第 36 卷 第 4 期
2014 年 12 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 36 No.4
Dec., 2014

近地表速度结构对场地强地震动特征的影响①

卢育霞[1,2,3]，石玉成[2]，万秀红[2]，马林伟[2]，卢芳琴[2]

(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)

摘要:近地表松散沉积层对地震波具有强烈的改造作用。为了揭示近地表速度结构对场地强地震动特征的影响机理,采用横波勘探和地脉动测试方法研究两个地震台站的场地条件,并对比分析场地测试结果与汶川地震记录的频谱特征。正如浅层地震勘探和地脉动数据所揭示的那样，MXT 地震台的强震记录中,对应横波图像 0.10 s 处强反射波的地震动分量(频率 5 Hz 左右)在该场地占明显优势,而对 0.22 s 的弱反射界面(对应的基频为 2.3 Hz)的反映并不明显,分析认为这一现象归因于地下 10～11 m 处粉土与卵石层间具有较大的波阻抗差异,因而造成地震反射图像上 0.10 s 附近的强振幅掩盖了 0.22 s 的反射波组,岷县强震记录频谱也显示为单峰值形态。横波勘探在 WUD 台获得的地震图像显示分别在 0.22 s 和 0.50 s 处有两组比较明显的反射波,其所对应的场地潜在响应频率分别为 2.3 Hz 和 1.0 Hz,WUD 台的强震记录频谱的形态也明显受这两个波阻抗界面的影响;通过对比地脉动与地震记录的频谱图,认为场地结构对地震信号与一般地脉动信号的影响是有差别的。研究表明:(1)剪切波的强阻抗界面深度及其平均波速是控制场地频谱主频的主要因素,近地表地层中阻抗强的界面对地震波的改造作用占主导地位;(2)近地表松散覆盖层的波速结构影响着场地地脉动频谱与地震动频谱的谱形变化;(3) 一般情况下,浅部强波阻抗界面对地脉动频谱特征的影响可能大于深部(百米以内),强震作用下深部波阻抗界面会使场地的响应主频向比其脉动基频更低的频段发展。

关键词: 速度结构; 地震台站; 横波勘探; 地脉动; 频谱特征

中图分类号: P135 **文献标志码**:A **文章编号**: 1000－0844(2014)04－0813－07

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2014.04.0813

Influence of Near-surface Velocity Structure on Site Characteristics of Strong Ground Motion

LU Yu-xia[1,2,3], SHI Yu-cheng[2], WAN Xiu-hong[2], MA Lin-wei[2], LU Fang-qin[2]

(1.*Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering*, *CEA*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*;
2.*Lanzhou Institute of Seismology*, *CEA*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*;
3.*Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*)

Abstract: Strong ground motion can cause significant changes in unconsolidated layers; therefore, the influence of near surface velocity structure on the characteristics of strong ground motion should be clarified. A combination of S-wave seismic exploration and microtremor testing is conducted near two seismic stations in which a series of aftershock records was recorded during the Wenchuan earthquake sequence. At the MXT station, both field tests and seismic records show a prominent resonance of 5 Hz caused by a high impedance contrast at the boundary between silty soil and a pebble bed. This boundary occurs at a depth range from 10 m to 11 m and is imaged as

① **收稿日期**:2014-08-20
基金项目:国家自然科学基金项目(51248005);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ02)
作者简介:卢育霞(1978－),女,副研究员,主要从事岩土工程与工程地震方面的科研工作.E-mail:yuxial@163.com

a strong reflection with a two-way time approximately 0.1 s. Borehole data from this site verifies that the velocity increases from approximately 200 m/s to 400 m/s at a depth of 10 m depth. However, the 20 m depth boundary shows a contrast between a pebble bed and slate and is imaged as a very slight reflection with less significance in the seismic spectrum. This phenomenon may have occurred because an excessively high amplitude at 0.1 s covered the reflection of the deeper boundary. At the WUD station, the SH-wave reflection profiles with two-way travel times of approximately 0.22 s and 0.50 s mark the boundaries of silty soil, roundstone, and sandstone. The reflectors respectively caused 2.3 Hz and 1.45 Hz resonances observed in the records of earthquakes and microtremors. Two or more boundaries of impedance contrast could have caused different actions with various focal mechanisms at the WUD station. The results of this study are summarized as follows: (1) A comparison of the test results and the strong ground motion characteristics revealed that the depth of the strong impedance boundary and the average shear wave velocity are the main factors in controlling the dominant frequency at the site; stronger impedance is predominant in transforming the characteristics of the seismic spectrum. (2) Whether microtremors or earthquakes, site spectrum characteristics are always influenced by the surface velocity structure. In particular, the corresponding frequency range of the highest amplitude or amplification is near the dominant frequency. Therefore, the spectral shape of the surface should be affected by the velocity structure of unconsolidated layers. (3) When the microtremor records are controlled by a surface wave, the effect of the shallow impedance boundary may stronger than deep boundary. Moreover, earthquakes can make the main frequency of the seismic response lower than that by microtremors because of the deeper impedance boundary and the nonlinear nature of soil layer. Furthermore, the characteristics of the seismic spectrum also show diversity due to the focal mechanism and the propagation path.

Key words: velocity structure; seismic station; shear wave exploration; microtremor; frequency spectrum characteristic

0 引言

强烈地震通常会导致严重的灾害事件，震害分析表明不同地质条件的场地对同一地震的反应千差万别，尤其在地表松散沉积层发育的地区场地效应非常显著，往往会出现震害加重的现象。Borcherdt R D 等[1]，Langston C A 等[2]研究认为近地表松散覆盖层密度低、模量小，地震波在层内发生多次反射，对地面振动具有很强的放大作用，因而对建筑物和构筑物等设施造成严重的破坏，这是造成重大地震灾害的主要原因。为了尽最大可能减少地震灾害的损失，在实施工程建设前应充分了解场地的分类及其速度结构，根据场地响应进行地震设防。低速松散的沉积层对地震波具有强烈的改造作用已被普遍认可。Ni 等[3]研究认为浅部沉积层对地表强震动的放大作用远大于深部地质结构。郭明珠等[4]通过模型计算明确给出当覆盖层与下伏基岩的横波阻抗比大于 2 时，利用地脉动单点谱比法可近似得到场地的卓越频率。高玉峰等[4]利用一维土层地震反应等效线性化解法，研究认为地表 PGA 的差异与松散覆盖层波速结构的差异呈线性关系，而且波速的不确定性能使地表振动 PGA 的变化幅度达到 20%以上，这一结果表明对近地表覆盖层的研究必须以速度—深度模型为基础。

以上这些结论都是基于理论模型计算获得的。在实际工程抗震研究中，常会采用一些测试方法来了解场地的波速结构，通过这些测试方法是否能够了解场地的强地震动特征呢？本文选择甘肃省两个强震记录台站对其进行现场试验研究，旨在通过常用工程勘察手段，即浅层人工地震勘探和地脉动测试，获得场地近地表沉积层的速度分层，以了解现场试验方法获得的场地卓越周期和速度结构与实际强震台址的地震动特征之间的相关关系。

1 研究方法

钻孔波速测试是了解场地近地表速度结构最常用的手段，其最主要的缺点在于施工成本高。因此，

相对高效、便捷的近地表地球物理勘探手段在浅层速度结构探测方面得到了广泛应用。如 Street R 等[6]在新马德里地震带采用横波勘探获得了地震台的波速信息；陈棋福等[7]采用地脉动 H/V 谱比分析方法研究了北京城区的地震动场地响应；董连成等[8]、王伟君等[9]采用地脉动台阵技术探测了场地响应和浅层速度结构；卢育霞等[10]研究认为横波勘探在有条件的情况下可以获得与钻孔波速相似的近地表波速结构。基于近地表地球物理勘探方法的这些有效应用[10]，本文在甘肃省南部选择了两个地震台站，采用横波地震勘探和地脉动分析方法获得场地浅层速度结构与响应基频，以证实场地测试方法到底能揭示强震记录的哪些特征。

图 1 中给出了所选地震台（MXT 台、WUD 台）的位置，以及两地震台均获得记录的四次地震事件的震中位置。

1.1　横波地震勘探

横波地震勘探采用的震源是 3.5 kg 小锤和 30 cm 长的工字型钢板，为了抵消 P 波干扰并加强 SH 波振幅，震源双向激发 SH 波；采用 10 Hz 水平检波器接收地震波；数据记录采用 Geometrics 公司的 48 道 Strata Visor 地震仪；道间距 1 m。具体采集参数见表 1。

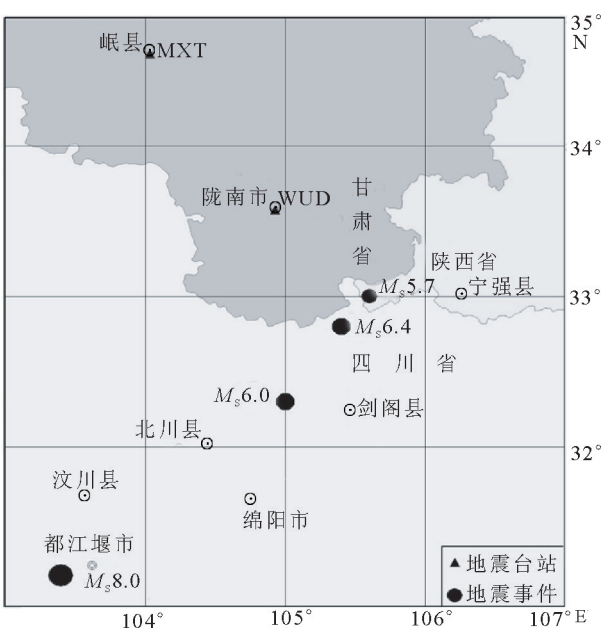

图 1　地震台站及地震事件分布图

Fig.1　Distribution map of seismic stations and earthquake events

采用横波地震勘探方法可以获得场地波速分层结构，确定场地强波阻抗界面位置。另外，根据浅层横波地震勘探的零偏移距反射时间可以获得场地潜在的响应频率[11]：

$$f = 1/(2t), \tag{1}$$

其中 t 为双程反射时间。

表 1　地震勘探数据采集参数

Table 1　Acquired parameters of seismic exploration

采集仪器	Geometrics Strata Visor
道数	48
方法	水平剪切波（SH）地震勘探法
震源	3.5 kg 锤
检波器类型	10 Hz 水平检波器
检波器组合	单个
道间距	1 m
采样率	0.25 ms
记录长度	1.0 s

1.2　地脉动测试

地脉动测试采用北京东方振动和噪声技术研究所生产的 INV3060S 网络分布式数据采集系统，传感器是中国地震局哈尔滨工程力学研究所的 941B 型超低频测振仪。采集时使用速度档位（2 档），数据采样频率 50 Hz，采集仪器与传感器参数指标见表 2。

表 2　地脉动观测设备的技术参数

Table 2　Technical parameters of microtremor observation system

采集仪参数	仪器型号	INV3060S 数据采集系统
	生产厂家	COINV
	通道数	16 道
	AD 精度	24 位
	输入方式	电压 DC、电压 AC、ICP
传感器参数	仪器型号	941B 型测振仪
	生产厂家	哈尔滨工程力学研究所
	档位 2 灵敏度	23（V・S/m）
	档位 2 的通频带	1～100 Hz
	尺寸，重量	63 mm×63 mm×80 mm，1 kg

考虑到白天背景干扰比较严重，本次地脉动测试在 MXT 台、WUD 台均选择夜间进行，测试时间段控制在 18：00～06：00 之间，连续测试 12 个小时以上。

1.3　强震记录分析

图 1 所示 MXT 台、WUD 台均有记录的 4 次地震事件包括汶川 8.0 级地震及其 3 次强余震。表 3 中列出了这 4 次地震事件的基本参数及与两个地震台的震中距以及各台站三分向的峰值加速度等参数值。

全部地震记录频谱分析采用 Hanning 窗，傅氏谱的折叠频率为 25 Hz，傅氏分析采用快速傅氏变换程序（FFT）。

2 数据采集与分析

2.1 MXT 地震台

MXT 台位于甘肃省定西市岷县，浅层横波勘探数据采集在该地震台院内进行，地震波接收采用 10 Hz 水平检波器，道间距 1 m。图 2 中给出了两个横波单炮记录，大约在 0.10 s 和 0.22 s 左右的位置有两组非常明显的反射波组，揭示了 MXT 台浅部至少存在两个明显的强波阻抗界面。其中 0.10 s 左右的反射波双曲线形态清晰，振幅最为显著，其反射波速约为 220 m/s，可得该反射界面埋深约为 11 m，根据式(1)计算其对应的基频响应约 5 Hz。而近地表地震勘探获得零偏移距强反射波组的双程旅行时间为 0.22 s 的界面对应的基频响应约为 2.3 Hz，该界面计算埋深约为 25 m。

图 3 为 MXT 台地脉动测试数据图中显示该场地在 18:00－24:00 时段背景干扰较大，其对应的脉动频谱幅值变化也明显(图 4(a))。选取全程每 3 600 s 数据做一次分析，得到 12 条地脉动的傅立叶幅值谱，这 12 条幅值谱的卓越频率比较接近，其平均线如图 4((a))黑色粗线所示，可见东西、南北、垂直各方向的卓越频率分别为：5 Hz、5 Hz、8 Hz。

正如浅层地震勘探和脉动数据所揭示的那样，汶川地震时 MXT 台的强震记录(图 4(b))中，频率为 5 Hz 左右的地震动分量在该场地占有明显优势。根据 MXT 台的钻孔资料可知，该场地覆盖层岩性为粉土和卵石层，其分界面位于地下 10 m 左右，下覆基岩为板岩，其顶部埋深约在 20 m 左右。图 2 给出了粉土、卵石以及板岩的剪切波速度和平均密度，据此可以计算出 10 m 和 20 m 附近的剪切波阻抗值分别为 2.6 和 1.8。因此，可知横波反射剖面中 0.10 s 左右的双曲线形态清晰，振幅最为显著，是受地下 10～11 m 处粉土与卵石层的强波阻抗控制的。然而地震频谱与地脉动频谱中对 2.3 Hz 的反应均不明显，应是由于 0.10 s 处岩层波阻抗差异较大，水平剪切波振幅太强掩盖了 0.22 s 的反射横波，这也是岷县强震记录频谱具有显著单峰形态的原因(图 4(b))。

2.2 WUD 地震台

浅层地震勘探数据采集在 WUD 地震台院外进行，距强震仪所在的位置约 200 m。根据该场地最新资料可知，测试场地下覆基岩岩性没有变化，但基岩面倾斜。图 5 中给出了浅层横波地震勘探的两个单炮记录。由于测线所在处地表条件不均匀，图 5 中单炮记录以第 28 道为界，两侧地震信号有细微差别；并且由于反射界面为非均匀水平层状，所得双曲

表 3 所选地震事件的基本参数

Table 3 Parameters of seismic events selected

地震事件			1	2	3	4
发震时间			2008-05-12	2008-05-18	2008-05-25	2008-05-27
震级/M_S			8.0	6.0	6.4	5.7
纬度/(°)			31.0	32.1	32.6	32.8
经度/(°)			103.4	105.0	105.4	105.6
震中距/km			388	251	241	232
MXT	PGA (cm·s^{-2})	EW	－70.629	5.780	－11.662	7.992
		NS	－44.976	4.254	－9.153	3.473
		UD	25.259	2.717	－4.298	－2.196
震中距/km			304	140	92	84
WUD	PGA (cm·s^{-2})	EW	－184.874	23.720	－89.857	－40.667
		NS	－163.990	32.178	64.519	39.276
		UD	108.611	15.713	38.122	－24.320

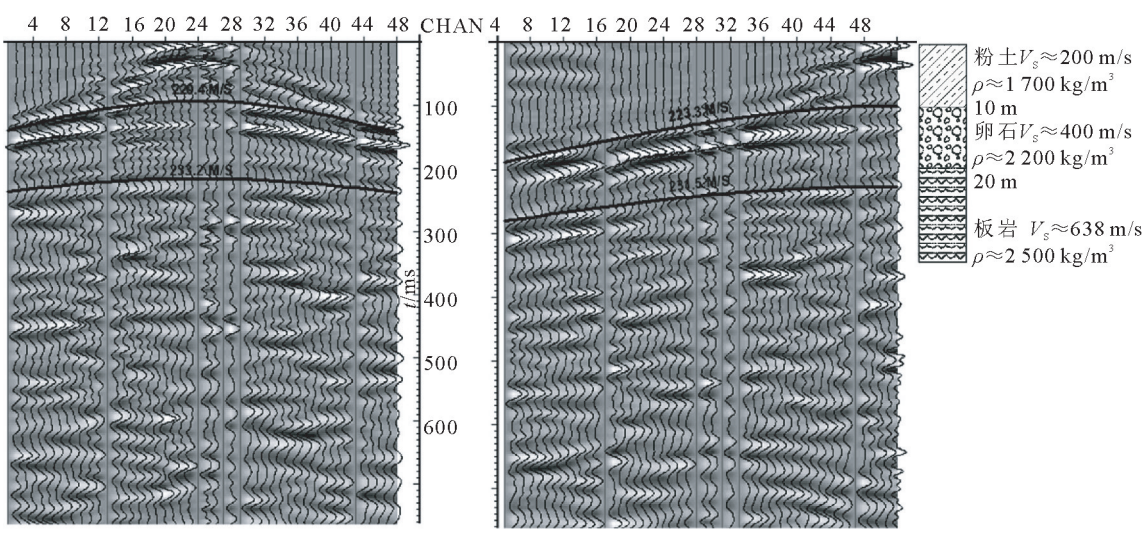

图 2 MXT 台横波反射剖面

Fig.2 SH-wave reflection profiles at MXT station

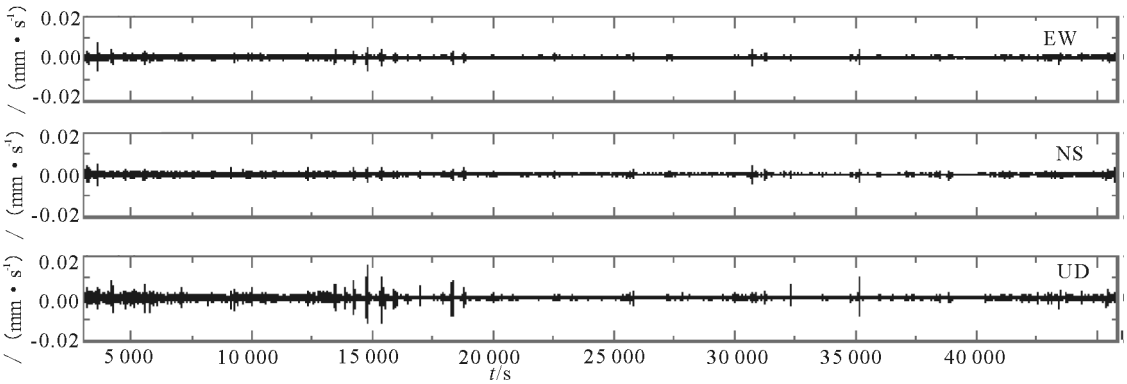

图 3　MXT 台连续观测的地脉动记录时程

Fig.3　Whole records of continuous microtremor observation in MXT station

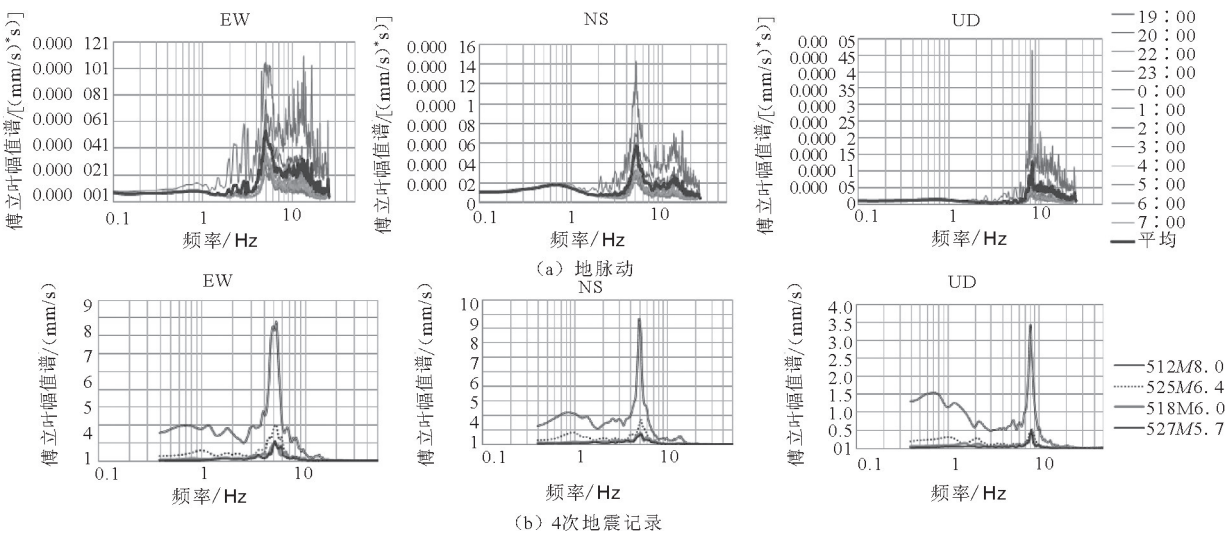

图 4　MXT 台地脉动(a)与四次地震记录(b)的傅立叶谱

Fig.4　FFT spectrum of continuous microtremor observation(a)and four seismic records(b)in MXT station

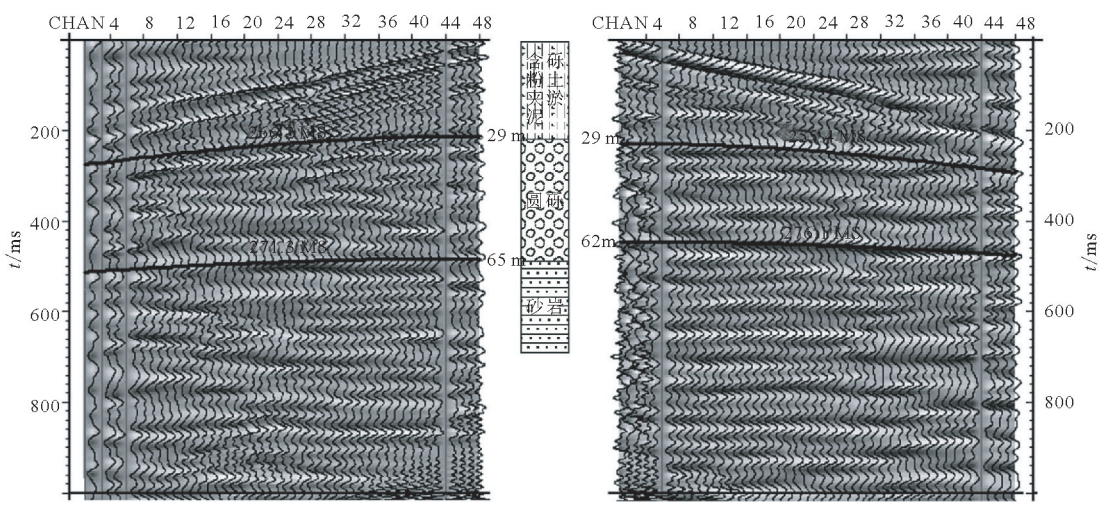

图 5　WUD 台横波反射剖面

Fig.5　SH-wave reflection profiles at WUD station

线与理想形态也有些差异;在 0.22 s 和 0.50 s 附近有两组反射波清晰可变。这两个反射界面对应的深度大约为地下 29 m 和 62～65 m,根据陇南市地震小区划最新钻孔资料推断其分别对应的是含砾粉土

夹淤泥、圆砾、砂岩之间的强波阻抗界面。根据式(1),这两个横波的强反射界面对应的卓越频率分别为 2.3 Hz 和 1.0 Hz。

本次地脉动测试时段为 2014 年 1 月 16 日 17:30至 1 月 17 日凌晨 6:00,持续 12.5 小时。WUD 地震台强震仪器所在的位置距离 212 国道不足 200 m。从图 6 地脉动时程曲线上可以看到,全程测试中来自地面交通的背景干扰比较显著。同时,图 6 地脉动记录中 40 000 s 后,两水平方向振动突然增大,经查证确认此处有一次地震过程,即 1 月 17 日凌晨 04:52:23 在四川剑阁(32.05°N,104.24°E)发生的 M_L3.5 地震。地脉动数据处理时,首先选取 17:30—04:30 点每 3 600 s 数据做一次分析,得到前 39 600 s 的 11 条地脉动的傅立叶幅值谱。这 11 条幅值谱的卓越频率比较接近,其平均线如图 7(a)黑色粗线所示,可见东西、南北、垂直各方向的卓越频率分别为:2.3 Hz、2.5 Hz、3.3 Hz。然后采用包括四川剑阁 M_L3.5 地震时程(39 600 s～43 200 s 之间)在内的数据,所得频谱如图中 5:30 时段所对应的线型所示,其东西、南北、垂直各方向对应的卓越频率分别为:2.3 Hz、1.45 Hz、2.3 Hz。

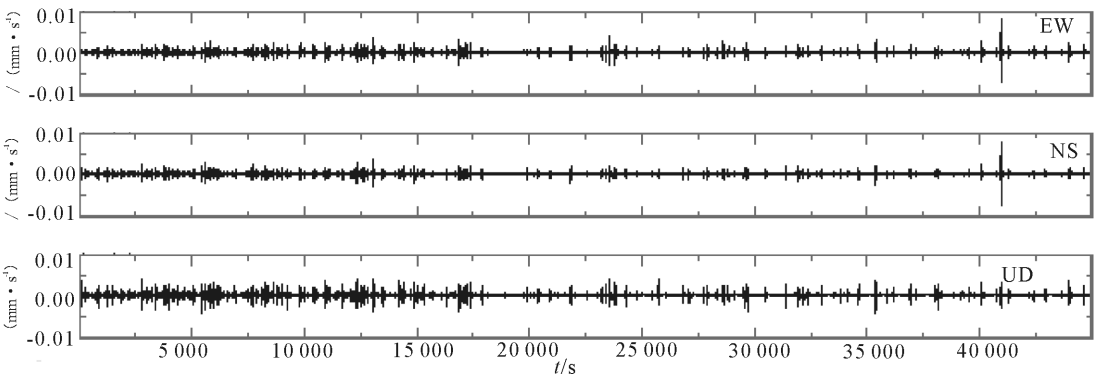

图 6 WUD 台连续观测的地脉动记录时程

Fig.6 Whole records of continuous microtremor observation in WUD station

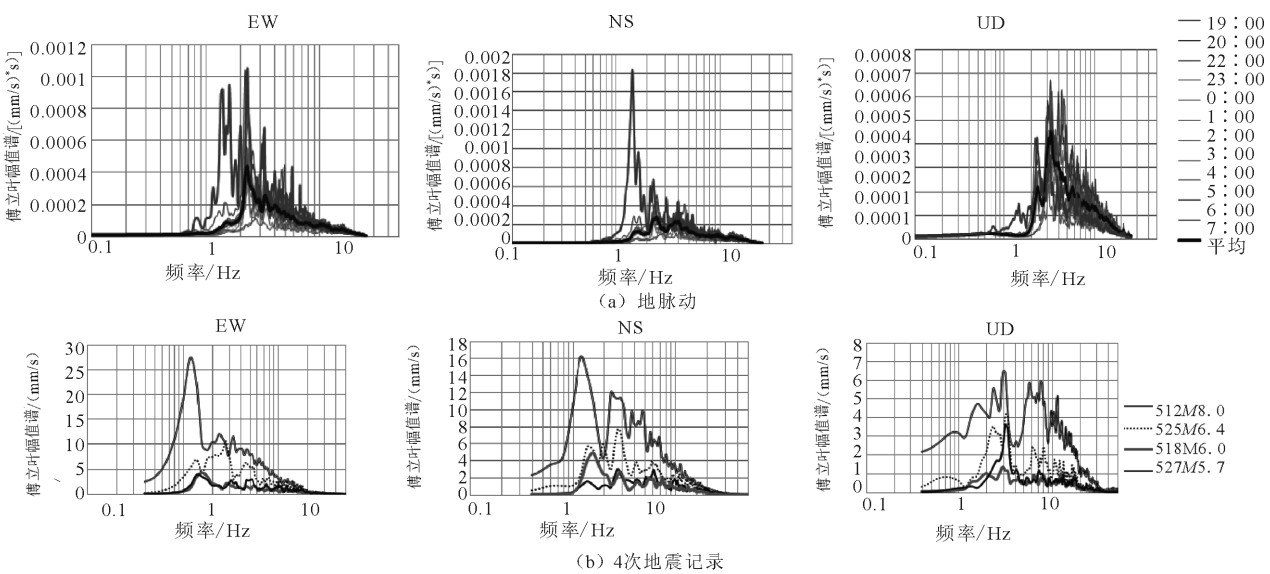

图 7 WUD 台地脉动(a)与四次地震记录(b)的傅立叶谱分析

Fig.6 FFT spectrum of continuous microtremor observation (a) and four seismic records (b) in WUD station

对比图 7 中地脉动与地震记录的频谱图,可见地震信号与一般地脉动信号对场地的影响是有差别的。对于 WUD 地震台没有近距离地震影响的地脉动信号,主要成分以瑞利面波为主,此时近地表浅部的粉土—圆砾强波阻界面控制了该场地的响应基频(2.3 Hz);当地震发生时,脉动仪器接收到体波、面波等各种类型的信号,一定强度的地面振动就会激励近地表深部的圆砾—砂岩间的强波阻抗界面对其地震响应起到主要控制作用,并对 1.0 Hz 附近的频谱成分产生放大(图 7)。因此,以面波源为主的地

脉动信号，场地浅部强波阻抗界面的影响可能会大于深部；对于来自地壳内部的地震源，其对场地的影响可能并不然，有时候会得到同一场地在不同方向板内地震和海洋地震作用下，频谱特征差异显著，这应该还与震源和传播路径有关。

3　结论

（1）近地表松散覆盖层内剪切波的强阻抗界面深度及其平均剪切波速是控制场地频谱主频的主要因素。界面波阻抗差异越明显，对地震波的振幅放大越明显。近地表存在多组阻抗界面时，阻抗强的界面对地震波的改造作用占主导地位。

（2）地脉动频谱与地震动频谱均反映了场地波速结构对它们的控制作用，尤其在卓越频率附近，对输入不同强度的振动都具有不同程度的放大反应。地震频谱与脉动频谱的形状差异缘自强地震动作用下土层结构的非线性反应。

（3）一般情况下浅部强波阻抗界面对地脉动频谱特征的影响可能大于深部；地震作用会使场地的响应主频向比其脉动基频更低的频段发展。采用现场试验方法获得的场地卓越周期和速度结构与实际强震台址的地震动特征密切相关。

致谢：感谢甘肃省岷县地震台、武都地震台工作人员的对测试工作的配合与协助！地震数据由中国地震局强震台网中心和甘肃省地震局监测中心提供，在此表示感谢！

参考文献(References)

[1] Borcherdt R D, Gibbs J F. Effects of Local Geological Conditions in the San Francisco Bay Region on Ground Motions and the Intensities of the 1906 Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(2): 467-500.

[2] Langston C A. Local Earthquake Wave Propagation Through Mississippi Embayment Sediments, Part: Body-wave Phases and Local Site[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93: 2664-2684.

[3] Ni Shean-Der, Raj V Siddharthan, John G Anderson. Characteristics of Nonlinear Response of Deep Saturated Soil Deposits [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(2): 342-355.

[4] 郭明珠，谢礼立，凌贤长. 弹性介质面波地脉动单点谱比法研究[J]. 岩土工程学报，2004，26(4)：450-453.
GUO Ming-zhu, XIE Li-li, LING Xian-chang. Research on Spectral Ratio of Horizontal to Vertical Component for Elastic Model and Surface Microtremors [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 450-453. (in Chinese)

[5] 高玉峰，张健. 地震危险性分析研究[M]. 北京：科学出版社，2007.
GAO Yu-feng, ZHANG Jian. Seismic Hazard Analysis[J]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[6] Street R, Woolery E, Wang Z, et al. A Short Note on Shear-wave Velocities and Other Site Conditions at Selected Strong-motion Stations in the New Madrid Seismic Zone[J]. Seism Res Lett, 1995, 66: 56-63.

[7] 陈棋福，刘澜波，王伟君，等. 利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应[J]. 科学通报，2008，53(18)：2229-2235.
CHEN Qi-fu, LIU Lan-bo, WANG Wei-jun, et al. Site Effects on Earthquake Ground Motion Based on Microtremor Measurements for Metropolitan[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(18): 2229-2235. (in Chinese)

[8] 董连成，陶夏新，师黎静，等. 利用地脉动台阵记录反演场地浅层 Vs 结构[J]. 岩土力学，2008，29(2)：553-556.
DONG Lian-cheng, TAO Xia-xin, SHI Li-jing, et al. Inversion of Shallow Shear Wave Velocity Profile of Engineering Site from Recordings Associated With Microtremors Array [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 553-556. (in Chinese)

[9] 王伟君，刘澜波，陈棋福，等. 应用微动 H/V 谱比法和台阵技术探测场地响应和浅层速度结构[J]. 地球物理学报，2009，52(6)：1515-1525.
WANG Wei-jun, LIU Lan-bo, CHEN Qi-fu, et al. Applications of Microtremor H/V Spectral Ratio and Array Techniques in Assessing the Site Effect and Near Surface Velocity Structure [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1515-1525. (in Chinese)

[10] LU Yu-xia, Woolery E W, WANG Zhen-ming, et al. Comparison of S-wave Velocity Profile Obtained from Surface Seismic Detection and Borehole Data[C]. Iceeg, 2012: 500-504.

[11] Williams R A, Stephenson W J, Frankel A D, et al. Correlation of 1-to 10-Hz Earthquake Resonances With Surface Measurements of S-wave Reflections and Refractions in the Upper 50 M[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(5): 1323.