

刘春辉,翁建燎,孔璟常,等.地震波对干砂场地土层加速度放大系数影响分析[J].地震工程学报,2022,44(6):1287-1293.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220808002

LIU Chunhui, WENG Jianliao, KONG Jingchang, et al. Influence of seismic waves on acceleration amplification factor of soil in a dry sand site[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(6): 1287-1293. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220808002

地震波对干砂场地土层加速度放大系数影响分析

刘春辉¹, 翁建燎¹, 孔璟常¹, 张梦子¹, 卢龙玉¹, 王永志²

(1. 烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005;

2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为研究土体加速度在向上传递时,不同地震动对其峰值的影响,设计制作了干砂场地离心振动台试验,通过对比得出加速度放大系数沿深度变化的规律。结果表明:地震动加速度幅值越大,其沿深度变化的放大系数越小;在波的幅值增大时,其放大系数存在一定的衰减率,且衰减率随着幅值的增大而减小;在相同幅值不同频谱特性地震动作用下,等幅正弦波的加速度放大系数最大,LEAP波其次,El-Centro波最小。土体加速度放大系数及其衰减率的分析有助于研究场地的动力响应变化规律,对抗震设计具有一定参考价值。

关键词: 离心机振动台试验; 加速度; 放大系数; 衰减率; 干砂场地

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)06-1287-07

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220808002

Influence of seismic waves on acceleration amplification factor of soil in a dry sand site

LIU Chunhui¹, WENG Jianliao¹, KONG Jingchang¹, ZHANG Mengzi¹, LU Longyu¹, WANG Yongzhi²

(1. College of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: A centrifugal shaking table test on a dry sand site was designed and conducted to study the influence of different seismic waves on the peak value of soil acceleration during its upward transmission, and the variation law of acceleration amplification factor along the depth was obtained by comparison. Results show that the amplification factor of ground motion acceleration along the depth decreases with the increase in amplitude. Moreover, a certain attenuation rate of the amplification factor is observed when the amplitude of the wave increases, and the attenuation rate decreases with the increase in the amplitude. Under the action of seismic waves with the same amplitude and different frequency spectra, the acceleration amplification factor of the invariable amplitude sine wave is the largest, followed by the LEAP wave, and that of the El-Centro

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908484, 51808479); 山东省自然科学基金资助项目(ZR201807080133, ZR201807080139); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务专项资助项目(2019D09)

第一作者简介: 刘春辉, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为桩基抗震。E-mail: lch_hit@163.com。

通信作者: 孔璟常, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为结构工程抗震。E-mail: kjch8811@126.com。

wave is the smallest. The analysis of the soil acceleration amplification factor and its attenuation rate is helpful in studying the dynamic response of similar sites, which also has a certain reference value for seismic design.

Keywords: centrifugal shaking table test; acceleration; amplification factor; attenuation rate; dry sand site

0 引言

加速度放大系数随深度变化规律的研究,不仅可以探究场地反应的机制,还对埋于地下的结构与管道等工程的抗震设防具有重要的理论意义和实用价值^[1]。针对地震波的场地放大作用,国内已有不少学者通过数据分析与振动台试验等方法展开研究。周燕国等^[2]从时域和频域角度分析了美国加州两个井下台阵记录的地震加速度,得到了易液化深厚覆盖层的地震动放大效应规律,并基于平面波动假定提出了加速度放大效应的简化函数;石玉成等^[3]根据西北黄土场地地震反应的计算结果,分析了黄土覆盖层厚度与地形条件对地震加速度、频率、卓越周期等参数的影响,并提出了相关地震动参数的估算公式;兰景岩等^[4-6]通过中硬自由场与含隧道场地的离心机振动台试验,从多阶振型与反应谱角度分析了地震动的放大效应随深度的变化规律;王云海^[7]分析了渭河盆地土层场地在汶川地震中采集的加速度数据,得到了不同方向的加速度峰值与反应谱的放大系数变化规律;吴祚菊等^[8]利用大型振动台试验研究了均质、斜坡及非均质场地的地震动放大效应,得到了场地表面倾斜程度与场地的土层分布情况对加速度峰值及频率成分的影响规律。李平等^[9]采用频谱法分析了汶川地震中安宁河及邛海周边地区记录到的加速度时程,通过研究不同区域场地对地震动的放大作用,得到了不同区域放大效应的特点以及加速度的频率变化规律。

尽管对地震动场地放大效应的研究已颇为深入,但土体加速度放大系数因地震动幅值改变而衰减的相关文献仍然较少。因此,本试验建立了干砂土层的自由场地模型,利用离心机振动台试验,研究了不同幅值与不同种类的地震动作用下,加速度向上传递过程中幅值的变化情况,提出了放大系数衰减率指标,并揭示了其变化规律,为后续地震动放大效应的研究与抗震设计提供相关资料。

1 试验概况

1.1 试验设备

本试验利用中国地震局工程力学研究所 DCI-

EM 离心机振动台完成,该离心机如图 1 所示。该离心机最大旋转半径为 5.5 m,有效吊篮净空为 1.8 m×1.6 m×1.0 m,有效容量为 300g·t,最大离心加速度为 100g。离心机通过离心高速旋转,使模型土体恢复原型自重应力,达到模型与原始的应力应变相似,从而模拟原位场地模型应力-应变关系。



图 1 离心机试验设备

Fig.1 Centrifuge test equipment

振动台系统振动幅值范围为±15 mm,最大振动加速度为 30g,最大振动速度为 1 m/s,频率范围为 10~300 Hz,台面有效尺寸为 1.6 m×0.8 m×0.8 m,最大负载为 1 500 kg。离心机带动振动台高速旋转过程中振动台由电脑无线控制系统输出地震动,模拟地震动力响应。

试验的干砂场地模型制备于层状剪切模型箱中,该模型箱较好地模拟了场地的自由条件,减小模型箱的边界效应对试验结果的影响,使试验的边界条件更接近真实情况的边界条件。该层状剪切模型箱尺寸为 1.2 m×0.5 m×0.6 m(长×宽×高),模型箱由 12 层叠状方框组成,单层厚度为 50 mm,层间由橡胶连接,使模型箱各层之间可产生相对位移,层间间距约 2 mm,该层状剪切模型箱如图 2 所示。

1.2 模型相似比设计

该离心机振动台试验中的模型与原型有一定的相似比关系,为考虑试验可行性,需对试验模型进行相似设计。刘晶波等^[10]基于 Buckingham^[11]的 π 定理,提出了土-结构动力离心模型试验的主要物理量纲与相似常数。本试验选定离心加速度为 50g,模型与原型的相似关系如表 1 所列。



图 2 层状剪切模型箱

Fig.2 Laminar shear model box

表 1 试验中物理量相似常数

Table 1 Similar constant of physical quantities used in the test

物理量	相似比系数(模型/原型)
长度 l	1/50
面积 A	1/50 ²
体积 V	1/50 ³
质量密度 ρ	1
弹性模量 E	1
惯性矩 I	1/50 ⁴
抗弯刚度 EI	1/50 ⁴
加速度 a	50
振动时间 t	1/50
位移 d	1/50

1.3 模型材料

试验采用砂雨法^[12]制备地基场地,图 3 为砂雨落距与相对密实度的关系图。本试验土层相对密实度为 50%,故取砂雨落距 35 cm。砂土的物理参数见表 2,砂土的粒径分布如图 4 所示。

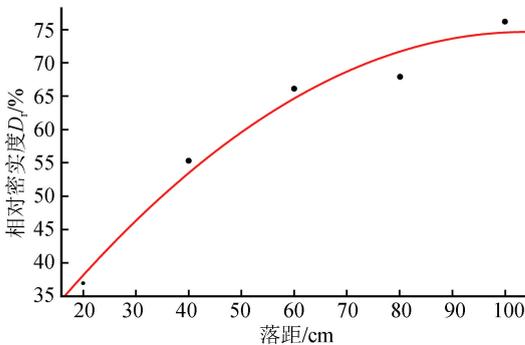


图 3 砂雨落距与相对密度关系图

Fig.3 Relationship diagram between sand falling distance and relative density

1.4 传感器布置情况

本试验采用 PCB 加速度传感器记录地震过程中不同深度的土体加速度时程响应,加速度传感器布置于模型中间,可有效避免模型箱边界对加速度响应的影响。具体传感器布置情况如图 5 所示。

表 2 砂的物理参数

Table 2 Physical parameters of sand

参数	中砂(干砂场地)
比重 G_s	2.655
粒径 D_{10}/mm	0.135
粒径 D_{30}/mm	0.163
粒径 D_{50}/mm	0.188
粒径 D_{60}/mm	0.200
曲率系数 C_c	0.984
不均匀系数 C_r	1.481

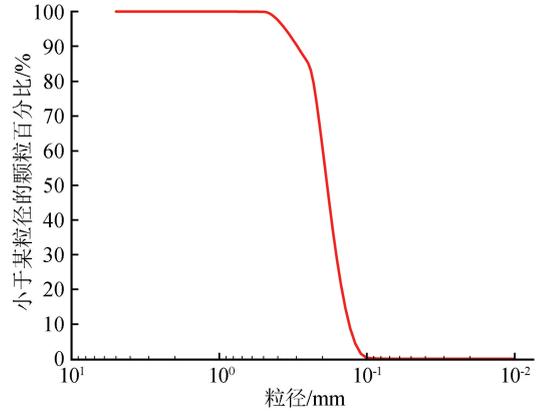


图 4 砂粒径分布图

Fig.4 Particle size distribution of sand

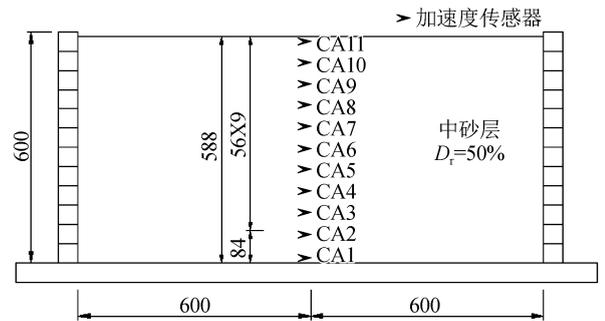


图 5 试验传感器布置图(单位:mm)

Fig.5 Layout diagram of test sensors (Unit:mm)

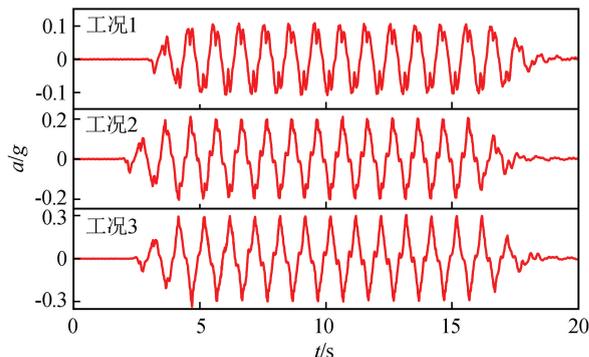
1.5 加载方案与试验工况

离心机从开机达到 50g 的离心加速度需要一段过程,为保证模型在加速过程中不因突然的加速旋转而发生破坏,对离心机进行阶段性增速。增速后各阶段加速度顺序分别为 2g、4g、6g、8g、10g、20g、30g、40g、50g,待上阶段各项数据稳定后加速至下一阶段。当离心机加速度达到预期(50g)并稳定后,对振动台输入地震动。为研究地震波幅值与种类对土体加速度放大系数的影响,本试验根据多遇地震下,不同抗震设防烈度等级的要求,选用了幅值、频谱特性不同的 11 条地震动,输入工况参数如表 3 所列,具体输入工况时程如图 6 所示。

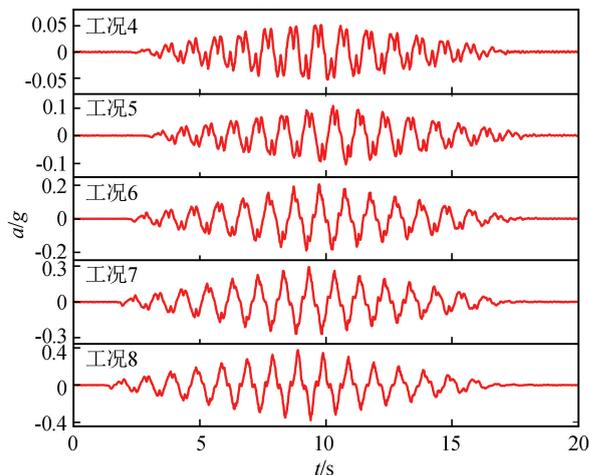
表3 输入工况参数

Table 3 Parameters of input conditions

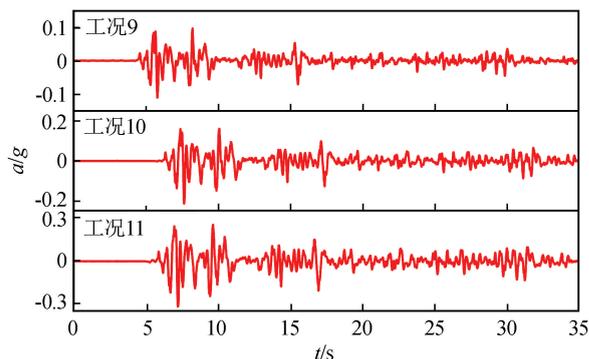
工况编号	地震波种类	加速度峰值 g	地震波持时/s
1	正弦波	0.108	20
2	正弦波	0.212	20
3	正弦波	0.336	20
4	LEAP波	0.053	20
5	LEAP波	0.107	20
6	LEAP波	0.207	20
7	LEAP波	0.294	20
8	LEAP波	0.381	20
9	El-Centro波	0.110	35
10	El-Centro波	0.212	35
11	El-Centro波	0.271	35



(a) 正弦波工况



(b) LEAP波工况



(c) El-Centro波工况

图6 输入工况时程图

Fig.6 Time history of input conditions

2 试验结果分析

本文通过分析离心机振动台试验获得的数据,主要研究了地震动的种类与幅值大小对土体加速度峰值变化的影响。为了更加客观地反映加速度幅值的变化情况,本文引入“放大系数”参数,该参数计算方法如下:

$$f = a_i / a_1$$

式中: f 为加速度放大系数; a_i 为某深度处加速度峰值; a_1 为基底加速度峰值。

2.1 地震动幅值

图7为不同幅值正弦波作用下,土体加速度放大系数沿深度变化的曲线图。

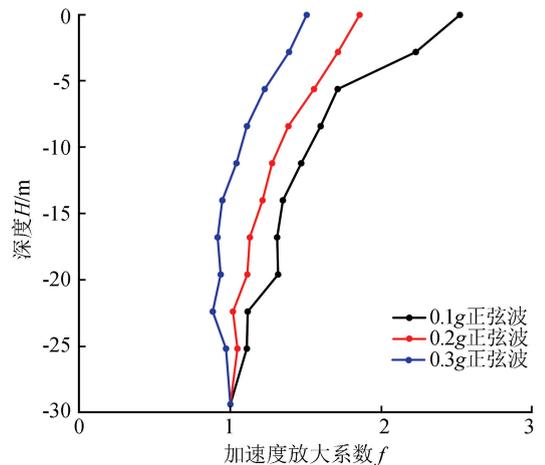


图7 不同幅值正弦波的加速度放大系数

Fig.7 Acceleration amplification factor of sine wave with different amplitudes

由图7可得,在正弦波作用下,干砂场地中的加速度放大系数随着深度的减小,总体呈增大趋势。其中,0.1g作用下的加速度放大系数最大,在0 m处达到最大值2.52。0.3g作用下放大系数最小,在0 m处达到最大值1.51。

另外,在幅值增大时,土体表面的放大系数存在衰减率,即幅值较小两个波的放大系数差值大于幅值较大两个波的放大系数差值。当地震波幅值从0.1g增大至0.2g时,其放大系数衰减率为26.4%,当幅值从0.2g增大至0.3g时,其放大系数衰减率为18.9%。

图8为不同幅值LEAP波作用下,土体加速度放大系数沿深度变化的曲线图。

由图8可得,在LEAP波作用下,放大系数的变化趋势与正弦波相同。其中,0.05g作用下的加

速度放大系数最大,在 0 m 处达到最大值 2.47。0.4g 作用下放大系数最小,在 0 m 处达到最大值 1.41。而 0.2g 地震波作用下,0 m 处的加速度放大系数略小于 0.3g。

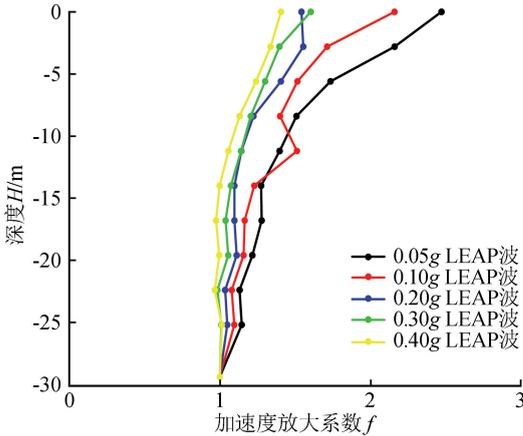


图 8 不同幅值 LEAP 波加速度放大系数

Fig.8 Acceleration amplification factor of LEAP wave with different amplitudes

并且从该图中可以得出,0.2g、0.3g 与 0.4g 三个工况的放大系数相差较小,0.05g 与 0.1g 的放大系数相差较大。其衰减率按地震波幅值从小到大排序依次为 12.7%、28.6%、4.0%、12.3%。

图 9 为不同幅值 El-Centro 波作用下,土体加速度放大系数沿深度变化的曲线图。

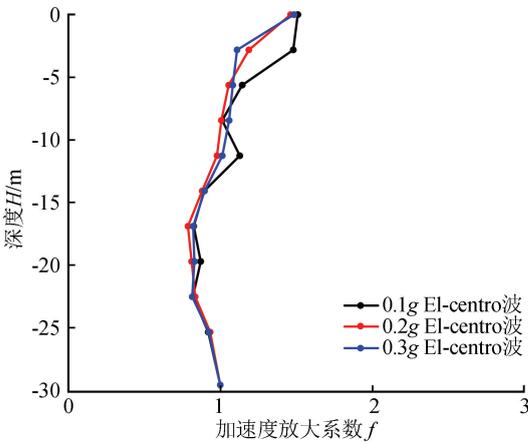


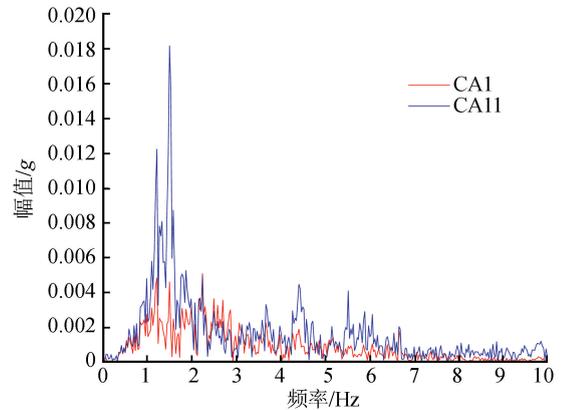
图 9 不同幅值 El-Centro 波加速度放大系数

Fig.9 Acceleration amplification factor of El-Centro wave with different amplitudes

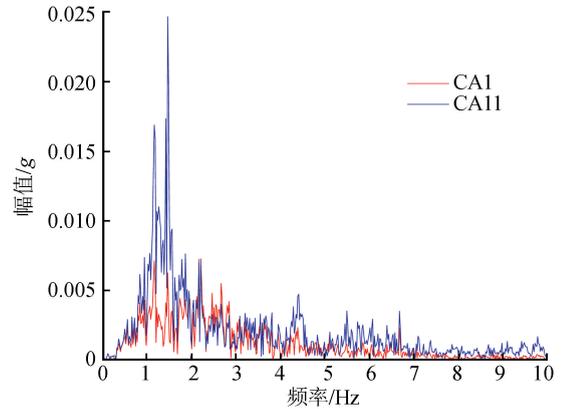
由图 9 可得,不同幅值 El-Centro 波作用下的加速度放大系数相差较小。其中,0.1g 作用下的放大系数相较最大,在 0 m 处达到最大值 1.51。0.2g 作用下放大系数相较最小,在 0 m 处达到最大值 1.46。在深度为 23~29 m 处,不同幅值 El-Centro

波作用下的放大系数均小于 1,说明在该深度处,土体加速度在传递过程持续减小。并且可以得出,0.1g 地震波作用下,放大系数变化波动较大。当地震波幅值从 0.1g 增大至 0.2g 时,其放大系数衰减率为 3.2%,当幅值从 0.2g 增大至 0.3g 时,其放大系数衰减率为 1.6%。

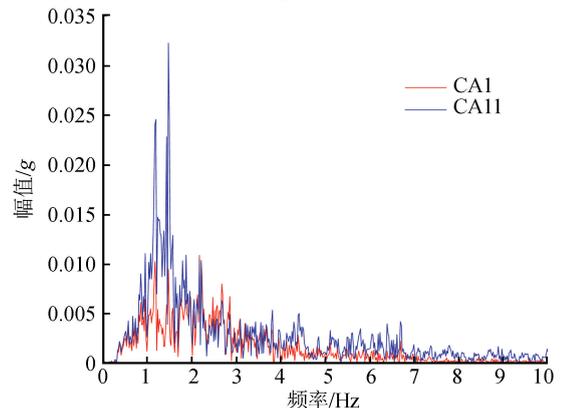
图 10 为 El-Centro 的傅里叶幅值谱图,通过对比土表层(CA11)与基底(CA1)的频谱,有助于分析加速度幅值的变化特征。



(a) 0.1g 傅里叶幅值谱



(b) 0.2g 傅里叶幅值谱



(c) 0.3g 傅里叶幅值谱

图 10 不同幅值 El-Centro 波傅里叶幅值谱
Fig.10 Fourier amplitude spectra of El-Centro wave with different amplitudes

由图 10 可得,地震波的幅值在 2.5~3 Hz 频率之间有所减小,其余频率段都有所增大,在 1.2~1.8 Hz 频率之间增长幅度最大。其中,0.1g 地震波作用下,主频段的幅值增大倍数为 3.6,0.2g 与 0.3g 地震波作用下,主频段的幅值增大倍数均为 3.3。

综上所述,在同一种类不同峰值的地震动作用下,其加速度在向上传递过程中的放大系数不同。地震波幅值较小时,其放大系数大,放大作用较强;随着幅值的增大,其放大系数减小,放大作用减弱^[13]。这是因为在强振动过程中,砂土颗粒之间的吸附力无法抵抗振动引起的作用力,因此颗粒间隙增大,不利于加速度向上传递。同时,由于强震作用下干砂场地土体的非线性,在输入波的幅值逐渐增大时,放大系数衰减率将逐渐减小。

2.2 地震动种类

为研究地震动特性对加速度放大系数的影响,试验对比了相同峰值,不同种类地震动作用下的放大系数结果,如图 11 所示。需要说明的是,尽管输入地震动的持时不同,但由于地震动放大系数是土体加速度峰值与输入加速度峰值的比值,因此,可以认为本节中分析的放大系数差异主要由地震动的频谱差异造成。

结果表明,相同峰值不同种类地震动作用下的加速度放大系数不同。在 0.1g 和 0.2g 地震动作用下,正弦波的放大系数最大,El-Centro 波的放大系数最小,LEAP 波与正弦波的放大系数在深度较大处相差较小,随着深度减小,两者差距逐渐增大。在 0.3g 地震动作用下,LEAP 波的放大系数最大,El-Centro 波的放大系数最小,且三者相差均较小。

3 结论

本文通过离心机振动台试验,分析研究了地震动幅值与种类对土体加速度放大系数的影响,得到以下结论:

(1) 加速度传递的放大系数与地震波幅值有关。幅值越小,放大系数越大,放大作用越强;幅值越大,放大系数越小,放大作用越弱。

(2) 在相同种类,不同幅值的地震动作用下,加速度放大系数存在一定的衰减率,受土体的非线性特征影响,放大系数衰减率随着幅值增大而减小。

(3) 不同种类地震波作用下的加速度放大系数不同。在幅值为 0.1g 和 0.2g 时,正弦波的放大系数最大,在幅值为 0.3g 时,LEAP 波的放大系数最大,三种幅值情况下 El-Centro 波的放大系数均最小。

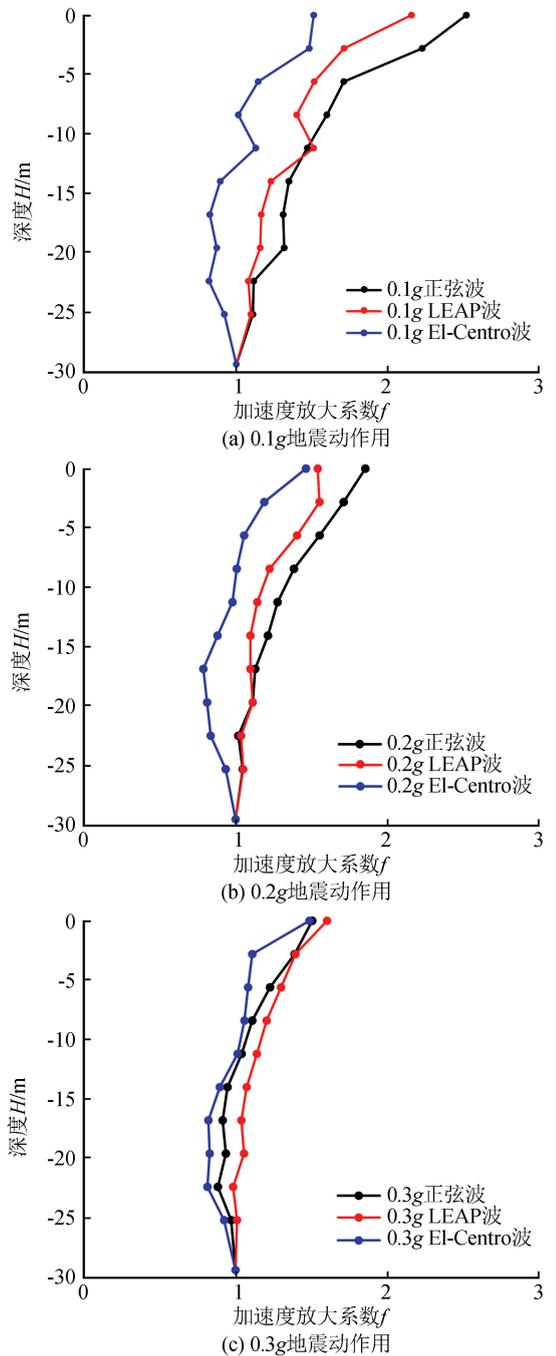


图 11 相同幅值不同种类地震动的加速度放大系数

Fig.11 Acceleration amplification factor of different kinds of waves with the same amplitude

(4) 本试验中,地震波幅值与种类对放大系数影响的结果均在干砂场地试验中对比得出。因液化场地干扰因素过多,两者参数在液化场地中对加速度放大系数的影响还有待研究。

参考文献(References)

- [1] 王海云.土层场地的放大作用随深度的变化规律研究:以金银岛岩土台阵为例[J].地球物理学报,2014,57(5):1498-1509.

- WANG Haiyun. Study on variation of soil site amplification with depth: a case at Treasure Island geotechnical array, San Francisco Bay[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1498-1509.
- [2] 周燕国, 谭晓明, 陈捷, 等. 易液化深厚覆盖层地震动放大效应台阵观测与分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1282-1291. ZHOU Yanguo, TAN Xiaoming, CHEN Jie, et al. Observations and analyses of site amplification effects of deep liquefiable soil deposits by geotechnical downhole array[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1282-1291.
- [3] 石玉成, 王兰民, 张颖. 黄土场地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J]. 西北地震学报, 1999, 21(2): 203-208. SHI Yucheng, WANG Lanmin, ZHANG Ying. Effects of overburden thickness and topography of loessial sites on earthquake ground motion[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999(02): 203-208.
- [4] 兰景岩, 宋锡俊, 刘娟, 等. 地震作用下中硬自由场放大效应随深度的变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3696-3705. LAN Jingyan, SONG Xijun, LIU Juan, et al. Study on the variation ground motion amplification effect of medium-hard free fields with depth under earthquake action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Suppl02): 3696-3705.
- [5] 兰景岩, 王延伟, 刘娟. 基于离心模型试验的中硬自由场放大效应研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 558-565, 625. LAN Jingyan, WANG Yanwei, LIU Juan. Ground motion amplification effect of medium-stiff free field based on centrifugal model tests[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 558-565, 625.
- [6] 兰景岩, 蔡金豆, 吴连斌, 等. 含隧道场地地震动放大效应的深度变化规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2083-2091. LAN Jingyan, CAI Jindou, WU Lianbin, et al. Study on variation law of ground motion amplification effects along depth in tunnel site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2083-2091.
- [7] 王海云. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 137-150. WANG Haiyun. Amplification effects of soil sites on ground motion in the Weihe Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 137-150.
- [8] 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 Zuoju, ZHANG Jianjing, WANG Zhijia, et al. Time-frequency analysis on amplification of seismic ground motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 685-695.
- [9] 李平, 薄景山, 李孝波, 等. 安宁河河谷及邛海地区土层场地对地震动的放大作用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 362-369. LI Ping, BO Jingshan, LI Xiaobo, et al. Amplification effect of soil sites on ground motion in Anning River valley and Qionghai Lake area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 362-369.
- [10] 刘晶波, 赵冬冬, 王文晖. 土-结构动力离心试验模型材料研究与相似关系设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3181-3187. LIU Jingbo, ZHAO Dongdong, WANG Wenhui. Study of model material and scaling laws design of dynamic centrifuge shaking table test for a soil-structure interaction system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl01): 3181-3187.
- [11] BUCKINGHAM E. The principle of similitude[J]. Nature, 1915, 96(2406): 396-397.
- [12] 马险峰, 孔令刚, 方薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1791-1801. MA Xianfeng, KONG Linggang, FANG Wei, et al. Parallel tests on preparation of samples with sand pourer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1791-1801.
- [13] 杨迎春, 钱德玲, 雷超. 桩-土-结构动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(3): 138-141. YANG Yingchun, QIAN Deling, LEI Chao. Experimental study on the dynamic interaction of pile-soil-structure system by shaking table test[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(3): 138-141.