

天然地震波的频率特性与场地相关性分析

郭明珠,孙海龙

(北京工业大学城市建设学部,北京 100124)

摘要 目的 研究天然地震波的频率特性和场地相关性,为岩质边坡振动台试验天然地震波的选择提供依据。**方法** 以汶川地震的24条水平地震波加速度时程记录为研究对象,根据傅里叶变换和五点滑动平均法编写Matlab的计算程序,统计地震波的主频和频带宽度;基于Matlab编写时延互相关函数计算程序,统计不同场地地震波的互相关系数,并进行分析。**结果** 相近震中距下,土层场地与基岩场地地震波的主频和频带宽度不同;基岩场地与基岩场地地震波互相关系数的最大值和最小值均相应大于土层场地与基岩场地;相同场地间地震波的互相关系数比不同场地间地震波的互相关系数有更大概率出现在数值更大的区间内。**结论** 不同场地间地震波的频率特性不同,同类场地间地震波的相关性强于不同场地间地震波的相关性,岩质边坡振动台试验天然地震波应选取基岩场地上台站测得的加速度时程记录。

关键词 岩质边坡;振动台试验;天然地震波;主频;频带宽度;互相关系数

中图分类号 TU195;P315.3⁺1

文献标志码 A

Frequency Characteristics and Correlation Analysis of Natural Seismic Waves Belonging to Different Sites

GUO Mingzhu, SUN Hailong

(Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124)

Abstract: This paper aims to study the frequency characteristics and site correlation of natural seismic, and to provide a basis for the selection of natural seismic waves in shaking table test of rock slope. Taking 24 horizontal seismic wave acceleration time history records of Wenchuan earthquake as the research object, using Fourier transform and five-point sliding average method to compile the Matlab program, the dominant frequencies and frequency band widths of seismic waves are calculated. Matlab delay cross correlation function calculation program was used to calculate the correlation coefficients of seismic waves belonging to different sites and analyze them. It is found that under the condition of similar epicentral distance, the dominant frequencies and the frequency band widths of soil seismic waves are obviously different from those of bedrock seismic waves. It is

收稿日期:2020-11-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1505001)

作者简介:郭明珠(1963—),男,教授,博士,主要从事防灾减灾与防护工程等方面研究。

also observed that the maximum and minimum values of the correlation coefficients of seismic waves between the bedrock and the bedrock are correspondingly larger than those between the soil layer and the bedrock. The correlation coefficients of seismic waves between same sites are more likely to have higher values than those between different sites. Conclusion is that the frequency characteristics of seismic waves between different sites are different, and the correlation of seismic waves between same sites is stronger than that between different sites. When natural seismic wave acceleration time history records are selected for shaking table test of rock slope, the acceleration time history record measured by the seismic stations on the bedrock sites should be selected.

Key words: rock slope; shaking table test; natural seismic wave; dominant frequency; frequency band width; correlation coefficient

大型振动台物理模拟试验是揭示强震作用下边坡动力响应和失稳破坏过程的最为有力的手段之一^[1-4],而动力荷载的选择又对于岩质边坡振动台试验研究具有重要的影响。天然地震波是在天然地震时,数字地震台网记录到的地震波,天然地震波可以反映地震真实动力输入,也是动力荷载输入的数据基础。普遍认为场地条件对天然地震波的传播有较大的影响,经过土层场地或基岩场地不同介质时,波会发生散射、反射和偏转,地震动幅值特性和地震动频谱特性都会发生改变,并直接影响到地震灾害的分布。因此,不同场地条件下的天然地震动参数具有不同的特性,不同的参数特性会引起不同的地震反应结果。

近年来岩质边坡振动台试验动力荷载输入中天然地震波选择不尽相同。许强^[5]、董金玉^[6]和李振生^[7]采用“5·12”汶川地震波(卧龙地震台实测)作为天然地震波;杨峥^[8]和刘汉香^[9]采用“5·12”汶川地震波(卧龙地震台实测)与1995年日本kobe地震波作为天然地震波;张卢明^[10]采用“5·12”汶川地震清平波、El-Centro作为天然地震波。通过查找相关文献,汶川卧龙台地震波为Ⅲ类场地记录的地震波数据,kobe地震波和El-Centro地震为Ⅱ类场地的地震波数据。使用Ⅱ类场地或Ⅲ类场地记录的天然地震数据研究岩质边坡的动力响应和变形破坏特征,并未考虑不同场地类别地震波的相关性,会造成结果偏差。

互相关系数可以反映两条振动信号波形随时间坐标移动时的相互关联紧密性。魏富胜等^[11]通过互相关系数定量描述了地震波形的相似性;段龙宝等^[12]采用互相关系数考察地震波与不同波段的波形相似度。目前已有研究主要针对不同震源和不同频段地震波间互相关系数,且未考虑震中距的影响,对不同场地类型天然地震波间互相关系数的研究也鲜有研究。基于此,笔者通过统计不同场地天然地震波的频率特性,找到土层场地与基岩场地天然地震波的频率特性的不同,并计算不同场地和相同场地天然地震波的互相关系数,通过分析天然地震波的场地相关性,得到岩质边坡振动台试验天然地震波的选择依据。

1 天然地震波加速度时程记录的选取

考虑地震波记录受震源、震中距、传播路径和场地条件等多种因素的影响,为了减小除场地条件外因素的影响,选取2008年5月12日汶川地震记录的两组水平向地震波加速度时程曲线,一组为震中距在19~77 km内的12条水平向地震波,另一组为震中距在245~305 km内的12条水平向地震波。由于篇幅原因,这里仅给出汶川卧龙(51WCW)台站、郫县走石山(51PXZ)台站、冕宁回龙(51MNH)台站和长宁(51CNT)台站的波形(见图1)。

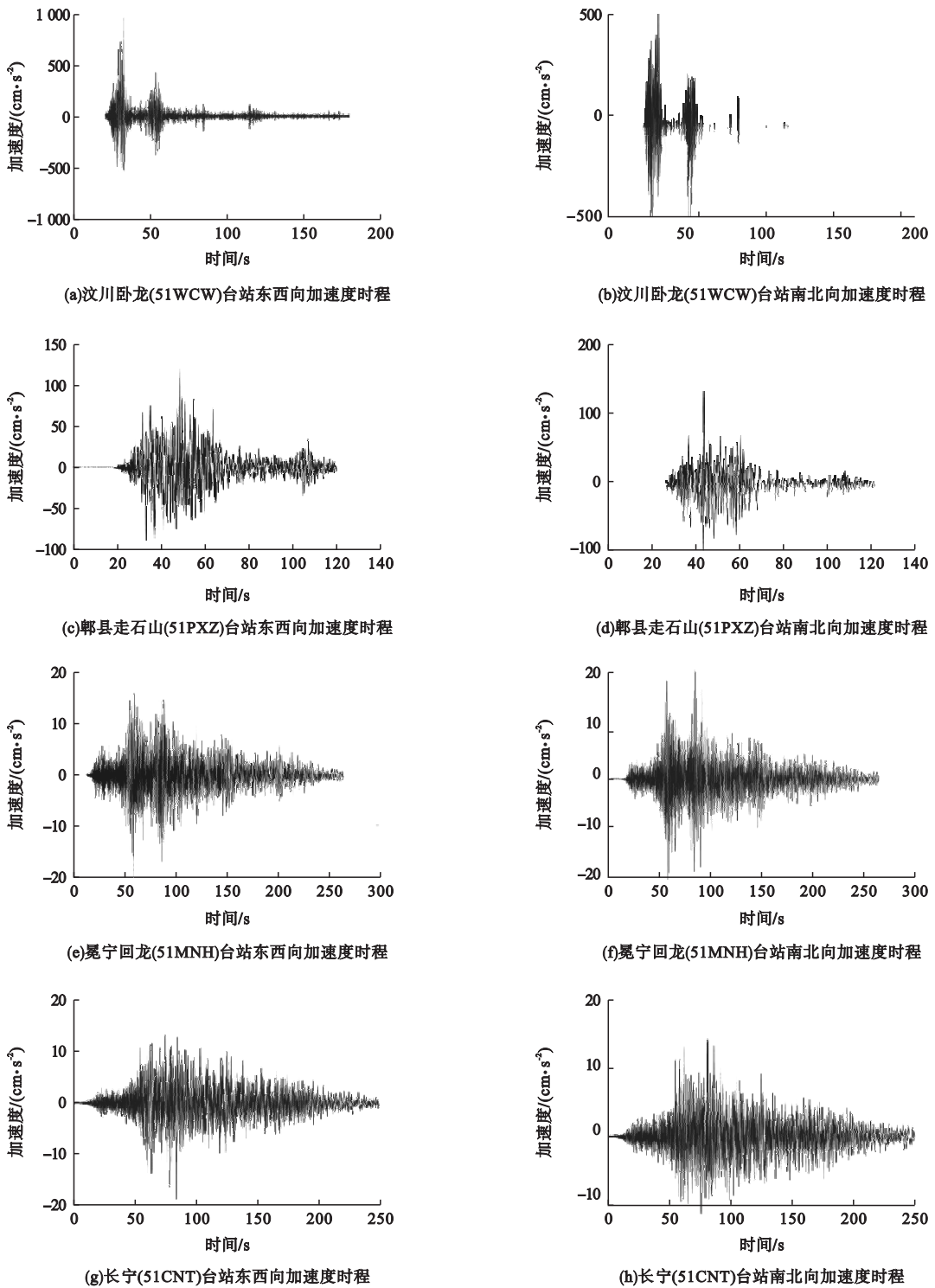


图1 汶川地震水平向加速度时程记录曲线

Fig.1 The horizontal seismic wave acceleration time history records of Wenchuan earthquake

在利用地震波加速度时程记录曲线计算互相关系数时,时间窗的选取方法有多种形式。魏富胜等^[11]使用了初至P波约前两个周期的波段进行波形的相关性分析。段龙宝

等^[12]截取了汶川地震中卧龙波20~40s的地震波波段进行分析。24条水平地震波加速度时程记录的震中距、所选数据对应时间和场地条件如表1所示。

表 1 24 条地震波加速度时程记录曲线概况

Table 1 An overview of 24 seismic wave acceleration time history records										
事件 序号	台站名称	震中经 度/(°)	震中纬 度/(°)	台站经 度/(°)	台站纬 度/(°)	震源深 度/km	震中 距/km	场地 条件	观测 方向	所选数据 对应时间/s
1	汶川卧龙 (51WCW)	103.4	31	103.2	31	14	19.1	土层	东西向	20.6~40.6
2									南北向	20.6~40.6
3	大邑银屏 (51DXY)	103.4	31	103.5	30.6	14	45.5	土层	东西向	19.5~39.5
4									南北向	19.5~39.5
5	理县沙坝 (51LXS)	103.4	31	102.9	31.5	14	73.1	土层	东西向	19.5~39.5
6									南北向	19.5~39.5
7	郫县走石山 (51PXZ)	103.4	31	103.8	30.9	14	39.7	基岩	东西向	20.5~40.5
8									南北向	20.5~40.5
9	宝兴民治 (51BXZ)	103.4	31	102.9	30.5	14	73.3	基岩	东西向	18.0~38.0
10									南北向	18.0~38.0
11	新津梨花 (51XJL)	103.4	31	103.8	30.4	14	76.9	基岩	东西向	8.0~28.0
12									南北向	8.0~28.0
13	马边地办 (51MBD)	103.4	31	103.5	28.8	14	245	土层	东西向	13.0~33.0
14									南北向	13.0~33.0
15	苍溪气象局 (51CXQ)	103.4	31	105.9	31.7	14	250	土层	东西向	18.0~38.0
16									南北向	18.0~38.0
17	冕宁回龙 (51MNH)	103.4	31	102.1	28.5	14	305	土层	东西向	14.0~34.0
18									南北向	14.0~34.0
19	文县 (62WIX)	103.4	31	104.5	33	14	245	基岩	东西向	13.0~33.0
20									南北向	13.0~33.0
21	富顺板桥 (51FSB)	103.4	31	104.8	29.1	14	251	基岩	东西向	13.0~33.0
22									南北向	13.0~33.0
23	长宁 (51CNT)	103.4	31	104.9	28.6	14	304	基岩	东西向	12.0~32.0
24									南北向	12.0~32.0

2 天然地震波频率特性的计算分析

地震波的频率特性是地震波的最重要特征之一^[13],斜坡的地震动响应是地震波各频率组分对斜坡体共同作用的结果。利用FFT函数对水平地震波加速度时程记录进行傅里叶变换,得到地震波频域内振幅谱,振幅谱曲线并不光滑,呈现许多毛刺。为提高光滑度和削弱干扰信号的影响,笔者采用平均法对振幅谱数据进行光滑处理^[14]。直线滑动平均法是利用最小二乘法原理对离散数据

进行线性平滑的方法,其中五点滑动平均法的公式如下:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{1}{5}(3x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4); \\ y_2 = \frac{1}{10}(4x_1 + 3x_2 + 2x_3 + x_4); \\ \vdots \\ y_i = \frac{1}{5}(x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + x_{i+2}); \\ \vdots \\ y_{m-1} = \frac{1}{10}(x_{m-3} + 2x_{m-2} + 3x_{m-1} + 4x_m); \\ y_m = \frac{1}{5}(-x_{m-3} + x_{m-2} + 2x_{m-1} + 3x_m). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i=3,4,\cdots,m-2$ 。

24 条水平地震波形事件的特性见表 2。

可以看到除马边地办(51MBD)台站和文县(62WIX)台站测得的地震波外,在相近震中距条件下,土层场地地震波主频均大于基岩

场地地震波主频。说明相近震中距下,土层场地地震波与基岩场地地震波的主频有明显的不同。

表 2 24 条水平地震波形事件的特性

Table 2 Characteristics of 24 horizontal seismic waveform events							
事件序号	震中距/ km	场地条件	时域内峰值加 速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	峰值加速度 出现时间/s	频域内最大 振幅/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	主频/ Hz	频带宽度/ Hz
1	19.1	土层	957.7	33.00	9.88	2.35	2.05
2			652.9	32.78	6.45	5.47	3.67
3			135.1	59.34	1.53	4.15	1.21
4	45.5	土层	127.6	33.59	1.37	2.78	6.10
5			221.3	30.46	1.73	10.55	7.43
6			261.8	30.27	1.78	8.93	3.04
7	39.7	基岩	120.5	49.12	3.09	0.76	1.09
8			142.2	43.16	2.83	1.42	1.32
9			153.3	33.10	1.77	3.21	1.39
10	73.3	基岩	117.1	32.94	1.65	3.19	1.98
11			107.6	52.90	0.82	0.95	4.86
12			89.1	52.41	0.89	3.31	7.68
13	245	土层	42.0	72.52	0.90	3.59	2.11
14			40.6	50.22	0.71	4.42	2.56
15			184.8	110.20	1.70	3.90	6.59
16	250	土层	166.9	97.54	1.90	3.90	3.14
17			19.9	58.77	0.51	0.91	0.69
18			22.5	84.56	0.38	0.80	2.41
19	305	土层	142.7	57.97	0.71	10.78	12.22
20			141.2	57.98	0.71	3.69	13.03
21			32.1	73.31	0.38	1.28	6.31
22	251	基岩	24.7	71.67	0.32	2.49	7.85
23			18.6	83.75	0.29	0.16	1.53
24			14.2	80.72	0.29	0.68	3.76

1~12 水平地震波形事件的频带宽度变化如图 2(a)所示,可以看到大邑银屏(51DXY)台站测得的地震波频带宽度明显大于郫县走石山(51PXZ)台站测得的地震波频带宽度,理县沙坝(51LXS)台站测得的地震波频带宽度明显大于宝兴民治(51BXZ)台站测得的地震波频带宽度,而理县沙坝(51LXS)台站测得的地震波频带宽度与新津梨花(51XJL)台站测得的地震波频带宽度相近。

震中距在 80 km 内,相近震中距条件下土层场地地震波频带宽度要大于基岩场地地震波频带宽度。13~24 水平地震波形事件的频带宽度变化如图 2(b)所示,可以看到文县(62WIX)台站测得的地震波频带宽度明显大于马边地办(51MBD)台站测得的地震波频带宽度,富顺板桥(51FSB)台站测得的地震波频带宽度大于苍溪气象局(51CXQ)台站测得的地震波频带宽度,而长宁(51CNT)台站测得

的地震波频带宽度与冕宁回龙(51MNH)台站测得的地震波频带宽度相近。震中距在240 ~ 310 km 内,相近震中距条件下基岩场地地震

波频带宽度要大于土层场地地震波频带宽度。说明相近震中距下,土层场地地震波与基岩场地地震波的频带宽度有明显的不同。

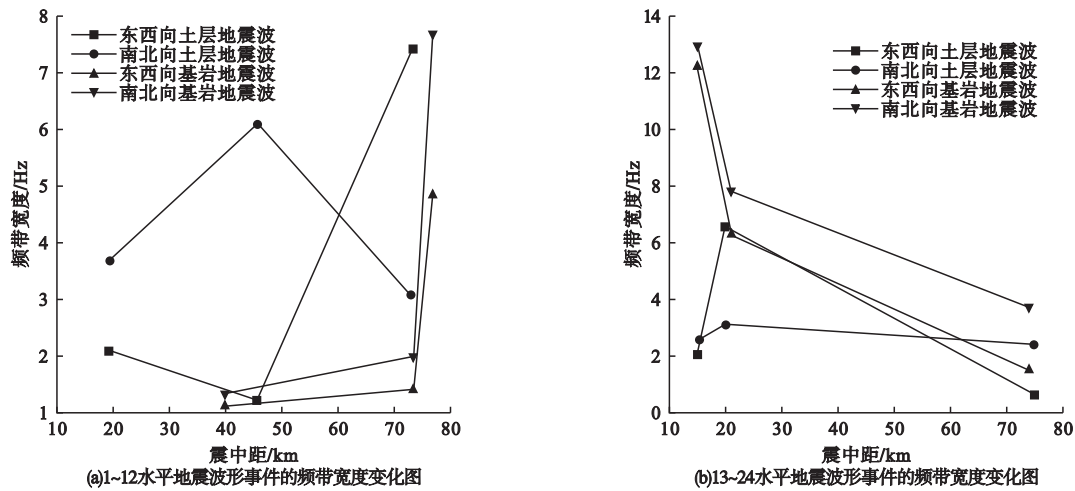


图2 水平地震波形事件的频带宽度变化图

Fig. 2 Variation diagram of frequency band width of horizontal seismic wave formevents

3 天然地震波互相关系数的计算分析

互相关函数描述随机振动两个样本函数在不同瞬时幅值之间的依赖关系,也是反映两条振动信号波形随时间坐标移动时相互关联紧密性的一种函数^[13]。把地震波看做是平稳随机过程,离散平稳随机振动信号互相关函数(互协方差函数)表达式为^[12]

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x(i)y(i+k) \quad (2)$$

式中: $k=0,1,2,\cdots,m;x(i)$ 等价于 $x(i\Delta t)=x(t),y(i)$ 等价于 $y(i\Delta t)=y(t)$,均为随机振动信号的样本函数; $R_{xy}(k)$ 等价于 $R_{xy}(k\Delta t)=x(\tau),\tau$ 为时间坐标移动值, Δt 为采样时间间隔。

编写基于 Matlab 的时延互相关函数计算程序,可以截取任一条地震波加速度时程记录的选定时间段内的数据,计算与另一条地震波加速度时程记录中任意连续等量数据的互相关系数。互相关系数的值越接近 1,表明两变量的关联程度越强,互相关系数的值越接近 0,表明两变量的关联程度越弱。

1 ~ 12 水平地震波形事件的互相关系数见表 3。可以看到土层场地与基岩场地地震波记录(1 ~ 6 事件与 7 ~ 12 事件)的互相关系数在 13.9% ~ 33.9%,土层场地与土层场地地震波记录(1 ~ 6 事件与 1 ~ 6 事件)的互相关系数在 18.1% ~ 47.2%,基岩场地与基岩场地地震波记录(7 ~ 12 事件与 7 ~ 12 事件)的互相关系数在 19.4% ~ 38.8%。可以发现土层场地与土层场地地震波互相关系数最大值 47.2% 以及基岩场地与基岩场地地震波互相关系数最大值 38.8%,均大于土层场地与基岩场地地震波互相关系数最大值 33.9%,且基岩场地与基岩场地地震波互相关系数最大值是土层场地与基岩场地地震波互相关系数最大值的 1.14 倍。同样发现,土层场地与土层场地地震波互相关系数最小值 18.1% 以及基岩场地与基岩场地地震波互相关系数最小值 19.4%,均大于土层场地与基岩场地地震波互相关系数最小值 13.9%,且基岩场地与基岩场地地震波互相关系数最小值是土层场地与基岩场地地震波互相关系数最小值的 1.4 倍。

综合表 3 和表 4 分析可知,除土层场地与土层场地地震波互相关系数最小值小于土层场地与基岩场地地震波互相关系数最小值外,相同场地地震波互相关系数的最大值均大于不同场地地震波互相关系数的最大值,基岩场地与基岩场地地震波互相关系数的最小值均大于不同场地地震波互相关系数的最小值。

统计土层场地与基岩场地地震波互相关系数、土层场地与土层场地地震波互相关系数以及基岩场地与基岩场地地震波互相关系数在区间上的概率分布。1~12 水平地震波形事件的互相关系数概率分布如图 3 所示,可以看到相同场地地震波互相关系数出现在 30%~50% 内的概率大于不同场地地震波互相关系数,不同场地地震波互相关系数出现在 10%~30% 内的概率大于相同场地地震波互相关系数。13~24 水平地震波形事件的互相关系数概率分布如图 4 所示,可以看到相同场地地震波互相关系数出现在 25%~40% 内的概率大于不同场地地震波互相关系数,不同场地地震波互相关系数出现在 15%~25% 内的概率大于相同场地地震波互相关系数。

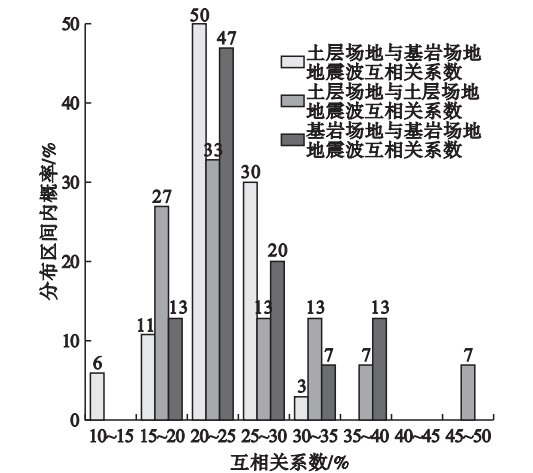


图 3 1~12 水平地震波形事件的互相关系数概率分布

Fig. 3 Probability distribution of correlation coefficients of 1~12 horizontal seismic waveform events

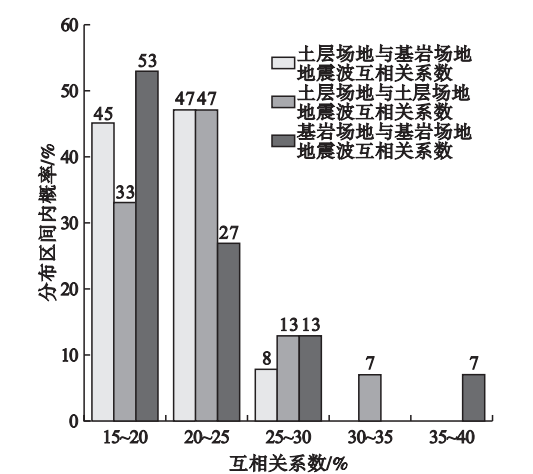


图 4 13~24 水平地震波形事件的互相关系数概率分布

Fig. 4 Probability distribution of correlation coefficients of 13~24 horizontal seismic waveform events

综合图 3 和图 4 分析可知,相同场地地震波互相关系数出现在数值更大分布区间内的概率大于不同场地地震波互相关系数;同时不同场地地震波互相关系数出现在数值更小分布区间内的概率大于相同场地地震波互相关系数。

4 结 论

(1) 土层场地地震波主频和频带宽度不同于基岩场地地震波,不同场地地震波的频率特性不同。

(2) 基岩场地与基岩场地地震波互相关系数的最大值和最小值均相应大于土层场地与基岩场地地震波互相关系数的最大值和最小值。

(3) 土层场地与土层场地地震波互相关系数以及基岩场地与基岩场地地震波互相关系数有更大概率出现在数值更大区间,土层场地与基岩场地地震波互相关系数有更大概率出现在数值更小区间。

(4) 由不同场地地震波之间得到的互相关系数有较大的差别,且同类场地间地震波的相关性强于不同场地间地震波的相关性。在振动台试验选取天然地震波加速度时程记录时,应选择相同场地类型的天然地震波,岩

质边坡振动台试验应选取基岩场地上台站测得的地震波加速度时程记录。

参考文献

- [1] 黄润秋,李果,巨能攀.层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875.
(HUANG Runqiu, LI Guo, JU Nengpan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(5): 865-875.)
- [2] 刘汉香,许强,徐鸿彪,等.斜坡动力变形破坏特征的振动台模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(增刊2):334-339.
(LIU Hanxiang, XU Qiang, XU Hongbiao, et al. Shaking table model test on slope dynamic deformation and failure [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(S2): 334-339.)
- [3] 邹威,许强,刘汉香,等.强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J].地震工程与工程震动,2011,31(4):143-149.
(ZOU Wei, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Large-scale shaking table model test study on failure of layered rocky slope under strong ground motion [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31(4): 143-149.)
- [4] 刘汉香,许强,王龙,等.地震波频率对岩质斜坡加速度动力响应规律的影响[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):125-133.
(LIU Hanxiang, XU Qiang, WANG Long, et al. Effect of frequency of seismic wave on acceleration response of rock slopes [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(1): 125-133.)
- [5] 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 Hanxiang, ZOU Wei, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(12): 2420-2428.)
- [6] 董金玉,杨国香,伍法权,等.地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J].岩土力学,2011,32(10):2977-2988.
(DONG Jinyu, YANG Guoxiang, WU Faquan, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(10): 2977-2988.)
- [7] 李振生,巨能攀,侯伟龙,等.陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J].工程地质学报,2012,20(2):242-248.
(LI Zhensheng, JU Nengpan, HOU Weilong, et al. Large-scale shaking table model tests for dynamic response of steep stratified rock slopes [J]. Journal of engineering geology, 2012, 20(2): 242-248.)
- [8] 杨峥,许强,刘汉香,等.地震作用下含反倾软弱夹层斜坡的动力变形破坏特征研究[J].振动与冲击,2014,33(19):134-151.
(YANG Zheng, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Dynamic deformation and failure of slopes with an anti-dip weak interlayer under earthquakes [J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(19): 134-151.)
- [9] 刘汉香.基于振动台试验的岩质斜坡地震动力响应规律研究[D].成都:成都理工大学,2014.
(LIU Hanxiang. Seismic responses of rock slopes in a shaking table test [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.)
- [10] 张卢明,周勇,范刚,等.强震作用下核安全级反倾层状软岩高陡边坡组合支挡结构抗震性能研究与加固效果评价[J].岩土力学,2020,41(5):1740-1749.
(ZHANG Luming, ZHOU Yong, FAN Gang, et al. Seismic behavior research and reinforcement effect evaluation of composite retaining structures with nuclear safety level anti-dip layered soft rock slope under strong earthquakes [J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(5): 1740-1749.)
- [11] 魏富胜,许忠淮,郭祥云.基于波形相关性的地震事件分类[J].地震地磁观测与研究,2010,31(3):52-57.
(WEI Fusheng, XU Zhonghuai, GUO Xiangyun. Classification of seismic events based on waveform correlation analysis [J]. Seismological and geomagnetic observation and research, 2010, 31(3): 52-57.)
- [12] 段龙宝,魏献忠,孙益星.基于小波方法的地震波不同频带的统计特性分析[J].工程抗震与加固改造,2014,36(5):126-131.
(DUAN Longbao, WEI Xianzhong, SUN Yixing. Statistical characteristics analysis of the seismic waves of different frequency bands based on wavelet [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2014, 36(5): 126-131.)
- [13] 谢异同,段龙宝,孙益星.基于小波分解的基底隔震结构的抗震分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(2):295-305.
(XIE Yitong, DUAN Longbao, SUN Yixing. Seismic analysis of the base-isolation structure based on wavelet decomposition [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 295-305.)
- [14] 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;知识产权出版社,2006.
(WANG Ji, HU Xiao. MATLAB in vibration signal processing application [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press; Intellectual Property Press, 2006.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)