

## 岷县漳县 6.6 级地震黄土场地 放大效应地脉动测试研究<sup>①</sup>

严武建<sup>1,2,3</sup>, 吴志坚<sup>1,2,3</sup>, 车爱兰<sup>4</sup>, 钟鹏飞<sup>4</sup>, 陈豫津<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地震局 黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;  
3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000; 4. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:**2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县  $M_s 6.6$  级地震在极震区出现了黄土场地放大效应, 为了从理论上解释黄土场地放大效应的原理, 本文利用地脉动测试了极震区 2 个典型的黄土场地进行研究。结果发现: 在黄土覆盖地区场地卓越频率特征显著, 即在同一区域内山顶卓越频率较低, 集中在 1~2 Hz, 山沟卓越频率较高, 集中在 3~6 Hz; 同时, 黄土场地随着高程的增加表现为厚黄土分布特征, 其场地卓越频率在 1.3~1.8 Hz, 与地震观测波的卓越频率 1.0 Hz 接近, 呈现出较明显的场地放大效应。结果与实际受灾情况相符。

**关键词:** 岷县漳县 6.6 级地震; 地脉动测试; 黄土场地; 卓越特征; 放大效应

**中图分类号:** TU413.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)03-0477-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0477

## Microtremor Measurement Research of Amplification Effect in the Loess Site of the MinXian—ZhangXian $M_s 6.6$ Earthquake

YAN Wu-jian<sup>1,2,3</sup>, WU Zhi-jian<sup>1,2,3</sup>, CHE Ai-lan<sup>4</sup>, ZHONG Peng-fei<sup>4</sup>, CHEN Yu-jin<sup>1,2,3</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** An  $M_s 6.6$  earthquake occurred on July 22, 2013, in Minxian—Zhangxian, Gansu province, and the amplification effect of the loess site appeared in meizoseismical area. To explain the principle of amplification effect of loess site in theory, we measured and researched two typical loess sites by using microtremor measurement. The results show that, the damage of adobe house is more serious on the summit than on the gully. On the summit the damage of adobe house is serious and there are even entire collapses, but on the gully there are cracks and not collapse of adobe house. The intensity difference between the summit and gully is intensity I ~ II, which shows obvious amplification effect of the massif. In the paper, we have made contrastive study of the predominant frequency of microtremor measurement by choosing two typical areas of the obvious amplification effect of loess site at the meizoseismal area (intensity 8), which are Yongxing village and Daleng village, Majiagou village and Xinglin village in Meichuan town, Minxian County. At Yongxing village and Majiagou village, the damage of adobe house is serious and there are

① 收稿日期: 2013-09-06; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013070

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ01); 甘肃省地震局科技发展基金(2012S02); 甘肃省自然科学基金(1107RJYA024)

作者简介: 严武建(1980—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事地震工程及地震活动性研究. E-mail: yanwj1980@126.com

entire collapses. However, at Daleng village and Xinglin village, there are cracks and not collapse of the same adobe house. The earth pulsation has rich geophysics information, which is aggregation of body wave and surface wave. In the paper, the principle, test method and causes of ground microtremors are introduced. According to engineering examples, the determination for the predominant period of a site is described, moreover, its application in evaluation for the category of the site and soil and the effect of different site conditions on the characteristics of frequency spectrum are analyzed. The results show that the thick soil and thin soil structure obviously affect the frequency spectra of the ground microtremors, and there are corresponding relationships between them. The research results show: the characteristic of predominant frequency of the site is obvious in the covered loess area, in which the predominant frequency is lower on the summit than on the gully, the range of which is 1~2 Hz and 3~6 Hz respectively; Meanwhile, with the increase of the altitude of the loess site, which shows the distribution characteristic of thick loess, the range of the site predominant frequency is 1.3~1.8 Hz, which is similar to the predominant frequency 1 Hz of earthquake observation wave and shows obvious amplification effect of the site, which is the same with the actual damage fact.

**Key words:** Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  earthquake; microtremor measurement; loess site; predominant characteristic; amplification effect

## 0 引言

2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县发生  $M_s6.6$  地震,地震造成了巨大的人员伤亡和经济损失。通过对极震区的现场灾评发现,在山顶和山沟相同结构的土木农居破坏呈现出明显的沿山体自下向上的震害加重的趋势。山顶的土木结构农居破坏严重甚至倒塌,山沟的农居有裂缝而无倒塌,其上下的烈度差异达 I~II 度,表现出明显的山体放大效应。为了从物理意义上解释这一现象,本文利用地脉动法研究岷县、漳县  $M_s6.6$  地震黄土场地放大效应。本文专门选取了本次地震极震区(Ⅷ度区)内 2 个典型的黄土场地放大效应明显的地区进行地脉动卓越频率对比研究,即岷县梅川镇永星村与大庵村、马家沟村与杏林村。其中在永星村和马家沟村,土木结构农居破坏严重甚至倒塌,而在大庵村和杏林村同样的土木结构农居有裂缝而无倒塌。

## 1 地脉动观测与设备

地脉动是具有丰富内涵的地球物理信息,是体波与面波的集合体,由地下震源处产生的地脉动信号经过不同地下构造的多次折射与反射,积累了观测区域场地固有物理信息<sup>[1]</sup>。

通过地脉动观测进行地下勘探的方法已有了长期的积累应用。该方法具有设备轻便、操作简单、省时省力、经济环保等优点,并且能够在人口密集的城镇区域实施,是一种快速获取地下构造的有效方法。

地脉动的面波频率范围为 0.2~10.0 Hz,与引起地震灾害的地震波频率(0.1~10.0 Hz)范围基本相同,而传统方法(如地震勘探法)所用震源频率一般在几十赫兹到几千赫兹,可见利用长周期地脉动方法建立的地下构造模型将有可能反映地震时的场地响应,在我国的震害防御工作中具有较为广阔的应用前景。

此次检测设备采用的是日本东京测振株式会社生产的网络型速度型地震仪(CV-374AV)。设备主要包括三分量检波器、记录 CF 卡、GPS、电源等,如图 1 所示。设备各项参数如表 1 所示。



图 1 网络型速度型地震仪

Fig. 1 Seismometer of network and velocity type used in the research

表 1 速度型地震仪参数

Table 1 Parametes of the seismometer of network and velocity type

输入最大电压	$\pm 4.0 \text{ V}, \pm 10.0 \text{ V}$
放大倍数	$\times 1$
采样频率	100、200、500、1 kHz
AD 分辨率	24 bit
分辨率	$0.25 \mu\text{m/s}(25 \mu\text{vine})$
通道间的偏差	1 m 秒以内
记录时间	1 分单位,可变长、最大 10 分
记录媒体	CF 卡、最大 2 GB FAT32 格式
波形格式	WIN32、东京测振格式
时刻同步	$\pm 0.62 \text{ ppm}$ 以内 (针对 GPS)
使用温度范围	$0^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$
尺寸	$180 \text{ mm(W)} \times 120 \text{ mm(D)} \times 100 \text{ mm(H)}$ 、 不含突出部
重量	1.5 kg 以下

## 2 数据分析方法

### 2.1 快速傅里叶变换

国内外大量的研究资料表明地脉动是一种平稳的随机过程,其统计特性不随时间变化。为了研究地脉动频率分布密度函数,即各频率成分的大小和能量分布,我们采用离散 FFT 方法求其傅里叶频谱然后进行分析。设地脉动为时间的函数,用  $X(t)$  表示,则将它由时域变换到频域的离散傅里叶快速变换

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} X(t)e^{i\omega t} dt \quad (1)$$

式中: $\omega$  为频率; $T$  为周期; $t$  为时间。

### 2.2 单点谱比法

$H/V$  频谱分析方法是 Nakamura 推广,在欧美得到广泛应用的单台  $H/V$  谱比法。早在 1970 年 Borchardt 就提出了参考基岩台计算沉积场地放大效应经验转换函数  $S_e, R$  的谱比法,即

$$S_{e,R} = \frac{S_S(f)}{S_B(f)} \quad (2)$$

式中, $S_S(f)$  和  $S_B(f)$  分别为沉积场地(S)和基岩(B)观测记录的频谱。因为水平分量的场地放大效应大于垂直分量,故

$$S_{e,R} = \frac{H_S(f)}{H_B(f)} \quad (3)$$

式中, $H_S(f)$  和  $H_B(f)$  分别为沉积场地和基岩观测记录的水平分量频谱。

Nakamura 利用深井微震实验证明在井下基岩处水平分量  $H_B(f)$  和垂直分量频谱  $V_B(f)$  几乎相等,且沉积场地和基岩处的垂直分量频谱亦近似相等( $H_B(f) \approx V_B(f) \approx V_S(f)$ ),进而提出了不需要基

岩参考台二进行场地效应评估的单台  $H/V$  谱比法,即场地地表放大效应的经验转换函数  $S_e$  为

$$S_e = \frac{H_S(f)}{V_S(f)} \quad (4)$$

式中, $H_S(f)$  和  $V_S(f)$  分别为沉积场地地脉动观测记录的水平分量和垂直分量的频谱。上式再转化为我们所需要的频谱比公式,即

$$A_H/V = \frac{H_S(f)}{V_S(f)} = \frac{\sqrt{|H_{S,EW}(f)|^2 + |H_{S,NS}(f)|^2}}{|V_{S,UD}(f)|} \quad (5)$$

式中, $A_H/V$  为 FFT 频谱的 EW 向和 NS 向水平谱分量  $H_{S,EW}$ 、 $H_{S,NS}$  经矢量合成与 UD 方向垂直谱分量  $V_{S,UD}$  的比值。

$H/V$  频谱分析方法建立在以下假设条件下:①  $A_H/V$  值与场地条件有关,在坚硬的岩石上, $A_H/V \approx 1$ ;② 对于非岩性土场地,它们同时被基岩以上的非岩性表层土放大,水平方向的震动经 S 波的多次反射放大,而竖向方向的震动幅度与放大前差别不大;③ 瑞利波对微动的影响程度可以通过微动表层和基底竖向振动的速度谱比求得。因此,可以使用地表脉动水平分量谱与竖向分量谱的比来获得场地固有特性信息。

## 3 现场数据采集

脉动测试条件根据工程规模和性质以及地质构造的复杂程度来确定。脉动观测点的位置力求具有代表性,以便进行材料对比,提高测试结果的可靠性,将测点安置在比较安静平坦的地方,以确保消除周围环境的干扰影响使地脉动微弱振动信号不被干扰信号淹没。

根据地震灾害调查结果选择两处典型地质区域作为观测区域。



图 2 区域一测点位置

Fig. 2 Test positions on the first area

(1) 区域一内布设 5 个观测点(图 2),分别为:

测点 1:永星村山顶处,北纬  $34^{\circ}30'45''$ ,东经  $104^{\circ}10'08''$ ,海拔 2 775 m;

测点 2:永星村打麦场,北纬  $34^{\circ}30'45''$ ,东经  $104^{\circ}9'41''$ ,海拔 2 626 m;

测点 3:永星村小学,北纬  $34^{\circ}30'33''$ ,东经  $104^{\circ}9'30''$ ,海拔 2 645 m;

测点 4:大竜村村口,北纬  $34^{\circ}29'54''$ ,东经  $104^{\circ}08'00''$ ,海拔 2 375 m。

(2) 区域二内布设 2 个观测点(图 3),分别为:



图 3 区域二测点位置

Fig. 3 Test positions on the second area

测点 5:马家沟村小学处,北纬  $34^{\circ}33'45''$ ,东经  $104^{\circ}05'16''$ ,海拔 2 446 m;

测点 6:杏林村村口,北纬  $34^{\circ}32'53''$ ,东经  $104^{\circ}04'11''$ ,海拔 2 309 m。

每个观测点选取的记录长度为 40 min,采样步长 0.005 s,总采样个数为 480 000。图 4 为具有代表性观测点(观测点 3)的观测波形,可以看出其脉动波形为平缓的随机变化曲线,脉动波形包括无数个频率分量。但因其由强度相等的正弦叠加而成,所以只要观测和测试条件良好,得到的脉动波形可用来进行相关的频谱分析。

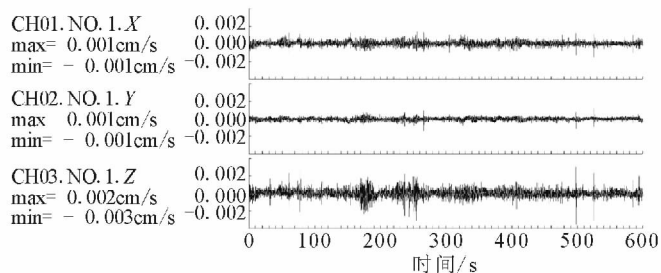


图 4 代表性测点观测波形(测点 3)

Fig. 4 Observation waveform of the typical test position (the third test position)

## 4 场地卓越特征分析

### 4.1 FFT 特征

进行数据处理时,首先采用频率上限 50 Hz 的低通和频率下限 0.1 Hz 的高通滤波器,然后在频率域内采用了汉宁窗平滑,窗宽  $b=0.1$  Hz。平滑化不会使波形的本质受到畸变。从每个测点 40 min 观测时间中选取 5 组 80 s 相对平稳的数据进行快速傅里叶分析,对 5 组数据取平均值作为该测点的 FFT 分析结果。图 5 为代表性测点 5、6 的 FFT 分析结果,可以看到该场地 FFT 卓越特征水平向(NS、EW)主要集中在约 2 Hz,垂直向(UD)主要集中在约 5 Hz。

### 4.2 场地单点谱比特征

对所有观测点数据进行单点谱比分析(图 6)。场地卓越频率及其卓越振幅如表 2 所示。可以看到,场地卓越特征显著,表现为高海拔区域卓越频率较低,集中在 1~2 Hz,低海拔地区卓越频率较高,集中在 3~6 Hz。

表 2 各测点卓越频率与振幅

Table 2 Predominant frequencies and amplitudes of every test point

编号	H/V	
	频率/(Hz)	振幅
测点 1	1.6	0.37
测点 2	1.5	2.0
测点 3	1.3	2.0
测点 4	5.6	4.4
测点 5	1.8	2.6
测点 6	2.47	4.2

将两区域场地的地理信息及卓越特征示意图 7 所示。可以看到,黄土场地随着高程的增加,表现为厚黄土分布特征,其场地卓越频率在 1.3~0.8 Hz,与地震观测波的卓越频率 1.0 Hz 接近,呈现出较明显的场地放大效应,并与实际受灾情况相符。

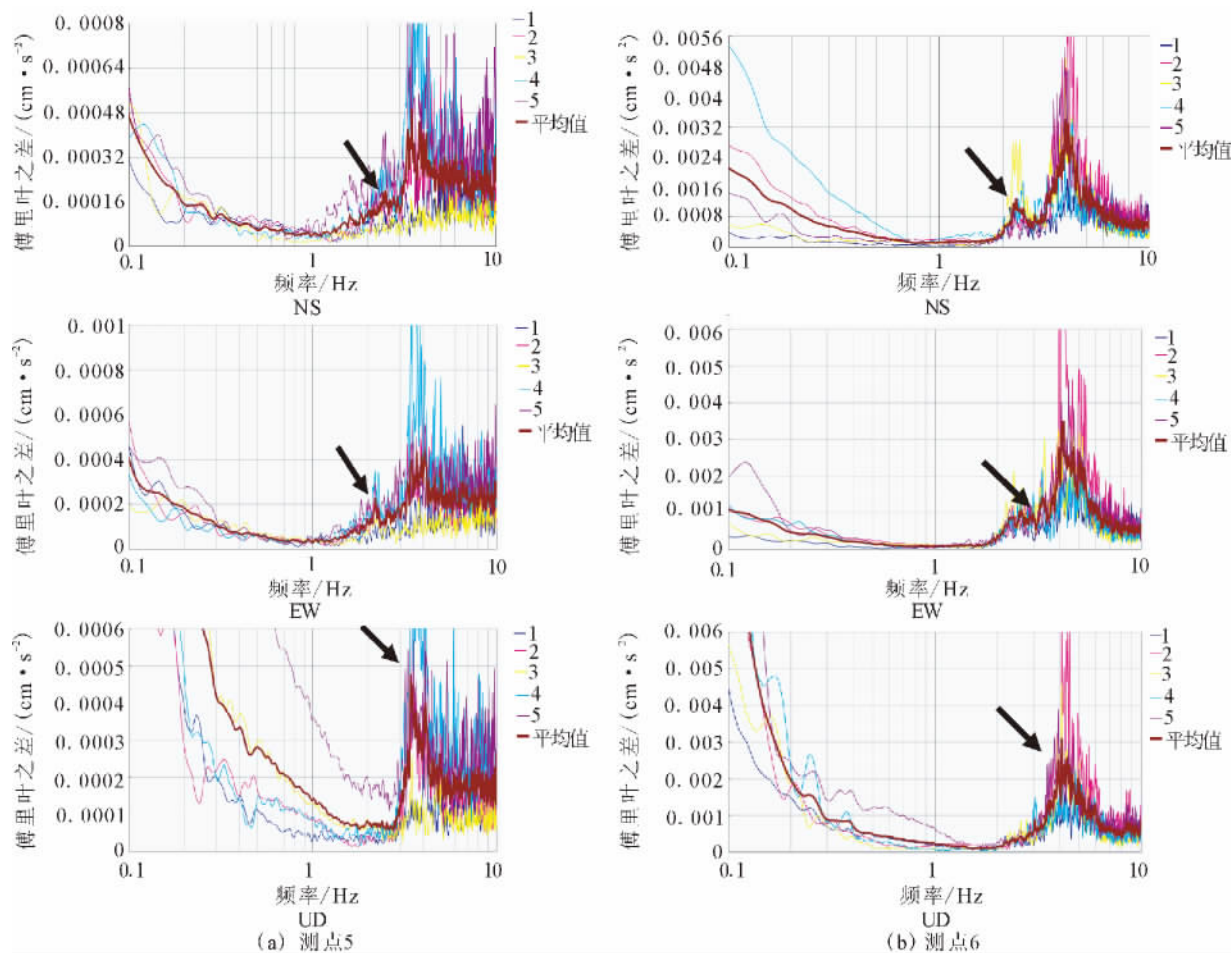


图5 FFT频谱特征(测点5、6)

Fig. 5 Characteristics of FFT frequency spectrum (at the fifth and sixth test positions)

#### 4 结论

通过对2013年7月22日岷县漳县 $M_s6.6$ 地震极震区场地效应明显的区域进行地脉动测试,我们可以得出以下结论:

(1) 通过地脉动信号的频谱分析来探讨场地岩土的动力特性,具有成本低廉,测试方便,效果显著的特点,在不适宜钻探以进行剪切波速测试的场地尤为适用。

(2) 在黄土覆盖地区场地卓越频率特征显著,即在同一区域内山顶卓越频率较低,集中在 $1\sim 2$  Hz;山沟卓越频率较高,集中在 $3\sim 6$  Hz。

(3) 黄土场地随着高程的增加表现为厚黄土分布特征,其场地卓越频率在 $1.3\sim 1.8$  Hz,与地震观测波的卓越频率 $1.0$  Hz接近,呈现出较明显的场地放大效应,并与实际受灾情况相符。

致谢:感谢参与地脉动现场测试工作的上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院老师冯少孔教授、研究生彭冬,中国地震局兰州地震研究所研究生雷

天。

#### 参考文献(References)

- [1] 刘建军,李跃明,车爱兰.长周期地脉动观测在西安地区地下构造调查中的应用[J].西北地震学报,2011,33(增刊):403-407,412.  
LIU Jian-jun, LI Yue-ming, CHE Ai-lan. Application of Long Period Microtremor Observation on Underground Structure Investigation in Xi'an Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 33( Supp): 403-407,412. (in Chinese)
- [2] Yabe T, Xiao Feng, Yuki Taka, et al. The Coast-rained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis[J]. J. Comput. Phys., 2001, 169:556593.
- [3] 师黎静,陶夏新,赵纪生.地脉动台阵方法的有效分析[J].岩土力学与工程学报,2006,25(8):1683-1690.  
SHI Li-jing, TAO Xia-xin, ZHAO Ji-sheng. Validation of Microtremors Array Method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 25(8): 1683-1690. (in Chinese)
- [4] 李智玲.表层微动的基本原理及在抗震作用中的作用[M].北京:地震出版社,1991:198-202.  
LI Zhi-lin. Function in Aseismic Effect and Fundamental Prin-



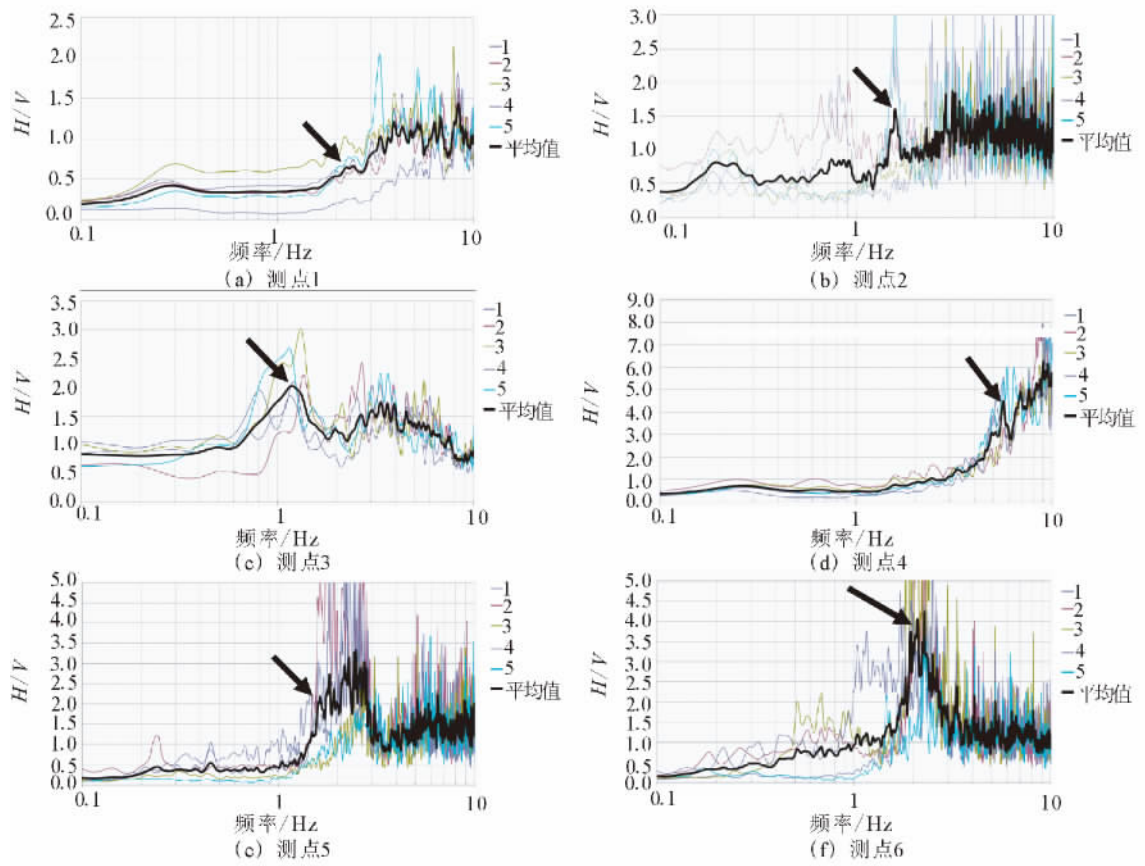


图6 各测点单点频谱分析结果

Fig. 6 Analytical results of single-point frequency spectrum of the test positions

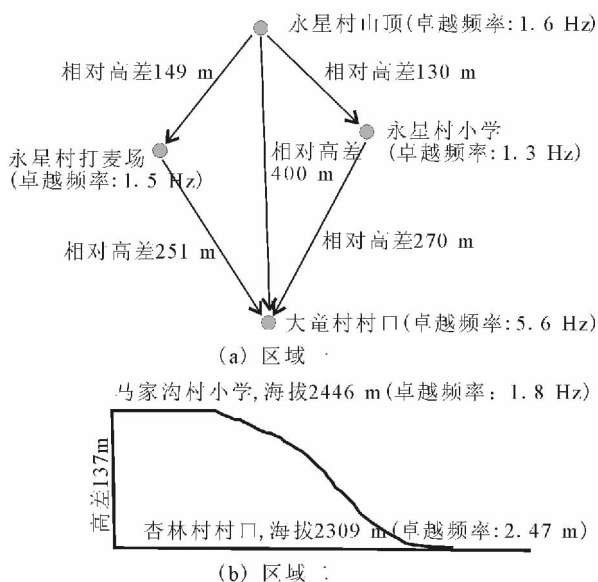


图7 各测点卓越特征分布与海拔高差关系

Fig. 7 Relationship between the distribute of predominant characteristics and altitude differences every test points

ciple of Surface Microseism[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1991: 198-202. (in Chinese)

- [5] Seekins L, Wennerberg L, Mwrgherinti, et al. Site amplification at Five Location in San Francisco, California, A Comparison of S-waves, Cudas and Microtremors[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1996, 86:627-635.
- [6] 上海市地质调查研究院. 上海地球物理勘探技术应用与发展[M]. 上海: 上海科技出版社, 2010: 165-167. Shanghai Research Institute of Geological Survey. Application and Development of Geophysics Prospection Technique in Shanghai[M]. Shanghai: Shanghai Technique Press, 2010: 165-167. (in Chinese)
- [7] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1988. WANG Zhen-dong. Applied Technique of Shallow Seismic Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. (in Chinese)
- [8] Sophia Hassiotis, Jeong Carrett D. Identification of Stiffness Reduction Using Natural Frequencies[J]. Journal of Engineering Mechanic, 1995, 10: 1106-1113.
- [9] 薄景山, 李秀领, 李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 11-15. BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LI Shan-you. Some Progress of Study on the Effect of Site Condition on Ground Motion[J]. World Earthquake Engineering Geology, 2003, 19(2): 11-15. (in Chinese)