

DOI: 10.11779/CJGE2023S20007

地震动随机性对地表加速度峰值的影响及机理研究

齐文浩^{1,2}, 陈方晓^{1,2}, 李林芳^{1,2}, 张菟凯^{1,2}

(1. 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; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 人造地震动的随机性对地表加速度峰值有重要影响。基于黑龙江地区土层剪切波速以及土体非线性统计结果建立了 3 个土层地震反应模型, 以黑龙江地区典型基岩加速度反应谱为目标谱, 每一目标谱选取 400 个不同的随机数人工合成 400 条随机地震动加速度时程作为输入, 通过土层地震反应分析得到 3 个经验模型共 10800 个地表加速度峰值结果。统计分析了每一目标谱下加速度峰值的分布特征及其差异性, 并通过傅里叶谱与目标反应谱对比分析初步解释了造成这一差异性的原因。结果表明: 在剖面相同, 目标反应谱相同的情况下, 不同随机数得到的场地地表加速度峰值存在一定差异, 大致呈现正态分布; 且这种差异与地表地震动傅里叶谱峰值点周期对应的该地震动目标反应谱峰值的大小呈正相关。

关键词: 随机数; 人造地震动; 加速度峰值; 反应谱; 傅里叶谱

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0007-06

作者简介: 齐文浩(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事场地地震动效应方面研究。E-mail: qwhkty@163.com。

Effects and mechanisms of ground vibration randomness on peak surface acceleration

QI Wenhao^{1,2}, CHEN Fangxiao^{1,2}, LI Linfang^{1,2}, ZHANG Xiankai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: The randomness of artificial seismic vibration has important influences on the peak value of ground acceleration. Based on the results of soil layer shear wave velocity and soil body nonlinear statistics, three soil layer seismic response models are established. Taking the typical bedrock acceleration response spectrum of Heilongjiang region as the target one, 400 random seismic acceleration intervals are synthesized manually by 400 different random numbers for each target spectrum. Through the experience of soil layer seismic response, 10800 peak ground acceleration results are obtained from the three models. The distribution characteristics and differences of acceleration peaks under each target spectrum are analyzed statistically, and the reasons for this difference are explained preliminarily by comparing the Fourier spectrum with target response one. The results show that under the same profile and target response spectrum, there is a certain difference in the peak value of ground surface acceleration obtained by different random numbers, which shows a normal distribution. This difference is positively correlated with the response spectral value of the seismic targets corresponding to the Fourier spectrum peak periods of the surface earthquakes.

Key words: random number; artificial ground motion; peak acceleration; response spectrum; Fourier spectrum

0 引 言

由于满足一定要求的实际强震记录的缺乏, 人工合成地震动成为当前获取地震动输入的主要手段, 在工程场地地震安全性评价等工作中被广泛采用。相同目标谱下, 随机数不同得到的加速度时程不同, 进行土层地震反应得到的地表地震动参数也不同^[1]。研究随机数选取造成的加速度时程的随机性对地表加速度

峰值 (PGA) 的影响, 对研究地表加速度放大效应及机理, 有着重要的意义。

影响土层地震反应结果的因素有很多, 目前大多研究集中在剪切波速、输入界面选取、地震动强度及

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目 (2021C07); 黑龙江省科学基金项目 (LH2021E121)

收稿日期: 2023-11-30

动力学参数等方面^[2-4]。也有学者就强度包线参数不确定性对土层地震反应的影响进行了研究,发现强度包线参数的不确定性对土层地震反应分析的结果有重要影响^[5-7]。近些年来,一些学者还从人工合成地震动的随机性对地表地震动参数影响的角度开展了研究,周春海^[8]、张海等^[9]基于实际场地剖面对随机数对场地加速度峰值的影响进行研究,揭示了加速度峰值的分布规律;夏峰等^[10]通过研究发现,地震动相位特征对土层地震反应的影响很大。Fang 等^[11]基于北京场地模型,分析了 3000 个不同相位的地震波对地表加速度峰值的影响。梁师俊等^[12]针对地震随机性以及场地条件随机性对地面加速度峰值影响这一问题,基于等效场地剪切波速概率分布推导了水平成层地基场地地震响应地面加速度峰值解析解。陈国兴等^[13]用苏州钻孔资料提出了场地卓越周期的弱震预测法,给出了场地卓越周期和地表加速度峰值的空间变化特征。

由上可知,学者们对地震动随机性对地震动影响规律进行了一定研究,但尚未揭示其影响的机理。本文以黑龙江地区钻孔数据为基础建立经验模型,选取地震危险性分析得到的基岩加速度反应谱作为目标谱,以不同随机数合成不同相位加速度时程,通过土层地震反应分析,研究地震动随机性对地表加速度峰值的影响,并从傅里叶谱与反应谱对比的角度揭示产生这一影响的机理。

1 场地模型

本文对黑龙江地区 130 个钻孔的场地参数进行统计分析,非线性参数和剪切波速的统计结果如图 1 (a), (b) 所示。对统计结果进行分析得到场地剪切波速拟合值及非线性参数均值,场地剪切波速分布如图 1 (c) 所示,其拟合公式为式 (1)。并以此分析得到的结果建立覆盖层厚度分别为 20, 50, 80 m 的 3 个经验场地模型。利用逐层单自由度方法求得 3 个基本周期分别为 0.32, 0.60, 0.81 s; 3 个场地模型的 20 m 等效剪切波速 V_{se} 为 218.78 m/s, 根据《建筑抗震设计规范》划分 20, 50 m 的场地为 II 类场地、80 m 的场地为 III 类场地^[14-15]。

$$V_s = a + b \times h^c \quad (1)$$

式中: V_s 为土层剪切波速; a , b , c 为拟合参数; h 为土层深度。

2 基岩输入地震动

2.1 人工合成地震动原理

三角级数叠加法是《工程场地地震安全性评价: GB 17741—2005》^[16]推荐的人工合成地震动加速度时程的标准方法,其思路是:①利用反应谱与功率谱之

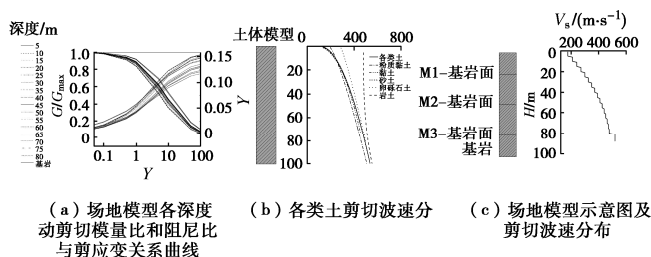


图 1 经验场地模型参数

Fig. 1 Empirical site model parameters

间存在的近似转换关系,将目标谱转换为功率谱,如式 (1) 所示。②使用式 (2) 所示的三角函数叠加法生成零均值的平稳高斯过程。③将得到的平稳时程乘以强度包络函数,获得非平稳的输入加速度时程。④最后进行迭代,直到满足精度要求得到最后所需的输入地震动加速度时程。

$$S(\omega_k) = \frac{\xi}{\pi \omega_k} [S_a(\omega_k)]^2 \frac{1}{\ln \left[-\frac{\pi}{\omega_k T_d} \right] \ln(1-p)} \quad (2)$$

式中: $S(\omega_k)$ 为功率谱; $S_a(\omega_k)$ 为给定的目标反应谱在频率 ω_k 处的幅值; ξ 为阻尼比; p 为反应不超过目标反应谱值得概率; T_d 为地震动总持时。

$$X(t) = \sum_{i=0}^n A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (3)$$

式中: $A_i = [4S(\omega_i)\Delta\omega]^{0.5}$, $S(\omega_i)$ 为功率谱密度函数; $\Delta\omega = 2\pi/T_s$, T_s 为总持时; 初相位 ϕ_i 为 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机变量,由随机数产生。

2.2 基岩反应谱

目标反应谱是人工地震动合成的必备参数。本文选择安评工作中危险性分析得到的基岩加速度反应谱,选择 50 a 分别为 0.5%, 1%, 1.64%, 2.47%, 4.88%, 9.52%, 22.17%, 39.50%, 63.58% 9 种超越概率对应的基岩反应谱,如图 2 所示,从图 2 中可以看出超越概率不同其反应谱也不同,随着超越概率增大反应谱谱值变低。在每一个超越概率下选择 400 个随机数,这些随机数在 0~9999 范围内,且在对数坐标上大致均匀分布。

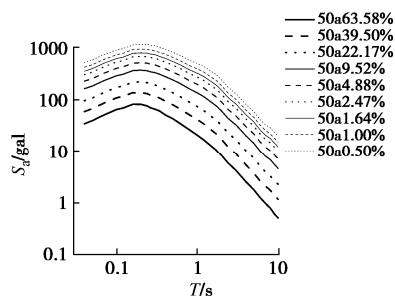


图 2 目标反应谱

Fig. 2 Target response spectra

2.3 输入加速度时程

在人工合成地震动时，目标反应谱选择图 2 中 9 种不同超越概率对应的基岩加速度反应谱，对于每一基岩反应谱分别合成 400 条基岩输入加速度时程。为满足拟合精度，目标反应谱选择 70 个控制点，合成的 3600 条地震动时程均以 0.02 s 为间隔；离散值点数为 1024。其中，以超越概率为 50a39.50%对应的目标反应谱拟合的时程样本如图 3 所示。其加速度峰值为 51.72 Gal。

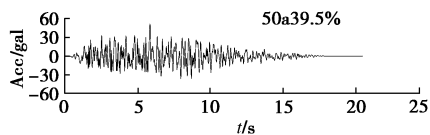


图 3 样本时程
Fig. 3 Time histories of sample

3 结果分析

3.1 场地地震反应分析

采用工程场地地震安全性评价行业推荐的土层地震反应等效线性化波动方法^[17-18]。以不同随机数产生不同加速度时程为输入，对建立的经验场地模型进行土层地震反应分析，得到 3 个不同场地地表加速度峰值和加速度反应谱。

3.2 加速度峰值结果

将 9 条目标谱各自合成的 400 条基岩地震动时程输入到 3 个经验模型中得到不同的地表加速度峰值直方图，如图 4 所示。400 条地震动输入时程可以得到较为稳定的结果，反应地表加速度峰值的分布规律^[19]。图 5 为在 3 个经验模型中分别输入以 50 a 超越概率 63.58%的基岩反应谱为目标谱合成的 400 条地震动时程得到的加速度峰值分布图；其中，均值由图 4 所示正态分布拟合直方图的方法得到。

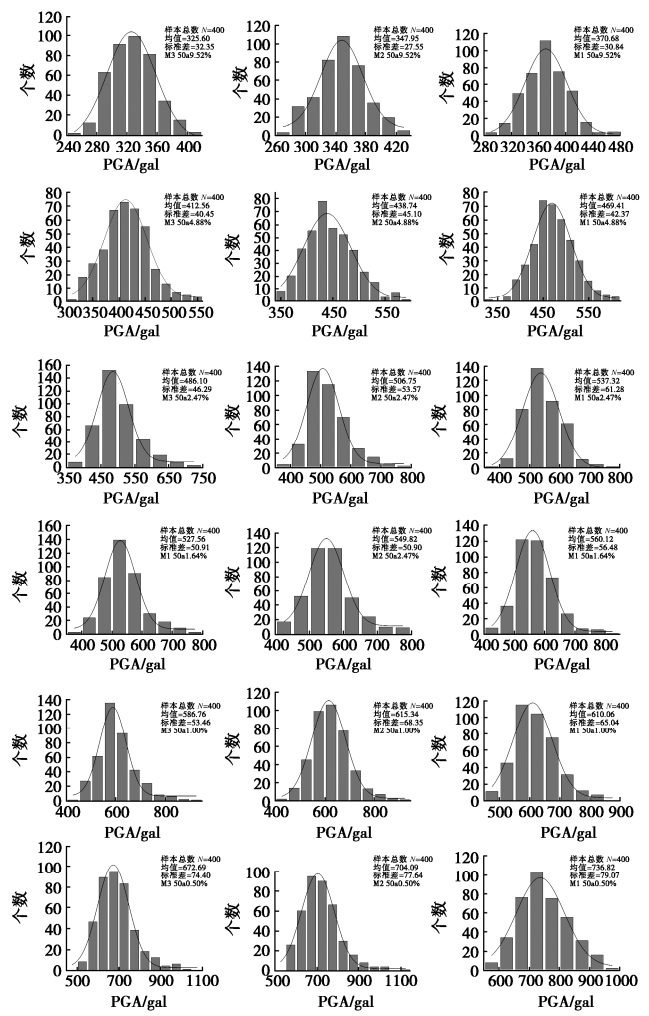
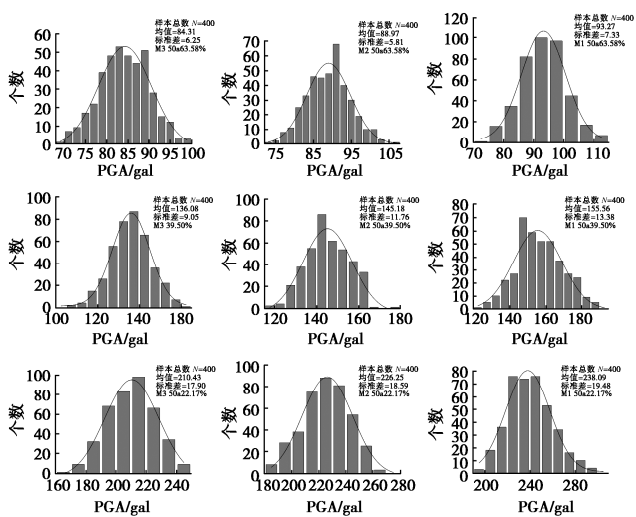


图 4 地表加速度峰值直方图
Fig. 4 Histogram of peak ground acceleration

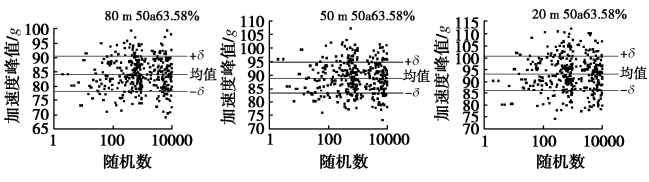


图 5 不同剖面不同随机数得到的加速度峰值分布图

Fig. 5 Distribution maps of peak acceleration obtained by different random numbers in different sections

从图 4, 5 中可以看出，随机数的选取对地表加速度峰值的影响很大，其最大值与最小值跨度很大，但整体服从正态分布。场地地表加速度峰值平均值较为稳定，最大值约为平均值的 1.6 倍，最小值约为平均值的 70%，最大值约为最小值的 2 倍。

另外，对于同一经验场地模型，随着目标反应谱强度的增加，场地地表加速度峰值的均值增大，离散性增大；3 个经验模型的加速度峰值标准差最大值均发生在输入时程目标反应谱是 50 a 超越概率为 0.50% 的反应谱时；3 个经验模型的加速度峰值标准差最小

值均发生在输入时程目标反应谱是 50 a 超越概率为 63.58% 的反应谱时。对于同一超越概率目标反应谱, 随着场地覆盖层厚度变厚, 地表加速度峰值减小, 离散性呈现减小趋势; 地表加速度峰值均值的最小值均在经验模型覆盖层厚度为 80 m 的情况下得到。

4 影响机理分析

4.1 分析方法

地震波的不同频率的幅值大小, 对地震波的性质有着重要的影响, 由于共振效应, 地震波幅值较大的频谱成分的放大效应也较强。例如, 如果频率为 2.5 Hz (周期 0.4 s) 分量的振幅比较大, 则此地震波对于自振周期在 0.4 s 左右的建筑物会产生严重的影响^[20]。所以可以通过对比地震动傅里叶谱的卓越成分与输入地震动反应谱相对位置的谱值大小, 来初步解释地震动的随机性对加速度峰值的影响。

4.2 分析结果

图 6~8 分别为将目标谱为 50 a 超越概率 63.58% 的反应谱所合成的 400 条地震动加速度时程输入到 3 个经验场地模型得到的地表加速度峰值分布图和每个场地模型各 7 条地表地震动傅里叶谱与目标反应谱的对比图。7 条场地地表地震动时程以加速度峰值的大小区分, 其中, 图 1, 2 为均值加一个标准差之上的地震动加速度傅里叶谱; 图 3~5 为均值附近的地震动加速度傅里叶谱; 图 6, 7 为均值减一个标准差之下的地震动加速度傅里叶谱, 反应谱峰值周期为 0.16 s。

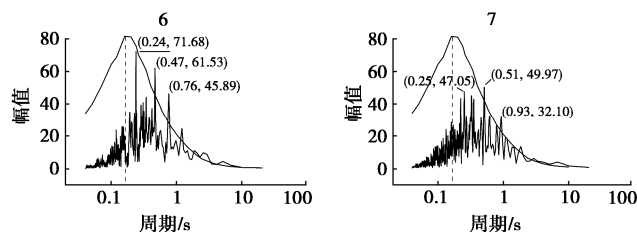
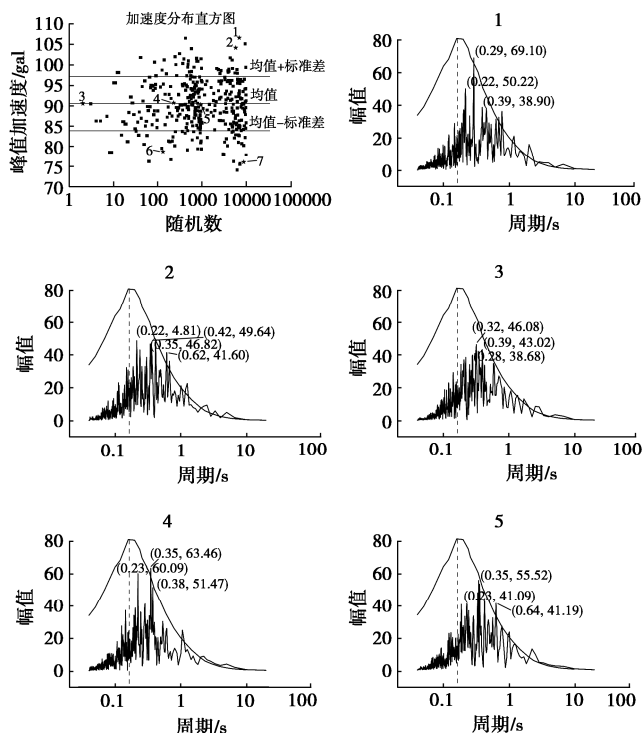


图 6 80 m 场地模型傅里叶谱与反应谱对比

Fig. 6 Comparison of Fourier and response spectra in 80 m-site model

图 6 中, 当场地模型覆盖层厚度为 80 m 时, 频率分量聚集的区域对应的反应谱幅值一定程度上与地表加速度峰值成正比。图 1, 2 可以看出其频率分布集中在 0.2~0.3 s 区域内, 对应的反应谱幅值较大; 图 3~5 可以看出其频率分布集中在 0.3~0.4 s 区域内, 对应的反应谱幅值适中; 图 6, 7 可以看出其频率分布集中在 0.4 s 之后, 对应的反应谱幅值较小。

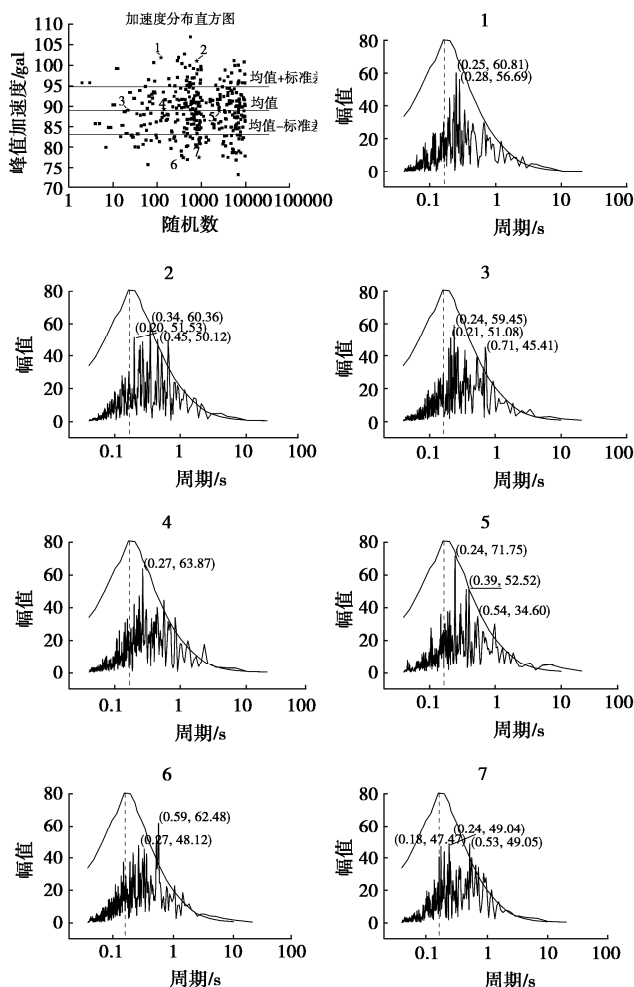


图 7 50 m 场地模型傅里叶谱与反应谱对比

Fig. 7 Comparison of Fourier and response spectra in 50 m-site model

图 7 中, 当场地模型覆盖层厚度为 50 m 时, 频率分量聚集的区域对应的反应谱幅值与地表加速度峰

值正相关。1 图中频率分布集中在 0.26 s 左右, 对应的反应谱幅值较大; 6 图中频率分布集中在 0.59 s, 对应的反应谱幅值较小。存在一些地震动频率分布集中点有多个, 例如图 2~5, 7 存在多处频率分布集中, 需要综合考虑; 例如图 5 有 3 个频率分布集中区域, 分别为 0.24, 0.39, 0.54 s, 综合其幅值考虑, 认为在 0.4 s 左右对应反应谱幅值适中, 地表地震动加速度峰值在均值附近合理。

图 8 中, 当场地模型覆盖层厚度为 20 m 时, 频率分量聚集的区域对应的反应谱幅值与地表加速度峰值正相关。图 2, 6 和 7 存在多个频率分布聚集点, 需要综合分析。图 1, 2 可以看出其频率分布集中在 0.2~0.3 s 区域内, 对应的反应谱幅值较大; 图 3~5 可以看出其频率分布集中在 0.3~0.4 区域内, 对应的反应谱幅值适中; 图 6, 7 可以看出其频率分布集中在 0.4 s 之后, 对应的反应谱幅值较小。

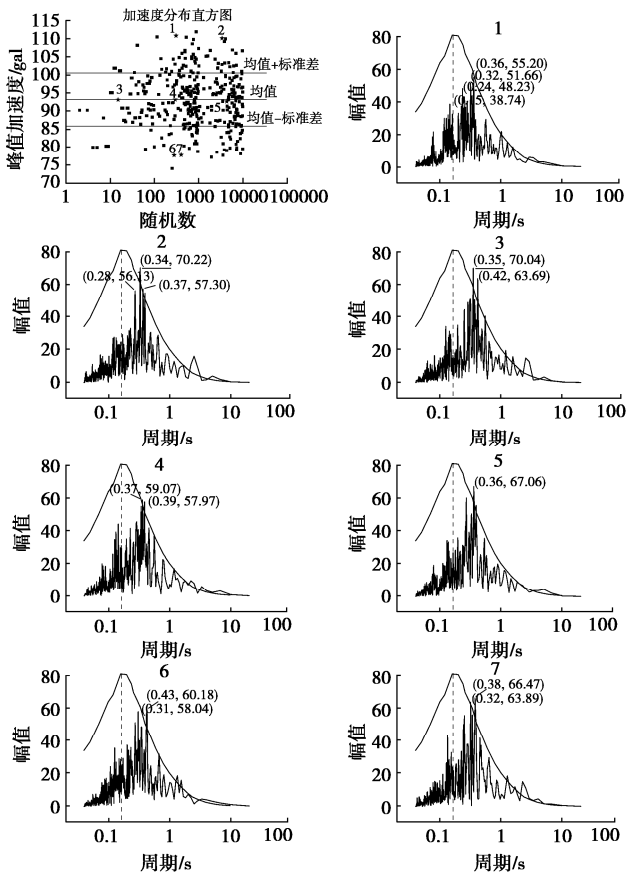


图 8 20 m 场地模型傅里叶谱与反应谱对比

Fig. 8 Comparison of Fourier and response spectra in 20 m-site model

5 结 论

本文基于 9 条目标反应谱, 选用 400 个不同的随机数, 合成了 3600 条不同的地震动加速度时程。针对人工合成地震动随机性地表加速度峰值的影响进行了研究, 得到了地表加速度峰值的分布规律, 并且从

傅里叶频谱的角度给出了该影响的解释。

(1) 基岩输入时程的随机性地表加速度峰值具有很大影响, PGA 大致服从正态分布, 地表加速度峰值的变化范围约为平均值的 0.7~1.6 倍。

(2) 同一经验场地模型, 地表加速度峰值的均值随着输入地震动强度增加而增加; 地表加速度峰值的离散性随着输入地震动强度增加而增大。

(3) 同一输入地震动强度下, 地表峰值加速度的均值随着经验场地模型覆盖层厚度变大而减小; 地表峰值加速度的离散性随着经验场地模型覆盖层厚度变大而呈现出减小的趋势。

(4) 通过地表地震动加速度时程傅里叶谱与基岩输入人工合成地震动的目标反应谱的比较, 认为傅里叶谱所示的频率分布与目标反应谱对应可以解释场地地表加速度峰值的差异性: 傅里叶谱中频率聚集的周期段对应该段周期的反应谱谱值越大计算得到的地表加速度峰值越大; 傅里叶谱中频率聚集的周期段对应该段周期的反应谱谱值越小计算得到的地表加速度峰值越小。

(5) 存在多频率分布集中区域的傅里叶谱, 需要综合考虑各个区域幅值大小以及对应反应谱的幅值大小。

参考文献:

- [1] 李小军. 工程场地地震安全性评价工作及相关技术问题[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(1): 15-24. (LI Xiaojun. Evaluation of seismic safety for engineering sites and relevant technical problems[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(1): 15-24. (in Chinese))
- [2] 刘洪帅, 薄景山, 吴兆营, 等. 土体参数对地表峰值加速度和反应谱的影响[J]. 地震研究, 2005(2): 167-171. (LIU Hongshuai, BO Jingshan, WU Zhaoying, et al. Influence of soil parameters on peak acceleration and response spectrum of surface[J]. Journal of Seismological Research, 2005(2): 167-171. (in Chinese))
- [3] 孙 锐, 袁晓铭, 刘晓键. 动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1267-1274. (SUN Rui, YUAN Xiaoming, LIU Xiaojian. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1267-1274. (in Chinese))
- [4] 王 冲, 薄景山, 齐文浩, 等. 输入界面对地表峰值加速度的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 55-61. (WANG Chong, BO Jingshan, QI Wenhao, et al. The effect of inputting interface of earthquake ground motion on the

- ground peak accelerations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, **31**(6): 55-61. (in Chinese))
- [5] 段长辉, 齐文浩, 李尔超. 强度包线参数不确定性对土层地震反应影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, **43**(3): 169-180. (DUAN Changhui, QI Wenhao, LI Erchao. Influence of parameter uncertainty of strength envelope on seismic response of soil layer[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, **43**(3): 169-180. (in Chinese))
- [6] 李尔超. 强度包络函数参数不确定性对土层地震反应影响研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015. (LI Erchao. Study on the Influence of Uncertainty of Strength Envelope Function Parameters on Seismic Response of Soil Layer[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese))
- [7] 王少卿, 俞瑞芳, 李小军. 地震动时-频特性对土层场地地震反应的影响[J]. 土木工程学报, 2021, **54**(7): 101-113. (WANG Shaoqing, YU Ruifang, LI Xiaojun. Study of effects of time-frequency characteristics of bedrock acceleration on site response analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, **54**(7): 101-113. (in Chinese))
- [8] 周春海. 基岩人造地震动随机数对地表地震动参数的影响[J]. 世界地震工程, 2014, **30**(4): 89-93. (ZHOU Chunhai. Effect of random numbers of artificial bed rock ground motion on the surface ground motion parameters[J]. World Earthquake Engineering, 2014, **30**(4): 89-93. (in Chinese))
- [9] 张海, 侯成国, 尤红兵, 等. 基岩输入时程随机数对场地峰值加速度的影响研究[J]. 震灾防御技术, 2017, **12**(2): 254-265. (ZHANG Hai, HOU Chengguo, YOU Hongbing, et al. Effect of random numbers of bedrock input time histories on the PGA from site response analyses[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, **12**(2): 254-265. (in Chinese))
- [10] 夏峰, 孙楠, 危凤海. 输入地震动相位特性对不同类别场地土层地震反应影响[J]. 地震研究, 2021, **44**(4): 656-664. (XIA Feng, SUN Nan, WEI Fenghai. Influence of phase properties of the input ground motion on the earthquake response of different on-site soil[J]. Journal of Seismological Research, 2021, **44**(4): 656-664. (in Chinese))
- [11] FANG Y I, LV Y J, ZHANG L F. Influences of random phases of artificially synthesized earthquake waves on peak ground acceleration in soil-layer seismic response analysis[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, **452**(2): 452-460.
- [12] 梁师俊, 蒋蓓. 水平土层地震响应地面峰值加速度可靠度研究[J]. 振动与冲击, 2022, **41**(6): 30-36, 85. (LIANG Shijun, JIANG Bei. Reliability of peak ground acceleration in the seismic response analysis on stratified soil[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, **41**(6): 30-36, 85. (in Chinese))
- [13] 陈国兴, 刘薛宁, 朱姣, 等. 深厚松软场地卓越周期与地面峰值加速度的空间变异特征: 以苏州为例[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 996-1004. (CHEN Guoxing, LIU Xuening, ZHU Jiao, et al. Spatial variation of predominant periods of site and amplifications of peak ground accelerations for deep sediment layers: case study of Suzhou City[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 996-1004. (in Chinese))
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [15] 齐文浩, 薄景山, 刘红帅. 水平成层场地基本周期的估算公式[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 779-784. (QI Wenhao, BO Jingshan, LIU Hongshuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 779-784. (in Chinese))
- [16] 卢寿德. GB17741—2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006. (LU Shoude. GB17741—2005 "Seismic Safety Evaluation of Engineering Sites" is A Teaching Material[M]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese))
- [17] 廖振鹏. 地震小区划: 理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (LIAO Zhenpeng. Seismic Microzoning: Theory and Practice[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese))
- [18] LIU B B, QIAO Y L. Research status of 1-D nonlinear soil layers seismic response in time domain[J]. Science Discovery, 2019, **7**(5): 312-317. (in Chinese)
- [19] RATHJE E M, KOTTKE A R, TRENT W. Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(4): 607-619.
- [20] 大崎顺彦. 地震动的谱分析入门[M]. 北京: 地震出版社, 2008. (Ohsaki. Introduction to Spectral Analysis of Ground Motions[M]. Beijing: Seismological Press, 2008. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)