;而在三级加载(1.00g)时,箱土逐渐产生剧烈振动,土体出现少量横向裂缝,并且随着振动时间的持续,整体出现大幅晃动,裂缝不断发展,端部刚性箱和软连接箱出现了少量横向裂缝,但尚未贯通,如图 7 所示。

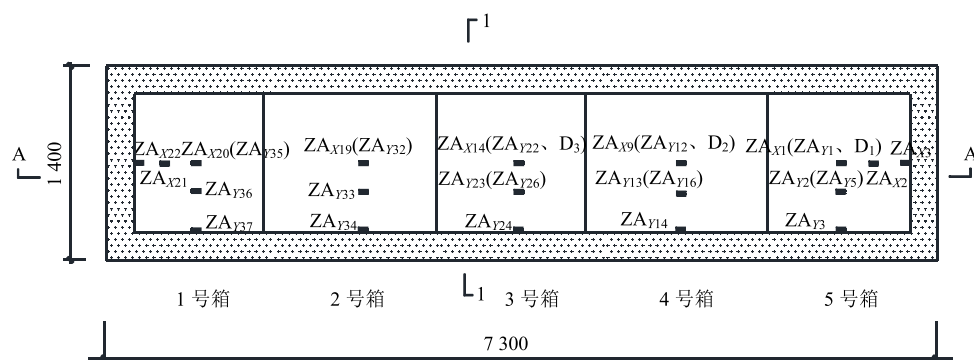


图 5 自由场试验连续体模型箱传感器平面布置图(单位: mm)

Fig.5 Sensor arrangement in continuum model soil box for the free field test (unit: mm)

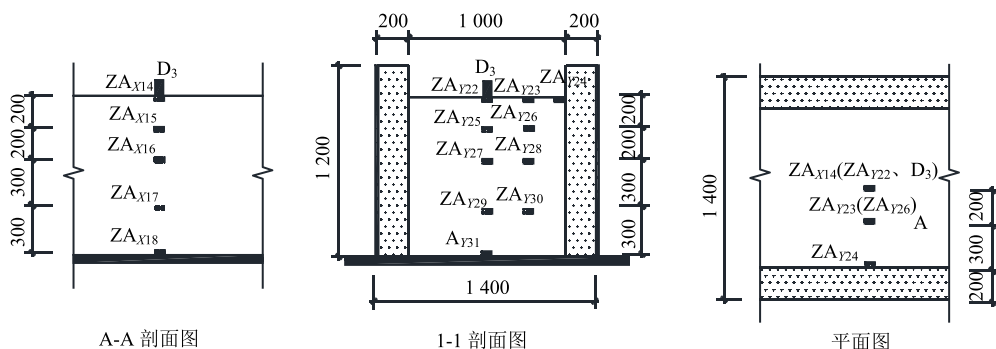


图 6 自由场试验 3 箱传感器布置(单位: mm)

Fig.6 Sensor arrangement in the Box 3 for the free field test (unit: mm)



图 7 一致激励下自由场土体的破坏
Fig.7 Damage of the soil under the uniform excitation

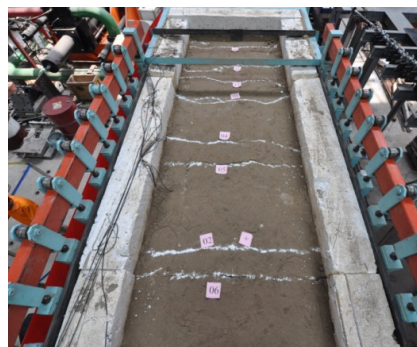


图 8 非一致激励下自由场土体的破坏
Fig.8 Damage of the soil under the non-uniform excitation

在非一致激励下，软连接箱体呈现拉压运动。表现在：二级加载（0.50g）时，软连接箱体在持续的拉伸和压缩变形中，有少量横向裂缝产生；三级加载（1.00g）时，箱体产生了明显的相对位移变化，两软连接箱体及其中间刚性箱体均产生多条横向贯通裂缝；随着地震动输入强度的加大和振动时间的持续，裂缝不断延长和增多，刚性箱与软连接箱交界处相继有裂缝产生并横向贯通，出现了脱离土表并随振动而滚动的土颗粒，土表出现局部塌陷与上升的现象。

通过土体在纵向一致、非一致激励下自由场模型试验的对比发现：在一级加载（0.25g）时一致激励与非一致激励下箱体均无明显位移，而随着加载等级的增加，非一致激励的箱体位移逐渐明显，土体表面裂缝逐渐增多并横向贯通。

3.2 自由场土体的动力特性

通过白噪声扫频试验，得出模型场地的自振频率和阻尼比。根据文献[27]方法，采用自编的 MATLAB 程序求台面测点对土体表面测点的加速度时程的自功率谱密度函数、互功率谱密度函数及相干函数，互谱的相位角在 0° 或 180° 附近，相干函数在 0.8~1.0 之间自谱所对应峰值即为系统的自振频率，根据频谱图半功率带宽法计算阻尼比。选取表层埋置的 ZA_{X14} 监测点为例，表 3 给出了各加载工况时自由场土体的频率和阻尼比。通过对纵向地震动作用下自由场动力特征参数进行分析，可知：在一致、非一致激励下，随着加载等级的增加、地震动加载时间的持续，自由场土体的频率和阻尼比均会产生变化，大体上呈现频率降低、阻尼比增大的趋势，自由场土体的非线性逐渐增强，土体结构性逐渐破坏。

表 3 纵向水平地震激励下自由场动力特性
Table 3 Dynamic response of free field soil under longitudinal seismic excitations

一致激励			非一致激励		
加载工况	频率/Hz	阻尼比/%	加载工况	频率/Hz	阻尼比/%
0.25g	7.82	4.46	0.25g	7.42	5.53
0.50g	7.16	6.43	0.50g	6.90	5.51
1.00g	6.22	7.11	1.00g	6.73	8.02

通过对比分析发现，除个别工况外，非一致激励下土体的频率较一致激励时略低，而阻尼比略大，说明非一致激励下土体结构性破坏较一致激励时严重，土的动剪切强度和动剪切模量逐渐变小，土体

表现出显著的非线性特性。

3.3 加速度峰值放大系数

图 9 是监测断面 1（3 号箱）自下而上各测点在不同地震动、不同加载等级下的加速度放大系数，加速度放大系数定义为土体中测点的加速度峰值与台面加速度峰值的比值。

一致激励下，在一级加载（0.25g）时，自下而上各监测点的加速度放大系数呈逐渐增大的趋势，且均大于 1；在二级加载（0.50g）时，自下而上各监测点的加速度放大系数呈现先增大，再减小，再增大的趋势，且均大于 1；在三级加载（1.00g）时，自下而上各监测点的加速度放大系数变化在 3 种地震动输入下则表现出差别。其中，Elcentro 地震动下大体呈现增长趋势，且放大系数值大于 1；Kobe 波下呈现先增大、后减小、再增大的趋势，放大系数值在 1 左右浮动；北京人工地震动下呈现先减小、再增大的趋势，但放大系数值基本上小于 1。这些现象说明，在一级加载（0.25g）时，土体对输入地震动有一定的放大作用；在二级加载（0.50g）时，模型场地土体底部变得较为密实，土体有一定的放大作用，而随着上部土体的结构性发生变化，土体放大作用减小；在三级加载（1.00g）时，不同地震动输入下加速度放大系数表现出的差别说明土体加速度响应不仅与加载等级有关，还与输入地震动本身的特性有关。

非一致激励下，在不同地震动、不同加载等级下，加速度放大系数变化呈先减小后增大的趋势，基本上小于 1；且随着地震动加载等级的增加，同一测点的加速度放大系数逐渐减小。这些现象说明，在纵向非一致激励作用下，软连接箱体底部的拉压运动使得各箱体中土体运动不一致，导致了土体结构性的变化，土体刚度弱化，放大效应减弱。随着高度的增加拉压作用减弱，放大系数又逐渐增大，随着加载等级的增加，这种作用逐渐加剧。

通过对比发现，与一致激励下相比，非一致激励下土体的加速度放大系数均降低，且小于 1；同一地震动、不同加载等级下加速度放大系数曲线趋势大致相同，但不同地震动作用下加速度放大系数不同。说明在纵向非一致激励下，沿线土体运动不一致导致了土体刚度弱化，放大效应减弱，土体具有了减震隔震的作用；不同的地震动输入方式、不同地震动及不同的加载等级对自由场加速度响应的峰值变化有着重要的影响。

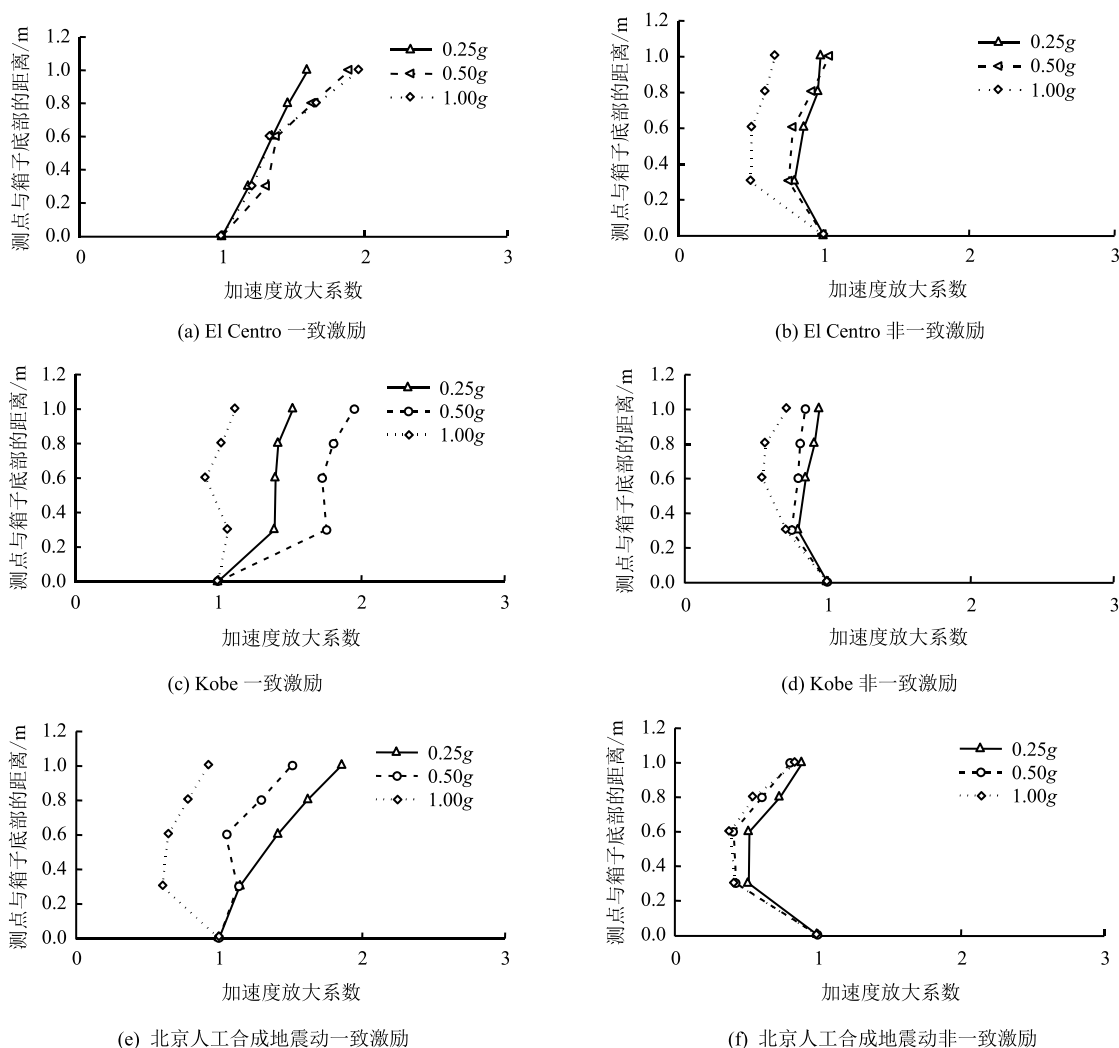


图9 监测断面1的加速度放大系数

Fig.9 Acceleration amplification factors of monitoring section 1

3.4 加速度时程及其傅氏谱

监测断面1(3号箱)自下而上各测点加速度计分别是 ZA_{X18} 、 ZA_{X17} 、 ZA_{X16} 、 ZA_{X15} 、 ZA_{X14} 。限于篇幅,笔者选取北京人工合成地震动进行分析。

图10、11是北京人工合成地震动一致、非一致激励下,加载等级为0.25g时自下而上各监测点的加速度时程及其傅氏谱。一致激励下,土体加速度自下而上逐渐增大,土体底部测点加速度反应的频谱组成丰富且分布较均匀,上部测点在5~10 Hz范围内频谱幅值明显放大,清楚地表现了土体的低频放大作用。非一致激励下,加速度自下而上呈现先减小后增大的趋势,土体自下而上频谱幅值逐渐增大,尤其在20~25 Hz、30~35 Hz高频段内也均表现出明显的放大作用,出现多峰现象,各测点的频谱分布较为均匀。

图12、13是北京人工合成地震动一致、非一致激励作用下,加载等级为1.00g时自下而上各监测点的加速度时程及其傅氏谱。一致激励下,土体加

速度总体上是变大的,但与加载等级0.25g时的变化规律有所不同的是,土体加速度有先减小、后增大的过程;傅氏谱的变化规律与加载等级0.25g时除表现出明显的土体低频放大作用外,高频过滤作用也较明显。非一致激励下,土体加速度和傅氏谱与加载等级0.25g时的变化基本一致,频率组成更为丰富,且呈现多峰现象。

通过对比分析发现,与一致激励下相比,非一致激励下土体的加速度峰值和频谱峰值均有降低,加速度峰值略小,频谱峰值减小两倍左右,频谱组成更丰富,呈现多峰现象。这说明在非一致激励下,随着加载等级的增加,土体表现出了明显的非线性特性,土体刚度随应变增加而减小,阻尼则增大,阻尼增大使土体加速度减小;受非一致激励作用下相位差的影响,在地震动传播方向的叠加作用使得土体的地震响应较为复杂,频谱组成更为丰富,呈现多峰现象。

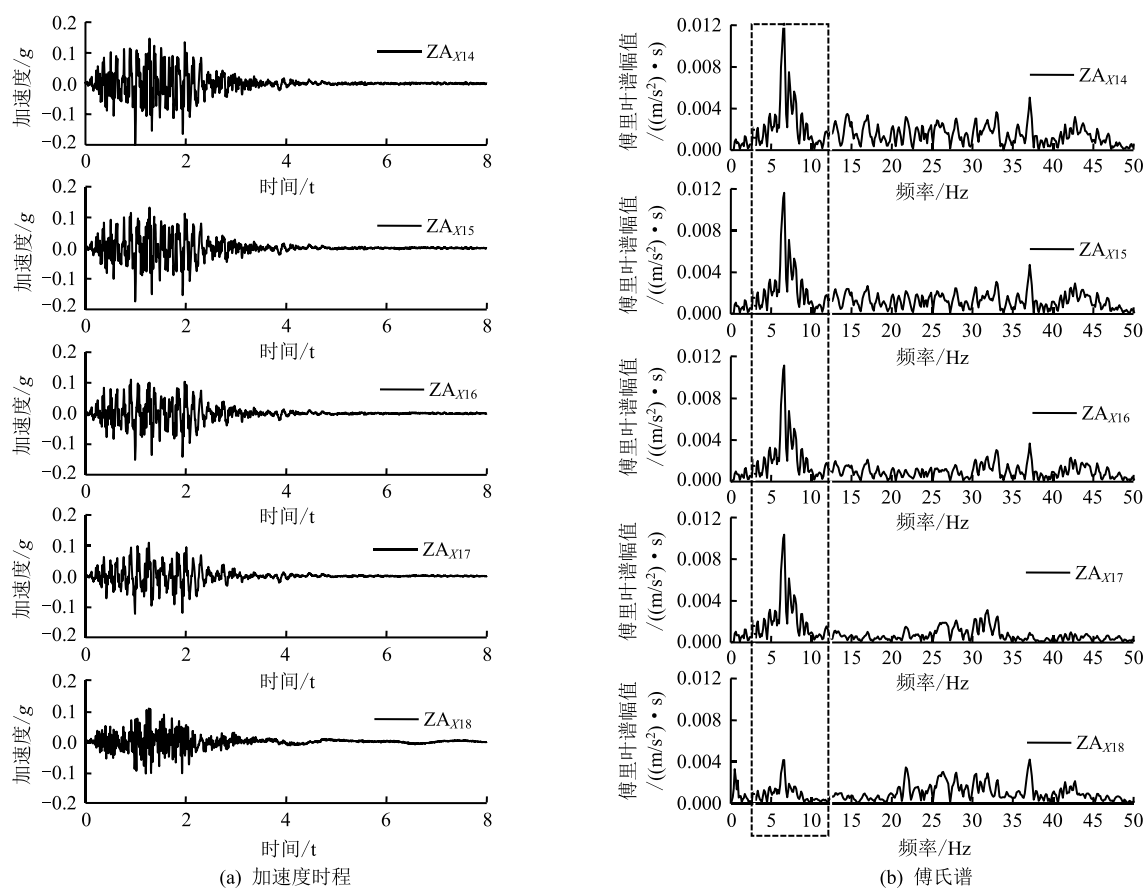


图 10 不同深度测点的加速度时程及其傅氏谱 (0.25g 一致激励)

Fig.10 Acceleration time histories and their Fourier spectrum (0.25g uniform excitations) of monitoring point at different depths

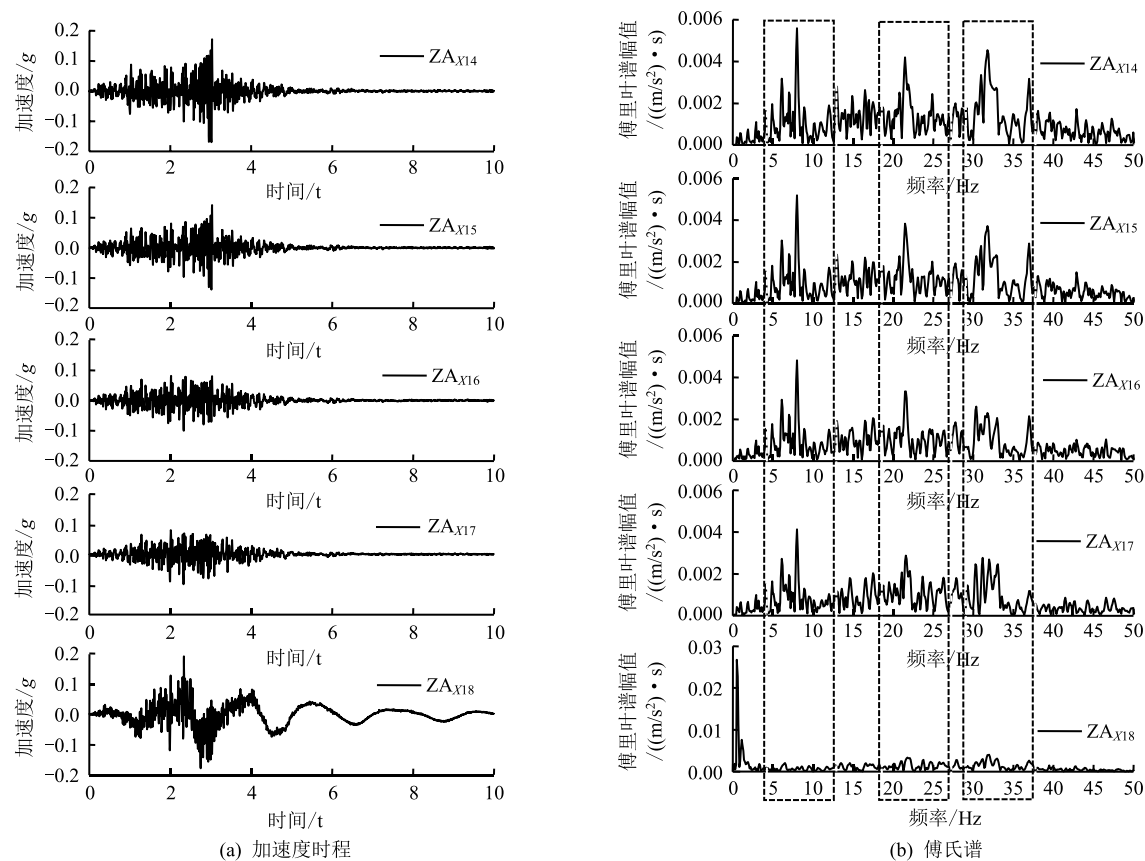


图 11 不同深度测点的加速度时程及其傅氏谱 (0.25g 非一致激励)

Fig.11 Acceleration time histories and their Fourier spectrum (0.25g non-uniform excitations) of monitoring point at different depths

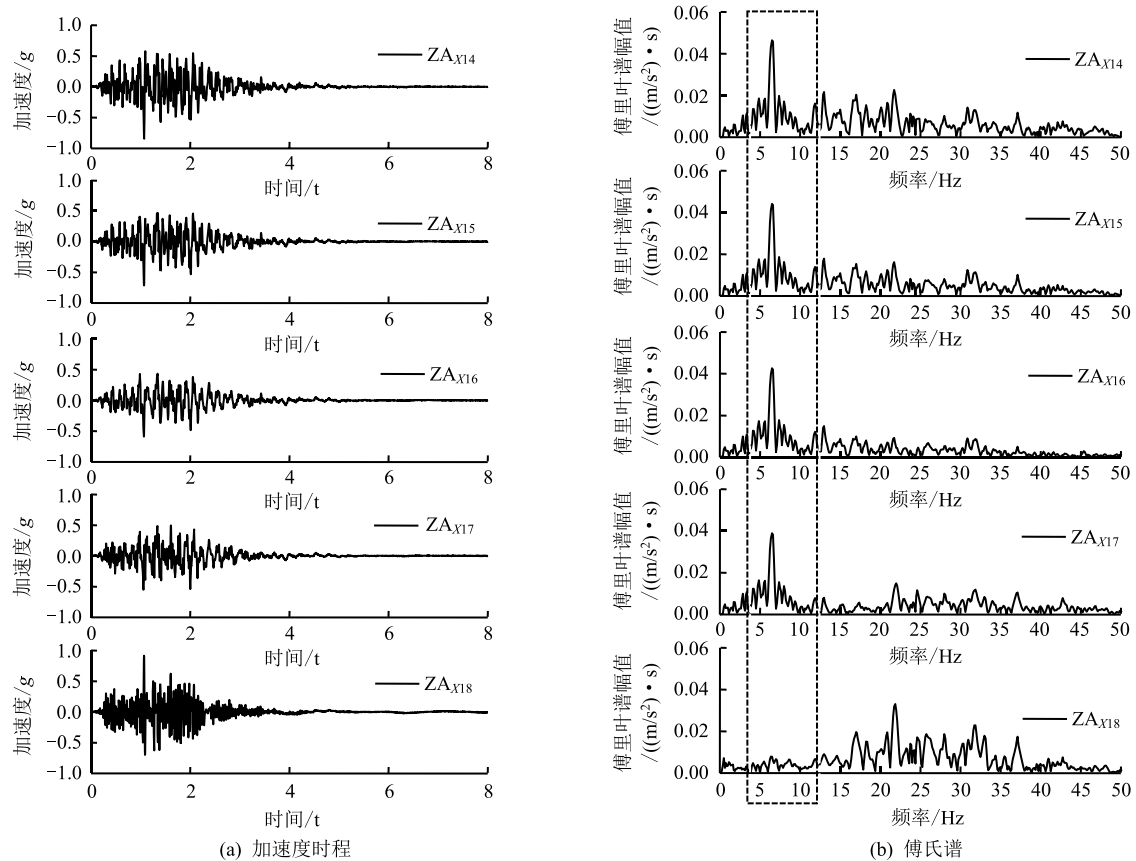


图 12 不同深度测点的加速度时程及其傅氏谱 (1.00g 一致激励)

Fig.12 Acceleration time histories and their Fourier spectrum (1.00g uniform excitations) of monitoring point at different depths

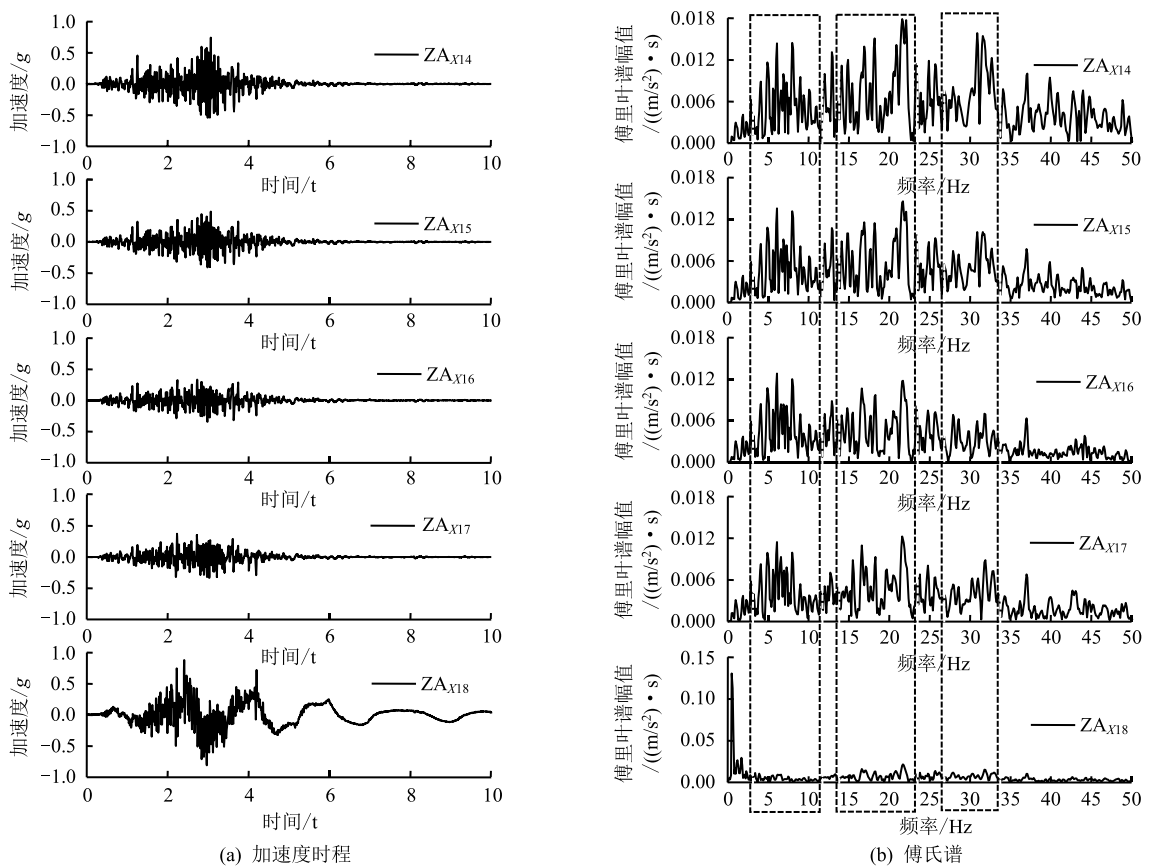


图 13 不同深度测点的加速度时程及其傅氏谱 (1.00g 非一致激励)

Fig.13 Acceleration time histories and their Fourier spectrum (1.00g non-uniform excitations) of monitoring point at different depths

3.5 土体动剪应力-动剪应变

采用基于加速度记录的线性插值法反演土体的动剪应力-动剪应变响应过程^[28]。假定土层侧面沿重力方向动态变形符合一维剪切梁模型，地表为剪应力和剪应变恒等于 0 的自由表面。基于振动台试验中竖向自下而上各测点加速度建立的循环剪应力-剪应变反演模型，得到了自由场中砂土在地震动激励过程中的动剪应力-剪应变关系。图 14 为北京人工合成地震动输入下，纵向一致、非一致激励下土体分别在加载等级为 0.25g、0.50g、1.00g 时的表层土体剪应力-剪应变曲线。在一致激励下，一级加载（0.25g）时，土体剪应力-剪应变曲线大致呈单调线性往复循环发展，最大应力为 0.293 kPa 时应变达到 0.009%，说明土体尚未进行非线性发展阶段；二级加载（0.50g）时，滞回曲线除在核心区发展外，

模型土体已经有了一定的非线性发展，最大剪应力为 0.622 kPa，最大剪应变达到了 0.021%，最大剪应力和最大剪应变已不对应；三级加载（1.00g）时，土体进入强烈非线性发展阶段，最大剪应力为 1.063 kPa 时，最大剪应变达到了 0.062%。在非一致激励下，一级加载（0.25g）时，土体剪应力-剪应变曲线大致呈单调线性往复循环发展，最大剪应力为 0.152 kPa 时应变达到 0.006%，说明土体尚未进行非线性发展阶段；二级加载（0.50g）时，滞回曲线除在核心区发展外，模型土体已经有了一定的非线性发展，最大剪应力为 0.314 kPa 时，最大剪应变达到了 0.01%，最大剪应力和最大剪应变已不对应；三级加载（1.00g）时，土体进入强烈非线性发展阶段，最大剪应力为 0.371 kPa 时，最大剪应变达到了 0.043%。

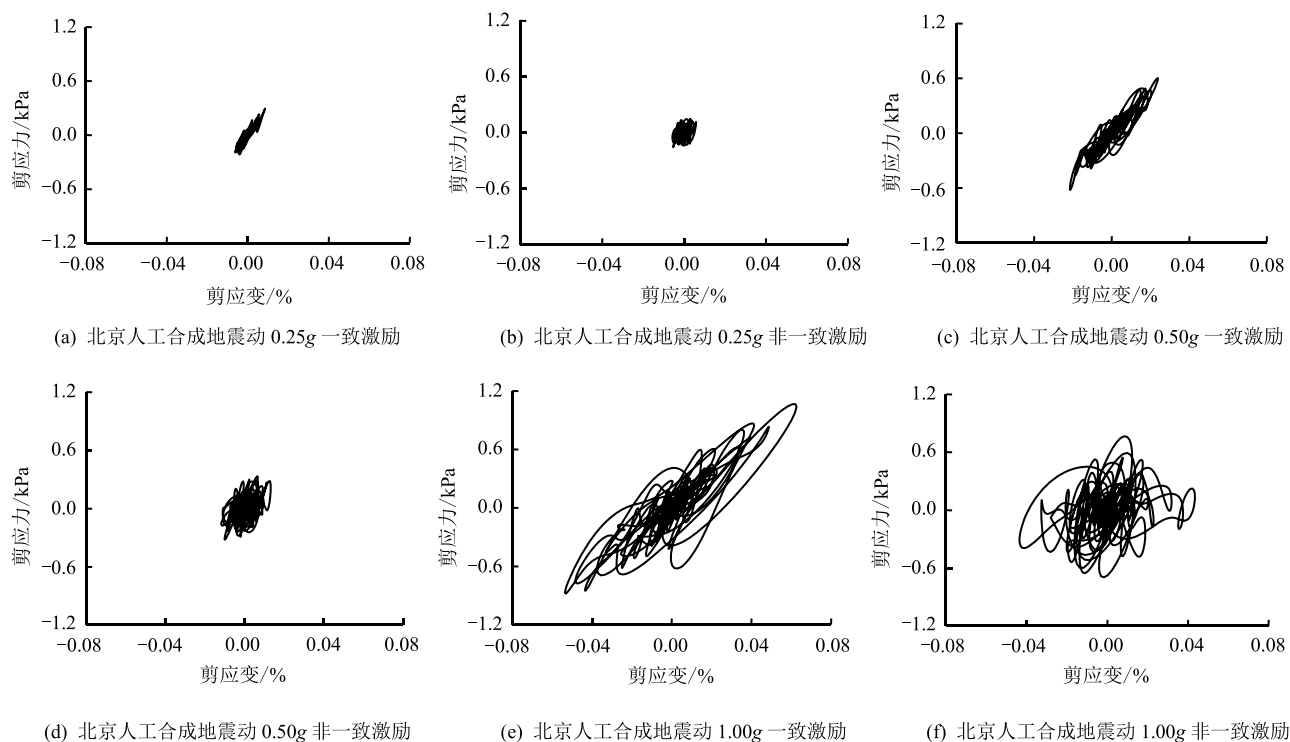


图 14 表层土体剪应力-剪应变曲线

Fig.14 Shear stress-shear strain curves of surface soil

通过对比发现，一致激励和非一致激励时，随着加载等级的增加，剪应力、剪应变均逐渐增大。与一致激励相比，随加载等级的增加，非一致激励下剪应变的增幅较大，在三级加载时甚至剪应力基本不变的情况下，剪应变也在增长，说明非一致激励下，土体剪应变的增幅较剪应力的增幅大，土体非线性加剧，剪切模量显著衰减。

3.6 竖向沉降

图 15 为纵向一致、非一致激励下场地土体分别

在加载等级为 0.25g、0.50g、1.00g 时的竖向沉降曲线。激光位移计布置于刚性箱体 1、3、5 土表面上方，初始值为激光位移计探头到土表的距离，数值变大，说明土表沉陷，数值变小，说明土表隆起。由图 15 可知，在一致激励加载等级为 0.25g 和 0.50g 时，土体变形量很小，变化不明显，说明在小震作用时土体整体性能良好，基本处在弹性阶段；随着加载等级的提高，土体发生了明显的位移，最高达到了 0.63 mm，此时土体发生了不同程度的塌陷，

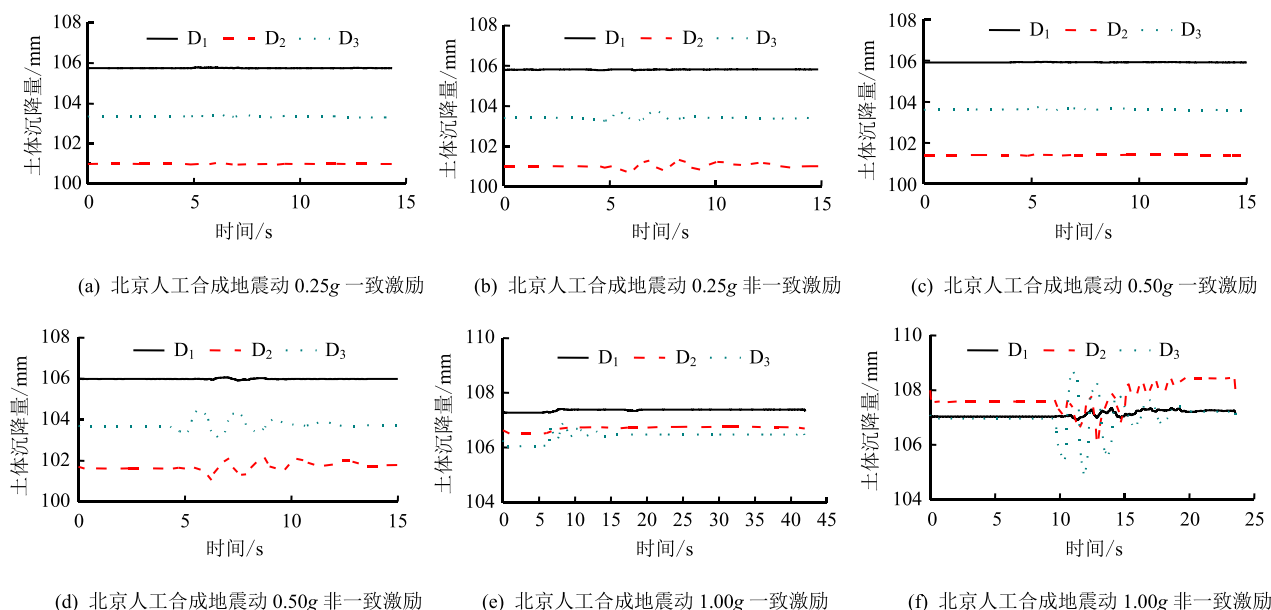


图 15 土体竖向沉降曲线
Fig.15 Soil vertical settlement curves

说明在强震作用时土体结构发生了破坏,进入了塑性阶段,表现出了较强的非线性特性。而在非一致激励加载等级为 0.25g 时,土体表面已产生了细小的沉降变化。在加载等级为 0.50g 时,这种沉降变化更为显著,最高达到了 0.73 mm,此时土体已经表现出轻微的非线性特性;在加载等级为 1.00g 时,最高达到了 2.2 mm,土体表现出较强的非线性特性。通过对比发现,同一加载等级下,非一致激励土体的沉降量相对较大,这与前述场地加速度反应所得非一致激励下土体表现出较强的非线性特性的结论吻合。

4 结 论

(1) 与一致激励相比,非一致激励下,随着加载等级的增加和振动时间的持续,土体表面产生裂缝并相继贯通,出现局部塌陷与上升的现象,土体的竖向沉降数据亦显示非一致激励下土体表面的沉降相对较大。

(2) 与一致激励相比,非一致激励下土体的加速度放大系数均降低,且小于 1,这是由于非一致激励下,土体运动不一致,导致了土体结构性的变化,土体刚度弱化,放大效应减弱,随着高度的增加拉压作用减弱,放大系数又逐渐增大。但在不同地震动作用下加速度放大系数大小不同,说明地震动输入情况对土体自由场地地震响应的幅值、强度有重要影响

(3) 与一致激励相比,非一致激励下土体的加

速度峰值和频谱峰值均有降低,加速度峰值相对略小,频谱峰值减小两倍左右,受非一致激励作用下相位差的影响,在地震动传播方向的叠加作用使得土体的地震响应较为复杂,频谱组成更为丰富,呈现多峰现象。

(4) 与一致激励相比,非一致激励下土体的频率略低,阻尼比略大,说明土体结构性破坏较严重,土体较易表现出显著的非线性特性;随着加载等级的增加和振动时间的持续,土体剪应力曲线逐渐呈非线性变化,非一致激励时土体的剪应力较小,但土体剪应变的增幅大于剪应力的增幅,且在 1.00g 加载时剪应力基本不变的情况下,剪应变也在增长。

参 考 文 献

- [1] 郑永来, 杨林德, 李文艺, 等. 地下结构抗震 (第一版) [M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.
ZHENG Yong-lai, YANG Lin-de, LI Wen-yi, et al. Underground structure aseismic (First edition)[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2005.
- [2] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. **Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division**, 1968, 94(4): 1003—1031.
- [3] 廖振鹏. 地震小区划-理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
LAO Zhen-peng. Earthquake community planning-theory and practice[M]. Beijing: Earthquake Press, 1989.
- [4] 梁建文, 于军港, 张季, 等. 基于黏弹性边界的地下隧

- 道非线性地震响应分析模型[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 434—440.
- LIANG Jian-wen, YU Jun-gang, ZHANG Ji, et al. A nonlinear seismic response analysis model for underground tunnels based on the viscous-spring boundary[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2014, 36(3): 434—440.
- [5] 李小军. 非线性土层地震反应分析的一种方法[J]. 华南地震, 1992, 12(4): 1—8.
- LI Xiao-jun. A method for analyzing seismic response of nonlinear soil layers[J]. **South China Journal of Seismology**, 1992, 12(4): 1—8.
- [6] 栾茂田, 林皋. 土料非线性滞回本构模型的半解析半离散构造方法[J]. 大连理工大学学报, 1992, 32(6): 694—701.
- LUAN Mao-tian, LIN Gao. Semi-analytical and semi-discrete procedure for constructing nonlinear hysteretic constitutive model of soils[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1992, 32(6): 694—701.
- [7] 栾茂田, 林皋. 场地地震反应一维非线性计算模型[J]. 工程力学, 1992, 9(1): 94—103.
- LUAN Mao-tian, LIN Gao. Computational model for nonlinear analysis of soil site seismic response[J]. **Engineering Mechanics**, 1992, 9(1): 94—103.
- [8] 金星, 孔戈, 丁海平. 水平成层场地地震反应非线性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3): 38—43.
- JIN Xin, KONG Ge, DING Hai-ping. Nonlinear seismic response analysis of horizontal layered site[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2004, 24(3): 38—43.
- [9] 杨繁, 王敏, 王国波, 等. 自由场地土体非线性地震响应研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 117—122.
- YANG Fan, WANG Min, WANG Guo-bo, et al. Research on nonlinear seismic responses of free-field soil[J]. **China Safety Science Journal**, 2014, 24(7): 117—122.
- [10] 陈斌, 张栋梁, 张春进, 等. 宁波深厚软土动力特性研究及其地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(3): 338—343.
- CHEN Bin, ZHANG Dong-liang, ZHANG Chun-jin, et al. A analysis of dynamic characteristics and seismic response of deep soft in Ningbo area[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2016, 38(3): 338—343.
- [11] 齐文浩, 王振清, 薄景山. 土层非线性地震反应分析方法及其检验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(4): 444—450.
- QI Wen-hao, WANG Zhen-qing, BO Jin-shan. Development and verification of a method for analyzing the nonlinear seismic response of soil layers[J]. **Journal of Harbin Engineering University**, 2010, 31(4): 444—450.
- [12] 杨笑梅, 赖强林. 二维土层地震反应分析的时域等效线性化解法[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 847—856.
- YANG Xiao-mei, LAI Qiang-lin. Time domain equivalent linearization solution for the seismic response analytic of two dimension soil sites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 847—856.
- [13] 李瑞山. 新一代土层地震反应分析方法研究[J]. 国际地震动态, 2017, (7): 41—42.
- LI Rui-shan. Research on a new generation technique for ground seismic response analysis[J]. **Recent Development in World Seismology**, 2017, (7): 41—42.
- [14] 刘晶波, 王艳. 成层半空间出平面自由波场的一维化时域算法[J]. 力学学报, 2006, 38(2): 219—225.
- LIU Jin-bo, WANG Yan. A 1-D time-domain method for 2-D wave motion in elastic layered half-space by antiplane wave oblique incidence[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2006, 38(2): 219—225.
- [15] 刘晶波, 王艳. 成层介质中平面内自由波场的一维化时域算法[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 16—22.
- LIU Jin-bo, WANG Yan. A 1D time-domain method for in-plane wave motion of free field in layered media[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(7): 16—22.
- [16] ZHAO M, YIN H Q, DU X L, et al. 1D finite element artificial boundary method for layered half space site response from obliquely incident earthquake[J]. **Earthquakes and Structures**, 2015, 9(01): 173—194.
- [17] ZHAO M, GAO Z D, WANG L T, et al. Obliquely incident earthquake input for soil-structure interaction in layered half space[J]. **Earthquakes and Structures**, 2017, 13(6): 573—588.
- [18] 殷琳, 楼梦麟, 康帅. 地下结构地震反应的振动台模型试验研究[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2015, 43(10): 1471—1479.

- YIN Lin, LOU Meng-lin, KANG Shuai. Analysis of shaking table test on underground structure[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2015, 43(10): 1471—1479.
- [19] 马洪生, 庄卫林, 范刚, 等. 水平成层场地地震响应及地层分界面动力特性研究[J]. **公路工程**, 2016, 41(2): 123—128.
- MA Hong-sheng, ZHUANG Wei-lin, FAN Gang, et al. Research on seismic response of horizontal layered site and seismic behavior of interface[J]. **Highway Engineering**, 2016, 41(2): 123—128.
- [20] 吴祚菊, 张建经, 王志佳, 等. 地震动场地放大效应的时频特性分析[J]. **岩土力学**, 2017, 38(3): 685—695.
- WU Zuo-ju, ZHANG Jian-jing, WANG Zhi-jia, et al. Time-frequency analysis on amplification of seismic ground motion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 685—695.
- [21] 杜修力, 韩俊艳, 李立云. 埋地管道振动台试验设计中相似关系的选取[J]. **防灾减灾工程学报**, 2013, 33(3): 246—252.
- DU Xiu-li, HAN Jun-yan, LI Li-yun. Selection of shaking table test similarity relations for long-distance buried pipeline[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2013, 33(3): 246—252.
- [22] 杜修力, 韩俊艳, 李立云, 等. 用于多台阵振动台试验实现地震动输入可控连续体模型箱. 中国: ZL201320123152.1[P]. 2013.
- DU Xiu-li, HAN Jun-yan, LI Li-yun, et al. Application of multi array vibration table test to realize seismic input controlled continuum model box. China: ZL201320123152.1[P]. 2013.
- [23] 韩俊艳, 杜修力, 李立云. 土工振动台试验连续体模型箱的适用性研究[J]. **地震工程与工程振动**, 2013, 33(2): 200—208.
- HAN Jun-yan, DU Xiu-li, LI Li-yun. Study on applicability of continuum model box used in shaking table test[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2013, 33(2): 200—208.
- [24] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤, 等. 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, 20(4): 30—36.
- LOU Meng-lin, WANG Wen-jian, ZHU Tong, et al. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(4): 30—36.
- [25] 中国建筑科学研究院. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- China Academy of Building Research. GB50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [26] 韩俊艳. 埋地管道非一致激励地震反应分析方法与振动台试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- HAN Jun-yan. The analysis method and shaking table test of buried pipeline under non-uniform seismic excitation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [27] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- WANG Ji, HU Xiao. The application of MATLAB in vibration signal processing[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.
- [28] 王永志, DANIEL W W, MOHAMMAD K, 等. 动力离心模型试验循环剪应力-剪应变反演方法对比[J]. **岩土工程学报**, 2016, 38(2): 271—277.
- WANG Yong-zhi, DANIEL W W, MOHAMMAD K, et al. Evaluation of cyclic shear stress-strain using inverse analysis techniques in dynamic centrifuge tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(2): 271—277.