

王伟, 刘必灯, 刘培玄, 王振宇, 刘欣. 2016. 基于台阵记录的局部场地条件地震动效应分析. 地震学报, 38(2): 307-317. doi:10.11939/jass.2016.02.014.

Wang W, Liu B D, Liu P X, Wang Z Y, Liu X. 2016. Analyses on the effect of the local site conditions on the strong motion based on the array records. Acta Seismologica Sinica, 38(2): 307-317. doi:10.11939/jass.2016.02.014.

## 基于台阵记录的局部场地条件 地震动效应分析\*

王 伟<sup>1)✱</sup> 刘必灯<sup>1)</sup> 刘培玄<sup>2)</sup> 王振宇<sup>1)</sup> 刘 欣<sup>1)</sup>

1) 中国河北三河 065201 防灾科技学院

2) 中国北京 100036 地壳运动监测工程研究中心

**摘要** 基于自贡西山公园山体地形影响台阵和唐山响堂土层场地台阵的地震动记录, 采用互相关分析、相干系数分析、傅里叶谱比法和考虑相干系数的傅里叶谱比法, 对比研究了山体地形和土层场地两种局部场地条件对地震动的影响. 结果表明, 局部场地条件下的地震动效应与地震波的频率成分相关. 低频地震波由于其波长较长, 易于穿过土层场地和山体地形发生衍射, 从而导致二者地震动显著相关, 但二者在该频段的地震动场地效应差异不大; 较高频率的地震波由于其波长较短, 更容易受土层场地条件和山体地形条件的影响, 造成二者地震动场地效应差异显著. 此外, 由于山体顶部的尺寸变小, 低频长波长地震波容易在该位置发生衍射, 导致山顶周边测点的地震动相关性增加, 而较高频率的地震波则容易引起山顶局部场地发生共振效应. 山体地形上相邻位置的地震动差异一般较大, 相关性较低, 这与山体地形不同位置的几何形状对较高频率的地震波影响有关; 山底基岩的地震动受山体地形的影响较小, 该位置的地震动效应机制尚需作进一步研究.

**关键词** 地形台阵 土层场地台阵 场地效应 互相关分析 相干分析 傅里叶谱比  
doi:10.11939/jass.2016.02.014 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

## Analyses on the effect of the local site conditions on the strong motion based on the array records

Wang Wei<sup>1)✱</sup> Liu Bideng<sup>1)</sup> Liu Peixuan<sup>2)</sup> Wang Zhenyu<sup>1)</sup> Liu Xin<sup>1)</sup>

1) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China

2) National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036, China

**Abstract:** Based on the strong motion records from the topography array of Xishan Park in Zigong and the soil site array of Xiangtang in Tangshan, this paper analyzes the site effects of soil site and hill topography on the ground motion by using the cross-correlation function, coherence function, the Fourier spectral ratio methods with and without consideration of coherence function.

\* 基金项目 中国地震局教师科研基金项目(20150107)、国家自然科学基金(51308118)和中央高校基本科研业务费专项资金(ZY20120103)联合资助.

收稿日期 2015-11-20 收到初稿, 2016-01-28 决定采用修改稿.

✱ 通讯作者 e-mail: wwwiem@163.com



The results show that the strong motion effect of the local site conditions is relevant to the frequency content of the input seismic wave. For the low frequency component, its wavelength is so long that it is easy to spread across the soil site and the hill topography, and the diffraction makes the strong motion of the two different local site conditions more related; however, the difference of the site effects in the low frequency band for the two local site conditions is weak. For the seismic wave with high frequency and short wavelength, the strong motion is more likely to be affected by the soil site and the hill topography, therefore the difference of the site effects on the strong motion with high frequency is obvious. In addition, with the decrease of the mountain-top dimension, the diffraction is easy to happen when the seismic wave with low frequency and long wavelength spreads to the mountaintop, leading to increase of the cross-correlation of the ground motions at the observing points surrounding the mountaintop. The resonance effect likely happens when the seismic waves with higher frequency spread to the mountaintop. The strong motion of the adjacent points on the hill topography changes greatly, and their correlation is low, which is caused by the effect of the geometrical shape on the strong motion with higher frequency on the different locations of the hill topography. The strong motion of the bedrock at the bottom of hill is weakly affected by the existence of the hill topography, and its mechanism of the strong motion needs to be further studied.

**Key words:** topography array; soil site array; site effect; cross-correlation analysis; coherence analysis; Fourier spectral ratio

## 引言

局部场地条件对地震动的影响一直是地震工程领域的研究热点. 场地条件对地表地震动会产生明显的影响, 是确定设计地震作用的关键因素. 对于土层场地, 研究人员一般从土层厚度、土层结构、土的动力学参数等方面研究场地覆盖土层对地震动的影响; 对于局部地形, 一般从地形的几何尺寸、物质组成、结构构造、入射地震动特性等方面展开数值模拟分析. 强震动观测的对象也多以土层场地为主, 专门针对山体地形的观测台阵较少, 一般很少将二者对地震动的影响加以对比分析, 而在某一局部范围内对土层场地和山体地形同时进行强震动观测的研究更是鲜有开展. 大型工程, 例如大跨度桥梁选址时, 桥墩往往位于不同的地貌单元, 在抗震设计过程中就需要考虑地震动的多点输入问题; 如果桥墩分别位于土层场地和山体上, 则两种局部场地条件的地震动效应差异势必会影响桥梁的响应. Yu 等(2014)对芦山地震动记录进行分析的结果表明, 随着断层距的增加, 山区的地震动衰减速度明显大于平原地区. 在土层场地和相邻山体布设强震动观测仪组成观测台阵, 就能够对这两种局部场地的地震动效应差异进行很好的观测, 因此基于强震动观测记录, 研究局部范围内土层场地与山体地形之间的地震动效应差异是有意义的.

傅里叶谱比法首先由 Borchardt(1970)提出, 采用场地及其附近参考场地之间地震动记录进行傅里叶谱幅值比分析. 该方法原理简单, 处理数据方便, 广泛应用于具有参考场地台阵的地震动场地效应研究(Davis, West, 1973; Çelebi, 1987; Geli *et al.*, 1988;

Bouchon *et al.*, 1996). Geli 等(1988)通过试验和理论分析,认为之前关于地形对地震动影响的研究结果只是在定性方面具有一致性,而数值模拟结果总是低估实际观测值. Davis 和 West(1973)利用傅里叶谱比法对山体的地形效应地震动记录进行分析,结果显示域内的峰值加速度比通常远小于频域内的傅里叶谱幅值比. Sánchez-Sesma 等(1986)采用均方根傅里叶谱比法衡量山体地形对地震动的影响, Paolucci(1999)则对地震动记录中不同分量交叉偶联效应对地震动记录傅里叶谱幅值比的影响进行了研究. 基于自贡西山公园地形影响台阵获得的 2008 年汶川主震记录,王海云和谢礼立(2010),杨宇等(2011)以及唐晖等(2012)分别利用傅里叶谱比法和 H/V 谱比法对自贡西山公园的山体地震动放大系数进行了分析.

本文拟基于自贡西山公园地形影响台阵在汶川地震中获得的主震记录,以及唐山响堂土层场地台阵获得的地震动记录,采用互相关分析、相干分析、传统傅里叶谱比法和考虑相干系数的傅里叶谱比法,对地形台阵中不同高度的台站和场地台阵中不同深度的观测点之间的地震动记录分别进行分析,以对比研究山体地形与土层场地两种局部场地条件对地震动场地效应的影响问题.

1 强震动观测台阵简介

自贡西山公园地形影响台阵(以下简称为自贡地形台阵),位于四川盆地南部的自贡市自流井区西山公园内,为“十五”国家重大项目“中国数字地震观测网络”中的固定台阵. 为获取反映地表地形对地震动影响的多点实测数据,台阵在水平自由地表场地、山脚、山底及山脊等位置布设了 8 个观测点,其中 0 号测点为地表土层测点,1 号测点为山底基岩测点,其余测点为山体基岩测点,各测点位置如图 1 所示(王伟等, 2015).

唐山响堂土层场地台阵始建于 1992 年,位于河北省唐山市滦县响堂乡杜峪村,是我国用于研究局部场地条件影响的第一个专用井下台阵,由 1 个基岩测点、2 个地表土层测点和 3 个井下测点(深度分别为 16.0 m, 32.0 m, 47.0 m)组成. 图 2 为响堂土层场地台阵测点分布剖面图,其中 1 号和 2 号测井的局部场地条件列于表 1. 3 号测井始建于 1997 年,

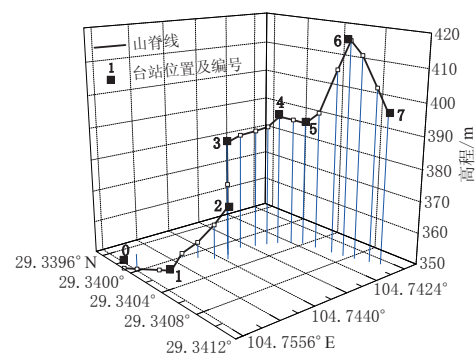


图 1 自贡地形台阵测点位置示意图  
(王伟等, 2015)

Fig. 1 Location schematic diagram of observation points in the Zigong topography array  
(after Wang *et al.*, 2015)

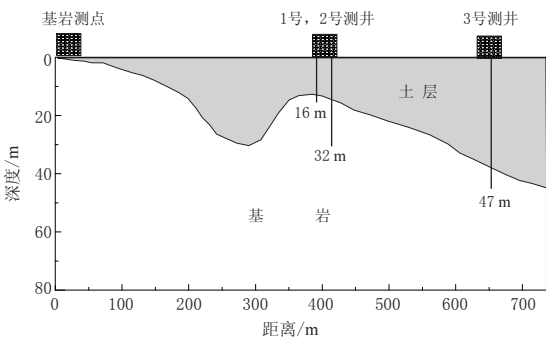


图 2 响堂土层场地台阵测点分布剖面图  
(卢滔等, 2006)

Fig. 2 Distribution of monitoring points in the Xiangtang soil site array  
(after Lu *et al.*, 2006)

2000 年 12 月初投入试运行,并于 2001 年 6 月安装普通市话线路,实现了北京强震观测中心与响堂井下台阵之间的有线遥测功能,使该台阵成为我国第一个具有遥测功能的局部场地条件影响台阵(卢滔等,2006).

表 1 响堂土层场地台阵中 1 号和 2 号测井的场地条件  
Table 1 Site conditions of the boreholes No. 1 and No. 2 in Xiangtang soil site array

层号	岩性	层厚/m	层底深度/m	波速/(m·s <sup>-1</sup> )
1	粉质黏土	4.78	4.78	249
2	细砂	2.45	7.23	270
3	粉土	0.85	8.08	249
4	黏土	4.19	12.27	249
5	强风化黑云变粒岩	6.02	18.29	538
6	强风化花岗质混合岩	13.62	31.91	552
7	中风化花岗质混合岩	0.40	32.31	552

本文分析使用的地震动记录,主要采用自贡地形台阵获得的 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震主震记录 1 组,以及响堂土层场地台阵 1 号和 2 号测井获得的 1994 年 9 月 3 日  $M_s1.6$  地震的地震动记录 1 组.

2 台阵记录的互相关分析和相干系数分析

互相关函数是描述信号  $x(t)$  某一时刻的取值与信号  $y(t)$  另一个时刻的取值之间的相关程度,表示为

$$r_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt, \tag{1}$$

式中,  $r_{xy}(\tau)$  为互相关函数,  $T$  为信号总持时,  $\tau$  为时延.

对于两个能量有限的离散信号  $x(n)$  和  $y(n)$ , 经过互相关分析得到的  $r_{xy}(\tau)$  即为二者之间的互相关系数. 互相关分析可以研究系统的时间滞后性质、系统输入信号与输出信号的互相关函数以及台阵中两个台站测点之间地震波传播的时间延迟. 对自贡地形台阵和响堂土层场地台阵的地震动记录进行基线校正和滤波处理, 基线校正采用 Boore(2001)的一次多项式方法, 滤波采用巴特沃斯(Butterworth)带通滤波器, 频带范围为 0.1—25.0 Hz, 校正后的记录基线漂移现象消除, 满足使用要求.

对自贡地形台阵 0—7 号测点的地震动加速度依次进行互相关分析, 考虑到 EW, NS 和 UD 方向的互相关分析结果类似, 仅将 EW 向的互相关系数结果示于图 3. 可以看出, 自贡地形台阵的 0—5 号测点, 其地震动加速度的互相关系数极低, 表明地震波在 0—5 号中的相邻测点之间的地震动特性变化显著, 差异性很大. 由互相关函数的定义可知, 对于 3 个变量  $x(t)$ ,  $y(t)$  和  $z(t)$ , 如果  $x(t)$  与  $y(t)$ ,  $y(t)$  与  $z(t)$  的互相关系数很大, 则  $x(t)$  与  $z(t)$  的互相关系数也一定很大. 例如, 图 3 中 5 号与 6 号测点的互相关系数  $r_{5-6}$  和 6 号与 7 号测点的互相关系数  $r_{6-7}$  的最大值分别为 0.84 和 0.82, 5 号与 7 号测点的互相关系数  $r_{5-7}$  的最大值则为 0.76, 表明 5 号、6 号与 7 号测点之间地震动相关性显著.

自贡地形台阵中地表土层 0 号测点和山底基岩 1 号测点分别与其它山体测点地震动的互相关分析结果分别如图 4 和图 5 所示. 可以看出, 虽然 0 号测点位于地表土层场地, 但

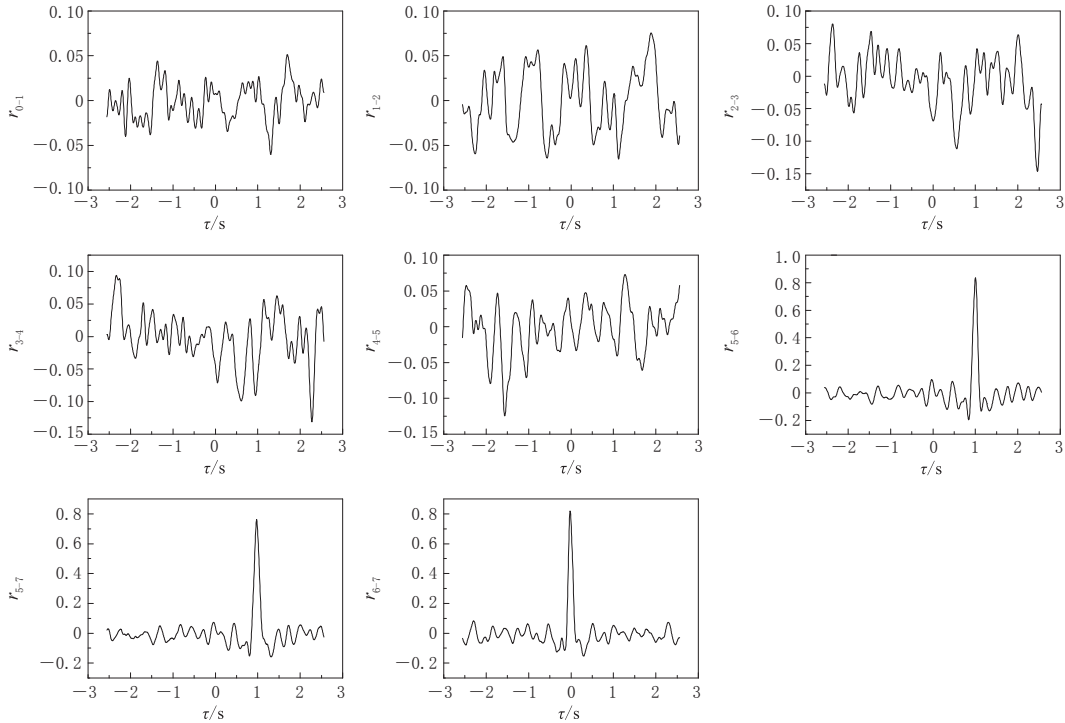


图 3 自贡地形台阵 1—7 号测点 EW 向加速度互相关系数

$r_{0-1}$  表示 0 号与 1 号测点的互相关系数，以此类推，下同

Fig. 3 Cross-correlation coefficients of the EW accelerations for the observation points Nos. 1—7 of the Zigong topography array  
 $r_{0-1}$  is the cross-correlation coefficient between the observation points No. 0 and No. 1, and so on, the same below

其与山体测点之间的互相关系数明显大于 1 号山底基岩测点与其它山体测点之间的互相关系数. 这是由于, 与 1 号山底基岩测点相比, 0 号地表土层测点与其余山体基岩测点的位置处于相似的地震波场环境. 如果山体地形的存在对山脚基岩位置处的入射地震波产生反射、折射及衍射等影响, 那么 1 号测点与其余山体基岩测点地震动的相关性应该是显著的; 而图 5 中该相关性极低, 这表明山体地形的存在对山底基岩位置处的地震动影响很小, 并且进一步证明了 Blume(1969, 1972)通过对地下人工核爆破条件下与建筑物不同距离的场点地震动反应的对比分析, 认为建筑物的存在对其周围场地地震动反应影响很小的结论.

相干函数, 又称为凝聚函数, 其表达式为

$$c_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)}, \tag{2}$$

式中,  $c_{xy}(f)$  为相干函数,  $P_{xy}(f)$  为互功率谱,  $P_{xx}(f)$  和  $P_{yy}(f)$  分别为两个信号的自功率谱. 相干函数反映了两个信号进行互功率谱计算中外来不相干影响的大小, 相干系数越大表示受外来影响越小.

对自贡地形台阵测点的 EW 向地震动加速度进行相干系数分析的结果如图 6 所示. 可以看出, 自贡地形台阵中 0—5 号测点的相干系数很小, 表明各测点之间受外来信号影响较

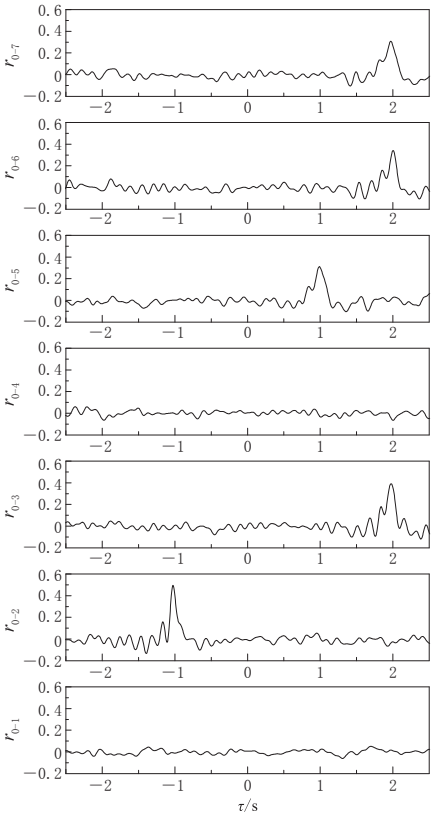


图 4 自贡地形台阵 0 号测点与其它测点的地震动加速度互相关系数

Fig. 4 Cross-correlation coefficients of strong motion acceleration between the observation point No. 0 and the others in the Zigong topography array

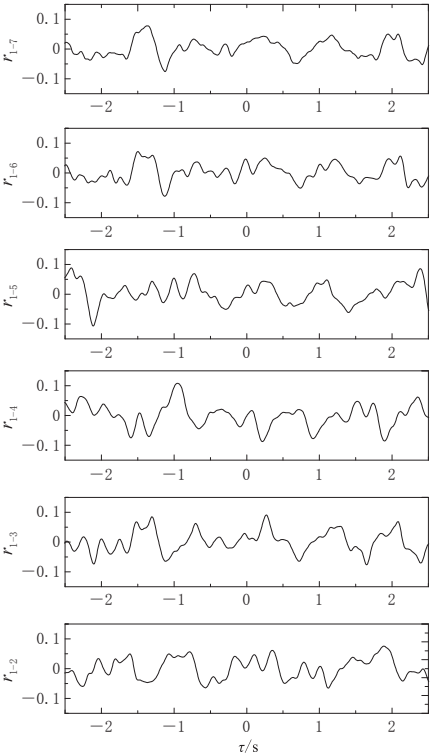


图 5 自贡地形台阵 1 号测点与其它测点的地震动加速度互相关系数

Fig. 5 Cross-correlation coefficients of strong motion acceleration between the observation point No. 1 and the others in the Zigong topography array

大. 由于山体地形的起伏变化, 这些测点的局部地形差异很大, 因此地震动特性变化显著, 结合图 3 中 1—5 号测点之间的互相关系数较小的特点, 进一步说明这些测点之间的地震动相对独立. 就测点之间的相干系数所对应的频段范围来看,  $c_{0-1}$  和  $c_{1-2}$  在全频段范围内均小于 0.2;  $c_{2-3}$ ,  $c_{3-4}$  和  $c_{4-5}$  在 5.0 Hz 以下频段总体稍高于 5.0 Hz 以上频段; 5—7 号测点在 5.0 Hz 以下频段的相干系数突然增大, 整体明显高于 5.0 Hz 以上频段, 表明这 3 个测点的地震动在该频段范围内相干性很强. 另外, 考虑到 5—7 号这 3 个测点之间的地震动互相关系数很大, 即地震波在山顶测点之间发生传播, 因此将 5 号和 7 号测点作为地震动输入, 最高的 6 号测点作为输出, 得到相应的傅里叶谱幅值比  $S_6/S_5$  和  $S_6/S_7$ , 如图 7 所示.

由图 7 可知, 山顶测点之间的傅里叶谱幅值比在 5.0 Hz 以下的放大系数约为 1.0, 即没有明显的放大效应. 导致这种现象的原因, 一方面是在山体基岩中传播的地震波中 5.0 Hz 以下的波长较长; 另一方面, 5—7 号测点位于山顶, 山顶的尺寸相对底部显著变小 (图 1), 因此该频段范围对应的较长波长的地震波很容易在山顶附近位置发生衍射, 从而导致山顶测点的地震动在该频段范围内的相干系数很大, 而傅里叶谱幅值没有明显放大.

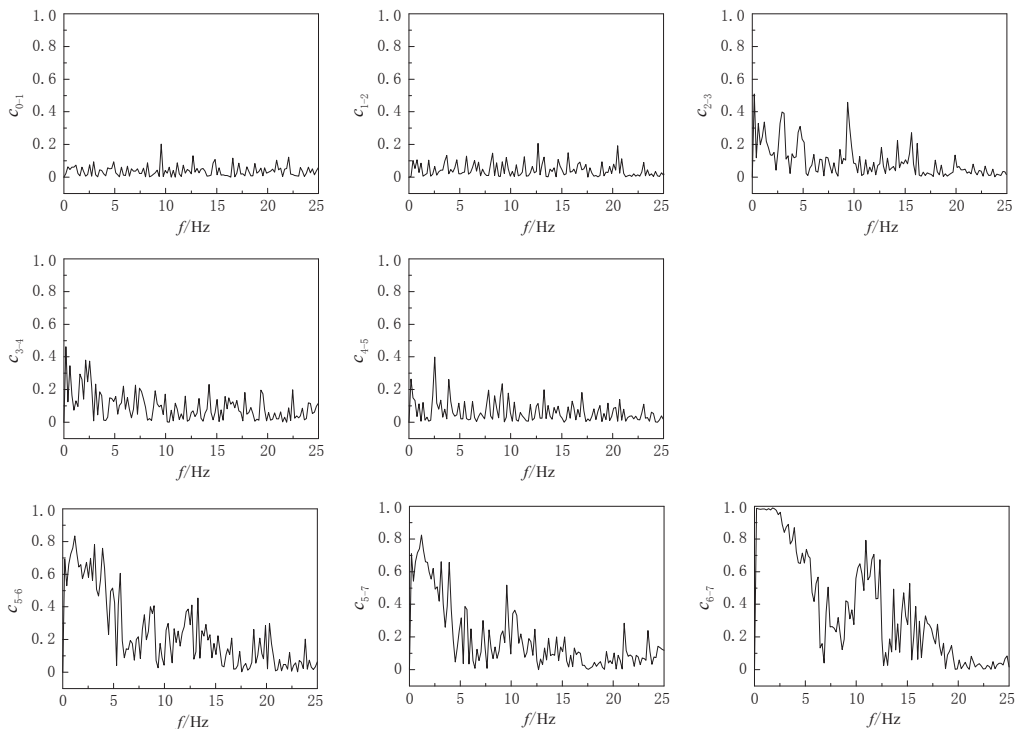


图 6 自贡地形台阵测点 EW 向加速度相干系数

$c_{0-1}$  表示 0 号与 1 号测点之间的加速度相干系数，以此类推，下同

Fig. 6 Coherence coefficients of the EW acceleration for the observation points in the Zigong topography array

$c_{0-1}$  is the coherence coefficient between the observation points No. 0 and No. 1, and so on, the same below

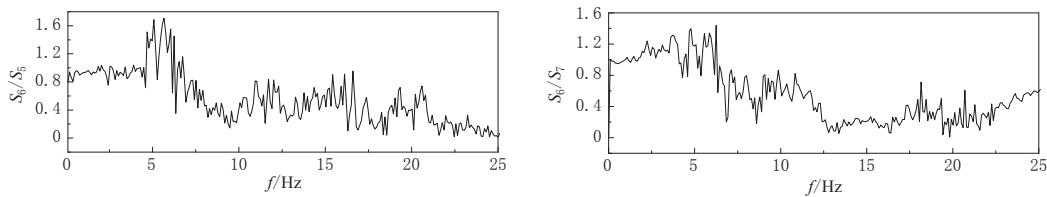


图 7 自贡地形台阵山顶测点傅里叶谱幅值比

Fig. 7 Fourier spectral ratio of the observation points at the top of Zigong topography array

在 5.0—6.0 Hz 的频段范围内，放大系数有明显提高，最大值可达 1.70，其原因是地震波在该频段范围的频率成分与山顶的自振频率相当，从而发生共振效应；6.0—25.0 Hz 范围内的傅里叶谱幅值比显著小于 1，说明山顶对该频段范围内的地震动产生了明显的压制作用。

对自贡地形台阵的地表土层 0 号测点与山体基岩测点在 EW 向地震动加速度进行相干系数分析，结果如图 8 所示。可以看出，自贡地形台阵中 0 号与 1 号测点的相干系数在所有频段范围均极小；0 号测点与其余山体基岩测点之间的相干系数在 0—2.0 Hz 频段范围内明显大于 2.0 Hz 以上频段。这正好可以解释图 4 中 0 号测点与这些测点相关性显著

的现象，即入射地震波中 2.0 Hz 以下频段范围对应的波长较长，其很容易穿过土层场地和山体地形发生衍射，导致这两种局部场地条件下的地震动显著相关. 在 2.0 Hz 以上的频段范围，0 号测点与其余基岩测点之间的相干系数显著降低，表明土层场地与山体地形这两种不同的局部场地条件对较高频率的地震波会产生明显不同的场地效应.

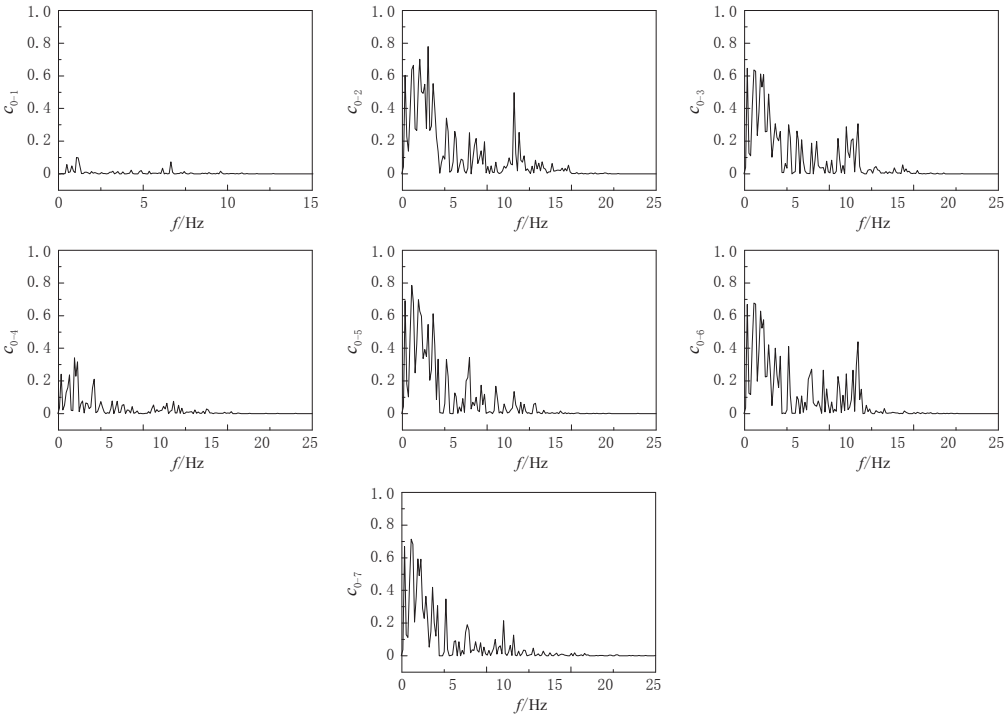


图 8 自贡地形台阵 0 号测点与其它测点的 EW 向加速度相干系数

Fig. 8 Coherence coefficients of the EW acceleration between the observation point No. 1 and the others in the Zigong topography array

3 山体地形台阵记录的傅里叶谱分析

王伟等(2015)关于自贡地形台阵地表土层测点与山体测点 EW, NS 和 UD 向 3 个分量的加速度傅里叶谱进行研究的结果显示，对于相同分量，各测点在 2.0 Hz 以下的低频段傅里叶谱幅值有较好的吻合. 该现象与地表土层测点与山体基岩测点以及山体基岩测点之间地震动在低频段范围互相关系数、相干系数较大的分析是一致的，即低频段地震波增加了土层场地和山体地形地震动的相关性和傅里叶谱幅值的一致性. 随着测点高程的增加，在 2.0—5.0 Hz 范围内，傅里叶谱幅值明显变大，且傅里叶谱幅值差异性显著增大. 根据地震动互相关分析和相干系数分析可知，这是由于土层场地和山体地形不同位置对地震动中高频成分的场地效应差异性所致. 地表土层测点相对于其它山体基岩测点，在 5.0—9.0 Hz 的频段范围内出现明显峰值，下面分析出现这种现象的原因.

自贡地形台阵的地表土层场地地震动幅值较小，处于线弹性状态，且其底部无竖井台阵，考虑到场地条件的相似性，决定采用响堂土层场地台阵 1994 年 9 月 3 日  $M_s1.6$  地震的地震动记录分析场地不同深度地震动的傅里叶谱幅值比. 为了避免台阵中不同深度土层



下行反射波波场与上行波场发生相消干涉，导致参考场地的地震动傅里叶谱在特定频段的幅值大大降低，产生谱洞，并在其中出现假共振现象(王海云，2014)，本文采用 Steidl 等(1996)提出的考虑相干系数的傅里叶谱比法对响堂土层场地台阵地震动记录进行数据处理，分析土层场地对地震动的放大效应机制。EW，NS 和 UD 向不同深度的加速度傅里叶谱幅值比如图 9 所示。

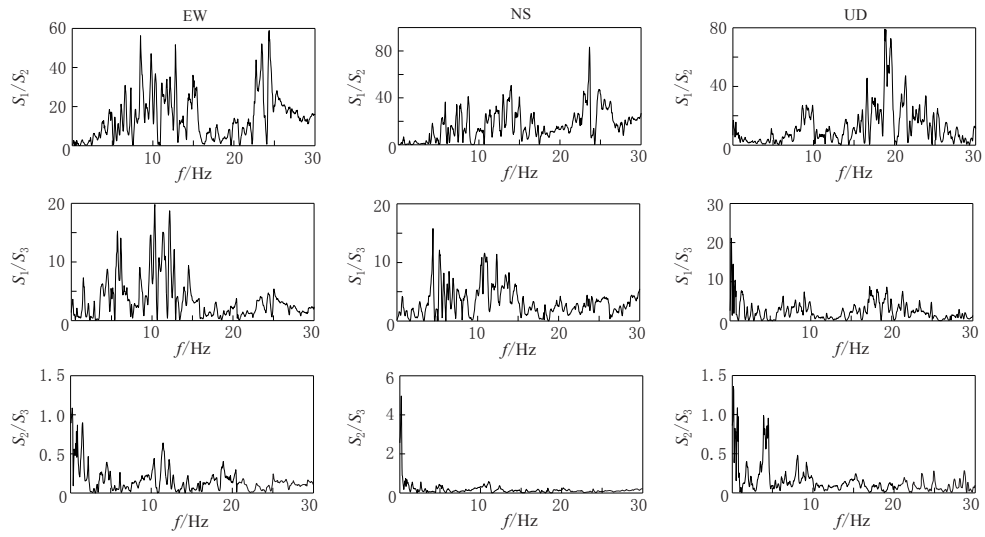


图 9 响堂土层场地台阵测点的加速度傅里叶谱幅值比

下标 1、2 和 3 分别代表了场地竖井台阵中深度为 0、16 m 和 32 m 的 3 个测点

Fig. 9 Fourier spectral amplitude ratio of the acceleration for the observation points in the Xiangtang soil site array

Subscripts 1, 2 and 3 represent the three observation points with depth 0, 16 m and 32 m, respectively

由图 9 分析可知，对于竖井台阵 3 个分量不同深度的加速度傅里叶谱幅值比，绝大多数在 0—5.0 Hz 频段内较低，而在 5.0 Hz 以上的频段内显著增大；这与台阵所处的土层场地条件有关，即覆盖层厚度较薄且剪切波速较高的场地，更有利于放大较高频率的地震波，而低频段地震波的波长较长，更容易穿过覆盖土层发生衍射现象，这就解释了自贡地形台阵地表土层 0 号测点地震动傅里叶谱在 5.0—9.0 Hz 频段内出现的峰值现象。

4 讨论与结论

基于自贡西山公园地形台阵和唐山响堂土层场地台阵的地震动记录，进行地震动的互相关分析、相干系数分析、傅里叶谱比法和考虑相干系数的傅里叶谱比分析。由于自贡西山公园中地表土层测点与山体基岩测点距离较近，其震源效应和传播路径效应基本一致，对入射地震波产生的影响主要是由于这两种局部场地条件自身差异所致。对于山体测点，其位置分布在基岩上，因此对地震动的山体地形效应主要受山体局部几何形状、尺寸和地震波入射角度等因素的影响。如何考虑山体基岩上覆土层与山体基岩地形对地震动的耦合效应尚需进一步研究。对山体地形台阵地震动记录分析显示，其地震动的互相关性和傅里叶谱形状的特点均与不同频段范围内的相干系数大小有较好的一致性。通过上述分析，得出以下结论和建议：

1) 土层场地和山体地形的地震动效应受地震波频率成分的影响显著. 对于自贡西山公园台阵中的这两种局部场地条件, 由于低频地震波的波长较长, 因此容易穿过场地土层和周边的山体地形发生衍射现象, 并导致两种局部场地条件的地震动显著相关, 该地震动特点在跨越土层场地和山体地形的大跨度桥梁抗震设计中必须考虑. 另外, 这种低频地震波的类型和成因需要进一步研究. 这两种局部场地对地震波中较高频率成分的地震动影响机制不同, 导致相应频段范围内地震动相干系数较低, 即土层场地与山体地形在较高频段的地震动效应差异显著.

2) 山体的顶部由于局部尺寸变小, 地震波中的低频长波长地震波更容易发生衍射, 导致山顶周边测点的地震动在低频段的相关系数和相干系数增加; 较高频段的地震波则容易在山顶位置引起共振效应.

3) 山体地形上相邻位置的地震动差异性一般较大, 且相关性低, 这与山体地形不同位置的几何形状差异有关; 山底基岩与其余山体基岩测点地震动的互相关分析和相干系数分析表明, 山底的地震动受山体地形的影响较小, 该位置的地震动效应机制尚需进一步研究.

## 参 考 文 献

- 卢滔, 周正华, 周雍年, 仲维照. 2006. 关于 Nakamura 方法有效性的讨论[J]. 地震工程与工程振动, **26**(1): 43–48.
- Lu T, Zhou Z H, Zhou Y N, Zhong W Z. 2006. Discussion on validation of Nakamura's technique[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **26**(1): 43–48 (in Chinese).
- 唐晖, 李小军, 李亚琦. 2012. 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. 振动与冲击, **31**(8): 74–79.
- Tang H, Li X J, Li Y Q. 2012. Site effect of topography on ground motions of Xishan Park of Zigong city[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **31**(8): 74–79 (in Chinese).
- 王海云, 谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, **53**(7): 1631–1638.
- Wang H Y, Xie L L. 2010. Effects of topography on ground motion in the Xishan Park, Zigong city[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(7): 1631–1638 (in Chinese).
- 王海云. 2014. 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, **57**(5): 1498–1509.
- Wang H Y. 2014. Study on variation of soil site amplification with depth: A case at Treasure Island geotechnical array, San Francisco bay[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(5): 1498–1509 (in Chinese).
- 王伟, 刘必灯, 刘欣, 杨明亮, 周正华. 2015. 基于汶川  $M_s 8.0$  地震强震动记录的山体地形效应分析[J]. 地震学报, **37**(3): 452–462.
- Wang W, Liu B D, Liu X, Yang M L, Zhou Z H. 2015. Analysis on the hill topography effect based on the strong ground motion records of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(3): 452–462 (in Chinese).
- 杨宇, 李小军, 贺秋梅. 2011. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. 震灾防御技术, **6**(4): 436–447.
- Yang Y, Li X J, He Q M. 2011. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan Park[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **6**(4): 436–447 (in Chinese).
- Blume J A. 1969. Response of highrise buildings to ground motion from underground nuclear detonations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **59**(6): 2343–2370.
- Blume J A. 1972. Highrise building characteristics and responses determined from nuclear seismology[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **62**(2): 519–540.
- Boore D M. 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(5): 1199–1211.

- Borcherdt R D. 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **60**(1): 29–61.
- Bouchon M, Schultz C A, Toksöz M N. 1996. Effect of three-dimensional topography on seismic motion[J]. *J Geophys Res*, **101**(B3): 5835–5846.
- Çelebi M. 1987. Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4): 1147–1157.
- Davis L L, West L R. 1973. Observed effects of topography on ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **63**(1): 283–298.
- Geli L, Bard P Y, Jullien B. 1988. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **78**(1): 42–63.
- Paolucci R. 1999. Numerical evaluation of the effect of cross-coupling of different components of ground motion in site response analyses[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(4): 877–887.
- Sánchez-Sesma F J, Faccioli E, Fregonese R. 1986. An index for measuring the effects of topography on seismic ground motion intensity[J]. *Earthq Eng Struct Dynam*, **14**(5): 719–731.
- Steidl J H, Tumarkin A G, Archuleta R J. 1996. What is a reference site? [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(6): 1733–1748.
- Yu T, Lu M, Li X J. 2014. Analysis of strong ground motion characterization in 2013 Lushan earthquake[J]. *Appl Mech Mater*, **580/581/582/583**: 1499–1505.