

地脉动方法在合作市覆盖层厚度探测中的应用*

张泽忠^{1,2}, 吴志坚^{1,2,3}, 王平^{1,2,3}, 曾立峰⁴, 严武建^{1,2}

(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; 4. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于合作市区 41 处地脉动观测点数据的快速傅里叶变换和单点 H/V 频谱分析结果, 总结了合作市区场地条件的地脉动特征, 并结合钻孔揭示的场地条件资料, 反演合作市区的覆盖层厚度。根据合作地区不同局部地形观测数据和数据分析结果, 分析了地形对地脉动的放大效应。结果表明: 合作市区场地的卓越周期主要分布在 $0.1 \sim 0.2$ s, 与合作市区场地条件相符; 2 条剖面 H/V 频谱分布稳定, 覆盖层厚度地脉动反演结果与钻孔揭示厚度吻合较好。

关键词: 地脉动; 频谱分析; 黄土地区; 覆盖层

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)03-0337-05

0 引言

2008 年汶川 8.0 级地震的大量震后调查和烈度异常调查结果进一步验证了场地的地形变化以及覆盖层厚度对地震动有很强的放大效应, 这种放大效应通过增加地震波的振幅和诱发长周期共振增加了地震烈度 (胡聿贤, 2006)。因此震后的小区划工作把场地条件勘查列为重中之重。

场地勘查常用手段有直接钻孔法和面波勘探法。钻孔方法可以直接获取地质情况, 精确可靠, 但费时长、成本高, 而且对环境有一定的破坏。面波勘探法采用反射波采集反演地质情况, 需要人工激发震源并且受周围环境影响较大, 其数据处理也较繁杂。地脉动作为一种简便、快捷、经济和较准确的场地工作手段, 其频谱特征既可以反映场地土层类型特征, 又能反映出工程场地的动力特性, 因此, 它在工程场地的地基类别划分、场地的选择和评价以及地震小区划中覆盖层和波速结构探测等方面被广泛利用 (王兰民, 2003)。

本文基于甘南合作市黄土地区 41 处地脉动观测, 分析了该地区地脉动频谱信号的稳定性和分布规律性, 对 2 条剖面进行了覆盖层反演和整个市区覆盖层厚度的反演。

1 地脉动现场观测

1.1 观测原理

地脉动是由随机振源 (包括自然因素, 如地震、风振、火山活动、海洋波浪等; 人为因素, 如交通、动力机器、工程施工等) 激发并经场地不同性质的岩土层界面多次反射和折射后传播到场地地面的振动, 是地面的一种稳定的非重复性随机波动。同时, 地脉动不同的频幅变化和作用历时, 会引起岩土体的不同响应 (许建聪等, 2005)。地脉动中由自然震源激发而引起的周期长达 $20 \sim 100$ s 的振动, 称为长周期微动, 与深部构造有关, 属于地域性微动, 可用面波的传播来解释 (于凯等, 2011)。

Nakamura (1989) 的研究表明, 在场地上仅用一个三分量检波器观测的地脉动水平与垂直方向 (H/V) 的频谱比与场地垂直入射 S 波的放大因子相似, 这表明地脉动的 H/V 谱可以反映场地的剪切波速 (V_s) 剖面。每层土的性质和层厚对地脉动的频率成分有重要的影响, 它能增强或削弱入射波群中的个别波, 具有滤波和选频的特性, 因此通过对脉动频谱的数据分析可以反映覆盖层的结构。

1.2 观测仪器

合作市的地脉动观测采用北京大地华龙有限

* 收稿日期: 2013-03-04.

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) 资助.

责任公司生产的 XG-I 贴壁式波速测井仪, 其主要技术参数: 通道数: 1~3 道可选; 采样间隔: 0.03~10 ms; 采样点数: 512~16 384; 各道时间一致性: ≤ 1 个采样间隔; 各道振幅一致性: $< 3\%$; 频率范围: 1~1 000 Hz; 前放增益: 18~60 dB (各道独立可调); A/D 转换精度: 14 位; 输入阻抗: $\leq 10\text{ k}\Omega$; 触发方式: 脉冲、通断; 延时: 0~8 000 ms 可选。

1.3 观测场地和测点布设

合作市为典型河谷城市, 城市建筑主要分布在平坦的谷底, 东西两侧为山坡。合作市区狭长, 按 2 条主干道分为 2 条测线, 观测点主要布置在安静、开阔平坦的场地, 确保地脉动微弱振动信号不被干扰信号淹没, 布设距离 300~400 m。考虑到地形因素, 在山顶和山腰位置也布设了一些测点, 共布设 41 处观测点。

2 数据处理

2.1 快速傅里叶变换

为了将原来难以处理的地脉动时域信号转换成易于分析的频域信号, 进而更好的分析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, 笔者采用了快速傅里叶变换 (FFT) 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为

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

式中, ω 为频率, T 为周期, t 为时间。

2.2 H/V 频谱分析

Tokimatsu 和 Miyadera (1992) 在台阵观测的基础上揭示出地脉动频谱比 H/V 频率的变化与基阶瑞利波对于场地 V_s 剖面的变化相对应。场地脉动 FFT 频谱 H_s/V_s 的峰值 A 能够反映场地的固有周期, A 为 FFT 频谱的 EW 和 NS 水平速度分量谱 H_{EW} 、 H_{NS} 经过矢量合成与垂直速度分量谱 V_{UD} 的比值, 即

$$A = \frac{H_s}{V_s} = \frac{\sqrt{H_{EW}H_{NS}}}{V_{UD}}. \quad (2)$$

2.3 1/4 波长准则

假定场地土层结构为双层构造, 即不存在软弱夹层。可以根据剪切波方程结合牛顿定律和欧拉定律推出

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\pi v_s}{2h} = \frac{v_s}{4h}. \quad (3)$$

式中, f 为表层土的卓越频率, h 为覆盖层厚度, v_s 为覆盖层等效剪切波速, 通过钻孔剖面计算得出。

3 合作市区地脉动特征

3.1 卓越周期特征

对合作市区地脉动测试所得的卓越周期进行了统计, 由图 1 可见, 共计 36 个测点 (其余 5 个测点受到环境影响未统计), 其中 30 个测点的卓越周期主要分布在 0.1~0.2 s, 且主要分布在市区, 符合合作场地条件特征。另外 6 个测点卓越周期大一个数量级, 其中 3 个测点布设在山顶, 另外 3 个测点布设在临街的水泥场地, 由于场地固有周期存在差异, 所以会出现地脉动卓越周期异常。据此分析, 地脉动卓越周期主要受局部特性如覆盖层厚度、场地特性、周边环境等影响, 场地的固有周期对地脉动卓越周期影响较大, 但卓越周期整体分布表现稳定, 表明合作整体场地条件一致性较好。

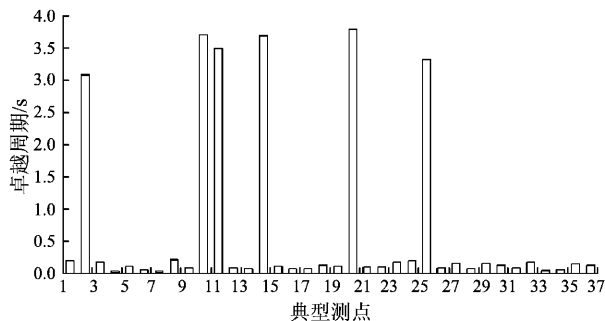


图 1 卓越周期统计

Fig. 1 Predominant periods statistic of different sites

3.2 FFT 和 H/V 频谱分析结果

对合作市区选定的每个测点进行了 15 min 或 30 min 的地脉动观测 (具体观测时间视环境而

定), 图 2 为仪器采集的原始波形。由图可以看出, 所采集的波形数据平稳, 表明该段观测波形平稳随机, 没有受到明显的环境影响。

为了获得较清晰的波形特征, 滤除环境对采集数据的影响, 对采集的数据进行滤波和 FFT 分析, 分析结果如图 3 所示, 从图中可以看出, 测点的 NS、EW 和 UD 方向所反映的场地特性比较一致。

对合作市区 41 个测点采集的数据全部进行了 FFT 分析, 然后对每个测点数据的三方向频谱进行了 H/V 频谱分析, 图 4 为单个测点的 H/V 频谱分析结果, 图 5 为两条主干路剖面的 H/V 频谱特征, 由图可以看出, 市区内部由场地条件反映的卓越频率特征比较稳定, 表明市区覆盖层整体分布平缓, 个别测点的频谱偏高或偏低, 显现出小范围异常, 在一定程度上说明地脉动特征除受地形条件影响小, 还受局部特性等其它因素影响。

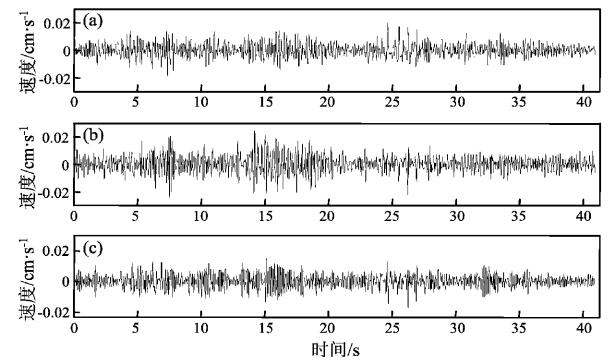


图 2 地脉动原始波形数据
Fig. 2 Microtremor original waves

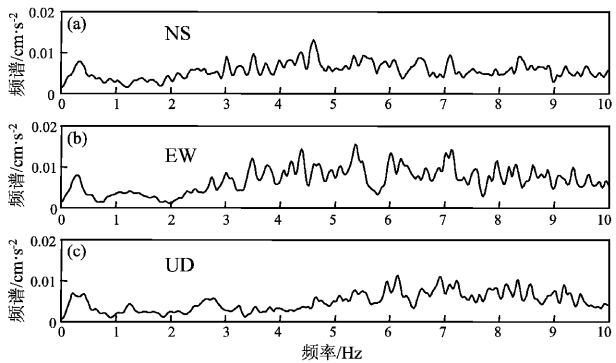


图 3 地脉动数据 FFT 分析结果
Fig. 3 Analysis results of microtremor wave
in FFT frequency spectrum processing

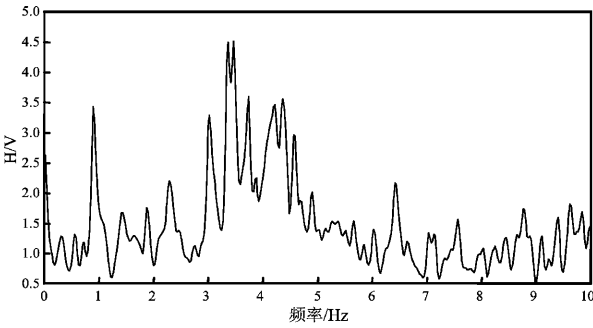


图 4 单个测点 H/V 频谱分析
Fig. 4 Analysis results of H/V frequency spectrum

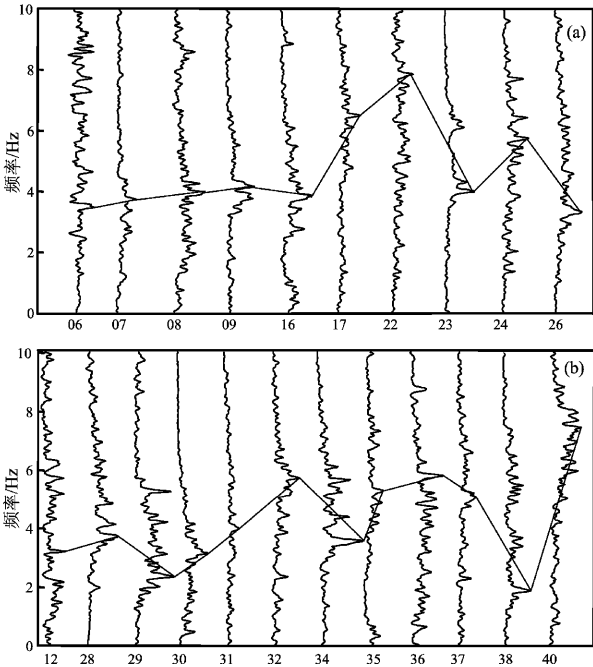


图 5 两条主干路剖面的 H/V 频谱分布
(a) 铜钦街剖面; (b) 念钦街剖面

Fig. 5 H/V spectrum distribution of
two main streets profile

(a) the profile of Tongqin Street; (b) the profile
of Nianqin Street

4 地脉动在覆盖层探测中的应用

运用上述的分析结果和方法反演了合作市区的覆盖层厚度分布, 由图 6 可以明显看出主城区覆盖层厚度较平缓并且明显低于两侧山区, 厚度主要分布在 10~20 m 之间, 局部低于 10 m。对比表 1 中钻孔揭示的市区覆盖层厚度, 可以看出所反演的覆盖层厚度结果与实际钻孔揭示的厚度吻合较好。

图 7 分别为念钦街和铜钦街两条沿主干路反演

的覆盖层厚度的剖面图,由图可以看出市区覆盖层厚度平缓,集中分布于10~20 m之间,与钻孔揭示覆盖层厚度一致。因此在该区应用地脉动测试方法反演覆盖层厚度效果较好,此法可以在地震小区划中作为覆盖层探测辅助手段。

表 1 合作市区场地条件

Tab. 1 Testing site conditions in Hezuo City

孔号	等效剪切波速 $V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	覆盖层厚度 /m	场地土类别	场地类别
ZK14	98	22.8	软弱土	Ⅲ类
ZK15	180	16.9	中软土	Ⅱ类
ZK24	252	19	中硬土	Ⅱ类
ZK25	313	17	中硬土	Ⅱ类
ZK27	312	18	中硬土	Ⅱ类
ZK26	357	18	中硬土	Ⅱ类
ZK28	292	11	中硬土	Ⅱ类
ZK29	295	16	中硬土	Ⅱ类
ZK30	287	17	中硬土	Ⅱ类
ZK31	327	17	中硬土	Ⅱ类
ZK32	325	15	中硬土	Ⅱ类
ZK33	282	18	中硬土	Ⅱ类
ZK34	366	11	中硬土	Ⅱ类
ZK35	289	15	中硬土	Ⅱ类
ZK36	287	16	中硬土	Ⅱ类

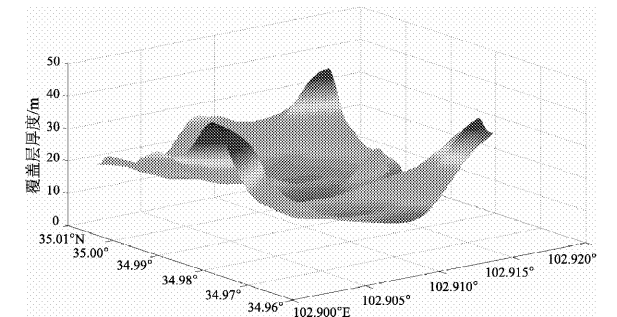


图 6 反演合作覆盖层厚度分布

Fig. 6 Distribution of overburden thickness in Hezuo City

5 结论

本文通过对合作市区 41 处测试点的地脉动数据的处理和分析,总结了合作市黄土场地条件的地脉动特征,并结合合作市区钻孔资料揭示的场地条件,反演了合作市区覆盖层厚度,分析了地形条件对地

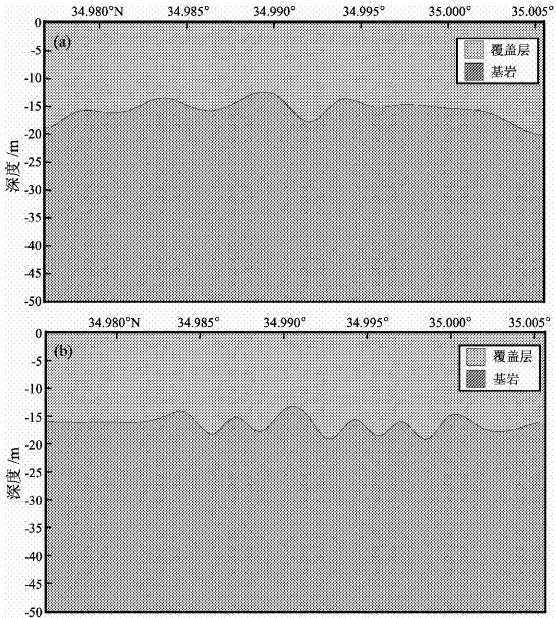


图 7 覆盖层厚度剖面

(a) 铜钦街剖面; (b) 念钦街剖面

Fig. 7 Profile of overburden thickness of two main streets
(a) the profile of Tongqin Street; (b) the profile of Nianqin Street

脉动的放大效应,得到以下 3 点结论:

- (1) 在合作市黄土场地条件下,市市场地卓越周期主要分布在 0.1~0.2 s。
- (2) 地脉动法反演的合作市区覆盖层厚度主要分布在 10~20 m 之间,与钻孔揭示厚度一致,表明该方法适合在地震小区划中辅助探测覆盖层厚度。
- (3) 不同地形条件下地脉动测试结果的分析表明局部地形对地震动有放大效应,并且由于地脉动还受局部特性、覆盖层厚度等其它因素影响,地形特征与其反映的地脉动特征放大效应并非完全一致。

参考文献:

胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社.
王兰民. 2003. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社.
许建聪,简文彬,尚岳全. 2005. 地脉动产生机理和传播特性的研究[J]. 浙江大学学报(工学版),39(1):33-38.
于凯,车爱兰,冯少孔,等. 2011. 长周期地脉动观测在深部地层调查中的应用[J]. 上海交通大学学报,45(5):701-705.
Nakamura Y A. 1989. A method for dynamic characters estimation of sub-surface using microtremors on the ground surface[J]. Tokyo QR of RTRI,30(1):25-33.
Tokimatsu K, Miyadera Y. 1992. Characteristics of Rayleigh waves in microtremors and their relation to underground structures[J]. Struct Constr Eng Trans Architectural Inst,439(11):81-871.

Application of Microtremor Test in Overburden Thickness Survey in Hezuo city

ZHANG Ze-zhong^{1,2}, WU Zhi-jian^{1,2,3}, WANG Ping^{1,2,3}, ZENG Li-feng⁴, YAN Wu-jian^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

(2. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

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

(4. *Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*)

Abstract

First, based on frequency spectral analysis result of microtremor observation data of 41 observation points in Hezuo City by fast Fourier transform (FFT) and horizontal-to-vertical spectral ratio of single point (H/V), we summarized the ground microtremor characteristic in site condition of Hezuo City. Second, combining the site condition of drill exploration, we inversed the overburden thickness of the Hezuo City. Finally, we analyzed the amplification effect of topography on microtremor combining with the topography observation data in different local area of Hezuo City and its data analysis result. The results show that the predominant period of sites mainly distributes between 0.1 s and 0.2 s, which is suitable with site condition in Hezuo. The distribution of H/V frequency spectrum of two profiles is stable and the overburden thickness inversed by microtremor are very close to the real thickness acquired by borehole.

Key words: microtremor; frequency spectral analysis; loess region; overburden