

地脉动频谱特性在探究场地评价中的应用

王 良¹ 卢育霞^{1,2} 马林伟¹ 孔德政¹

1 中国地震局兰州地震研究所(黄土地震工程重点实验室),兰州市东岗西路 450 号,730000

2 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心,兰州市东岗西路 450 号,730000

摘 要: 运用单点谱比法对地脉动频谱特性进行分析,根据频谱类型分类结果给出场地卓越周期建议值。在已有钻孔资料基础上,建立卓越周期与覆盖层厚度间的相关关系,并通过实际的工程数据验证了二者关系式的准确性和普适性。由于地脉动观测具有经济、简单、快捷的优点,可将其运用到不宜进行钻孔勘探的复杂场地,从而为该地区工程场地地震安全评价和地震小区划、场地类别划分、场地选择和评价提供基础资料。

关键词: 地脉动;频谱特性;卓越周期建议值;地震区划

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

地脉动是指地球表面振动周期在 0.05~10 s 且振幅在千分之几到数微米的小应变微震幅震动,是各种环境振动在地球表面所产生的复杂集合,既包括地球物理变化产生的振动,又包括自然因素和人类活动等造成的振动^[1]。地脉动没有固定的源和具体的发震时间,在任何时间和任何地点都可以通过仪器来检测其存在,只是在振幅和频率上有差异。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,其频谱特性既能反映场地土层特征,又能反映工程场地的动力特性,在工程场地地震安全评估、地震小区划、场地类别划分、场地选择和评价等工作中得到广泛应用^[1-2]。石玉成等^[3]经过大量地脉动测试发现,土层对不同振动特性的波具有吸收和过滤作用。许建斌等^[4]通过实际地脉动观测资料研究了福州市区的脉动特征以及地脉动频谱特性与场地有关参数之间的关系。师黎静等^[5]总结了地脉动最新研究成果,着重介绍了地脉动单点谱比法和地脉动台阵方法的研究进展和实践现状,指出了各种方法的特点及其应用条件。胡仲有等^[6]通过工程实例阐述了场地卓越周期的测定及其在场地及场地土判定与评价中的应用,分析了不同场地条件对地脉动频谱特性的影响。李平等^[7]采用谱分析方法对所测得的数据进行处理,得到了该区地脉动频谱特性,给出了不同场地条件下的场地地脉动

卓越周期建议值。王国新等^[8]对场地表层土结构(厚度、剪切波速)的变化与地表地震动关系进行了研究,给出了覆盖层厚度对于地震动峰值加速度的影响作用。卢育霞等^[9]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,得出了近地表松散沉积层对地震波具有强烈的改造作用。马林伟等^[10]通过分析黄土谷型试验场地脉动测试结果认为,试验场地地脉动特征揭示了该谷型场地的振动特性。本文在成县进行连续和均匀的地脉动数据收集,对数据进行谱比分析,在此基础上运用钻孔资料建立卓越周期与覆盖层厚度间的相关关系,并通过实际的工程数据验证二者关系式的准确性和普适性。

1 数据来源及处理方法

本文测试地点为甘肃省陇南市成县,成县东北与徽县接壤,西与西和相邻,南以西汉水为界与康县相望,东南与陕西省略阳县毗邻。成县范围中有一、二、三级阶地,一级阶地面积较大,并且坡度较二、三级阶地小,成县建筑大都处于一级阶地上,随着城镇规模的扩大,二、三级阶地在逐渐改造中。本次地脉动测试总共 45 个点,周边都分布钻孔,其中一级阶地 20 个点,二级阶地 15 个点,三级阶地 10 个点。

地脉动测试数据处理方法有地脉动直接傅氏

谱法、基岩相对参考点谱比法、单点地脉动谱比法和利用地脉动中长周期反演场地剪切波速法 4 种,本文主要采用单点地脉动谱比法。该方法基于同一地表测点地脉动的水平分量与垂直分量,利用傅里叶谱比值(H/V)估计场地特征,也称为 Nakamura 法^[11-13]。Nakamura 法得到的峰值频率具有较好的稳定性,且与场地覆盖层的卓越频率有很好的对应关系。该方法主要通过同一测点地脉动的水平分量与竖向分量的谱比得到场地传递函数和场地相对稳定的卓越周期,不足之处是得到的场地放大因子通常比常规方法计算得到的因子值要小。本文获得的卓越频率主要来源于 Nakamura 法,同时结合水平与垂直谱比作参考。

2 地脉动频谱特性分析

本次地脉动测试采用北京东方振动和噪声技术研究所 INV3060S 的数据采集系统,传感器为中国地震局哈尔滨工程力学研究所 941B 型超低频测振仪,采集档位为 2 档,数据采集频率为 51.2 Hz,按《场地微振动测量技术规程》中的规定选择安静的时段测试。图 1 所示为仪器记录的一段平稳波段,波段从上至下分别对应 EW、NS、UD 向速度时程波形图,选取时间段为 500~600 s。

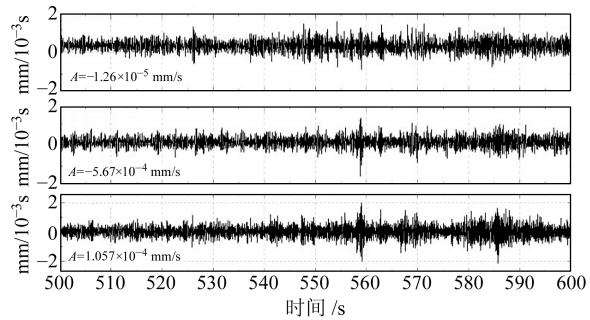


图 1 稳定地脉动时程图

Fig. 1 The steady schedule chart of the micro-tremor

地脉动的周期成分与场地土性质、厚度及分层等情况密切相关。土层对于不同方向传来的入射波具有滤波性能,不同土层具有不同的选频和共振特性,其能增强或抑制入射波群中频率成分比值,从而形成不同的频率形状。对所有测点 47 组数据进行汇总,进行 H/V 谱分析,主要分 3 种情形:单峰型、双峰型和多峰型(图 2)。

1)单峰型。该峰型对应测点主要分布在一级阶地。图 2(a)所示为成县人民医院测点,其谱线上只有一个明显的峰值,主峰比较明显,对应的频率比较低,频率主要集中在 3 Hz 左右。这种频谱

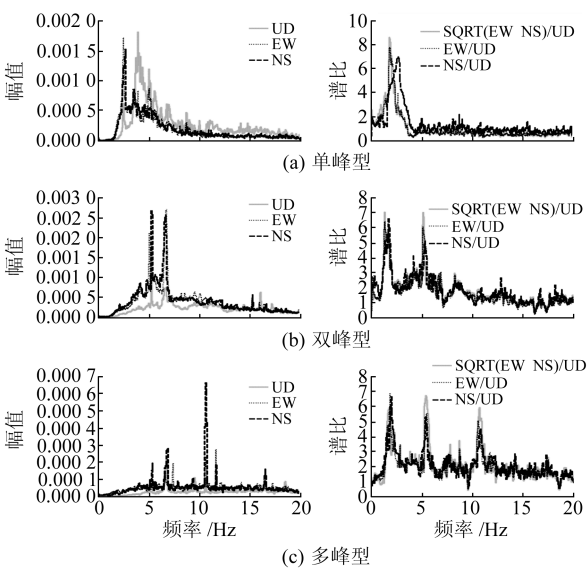


图 2 频谱特性

Fig. 2 The spectral characteristics

形状通常表现为该处土层较厚,但土层中含有一些砾石、砂岩或者泥质砂岩层等;其所在场地没有或者很少存在软硬夹层等产生波速突变的地层结构,土层的沉积环境较简单,剪切波速具有良好的规律性,呈阶梯状;地层相对简单且存在覆盖层较厚的场地。成县整个城区主要集中在一、二级阶地上,因为一、二级阶地面积大且平坦。

2)双峰型。该峰型对应测点主要分布在二级阶地。图 2(b)所示为成州冶炼厂测点,其谱线上存在两个较明显的峰值,两个相对的波峰结构其频率相对变化不大,主要频率集中在 5 Hz 左右,谱面积相对较大;其所在场地存在不同程度的软硬夹层,主要是一些砂质泥岩和砂岩等岩层;这些夹层的位置及厚度的大小与谱线不同峰值周期的位置及峰值形态的宽窄有关,覆盖层相对单峰低频型较薄。

3)多峰型。该峰型对应测点主要分布在二级和三级阶地交界处和三级阶地上。图 2(c)所示为白马寺测点,谱线上存在多个峰值,其对应频率变化范围较大,峰值不明显,谱面积相对较大,能量主要集中在 5 Hz 之前,并且逐渐向高频部分移动;该处地形坡度较缓,地表有一层松散的黄土,中间夹有风化花岗岩屑;其所在场地下部存在刚度和厚度较大的砾石、淤泥质粉砂岩等坚硬土层,从而抑制了地震波的传播,产生多次反射,出现了多个波峰;其所在场地通常地形结构复杂,波速变化无规律,卓越频率较低。

地脉动作为一种常时微动,因为其振动特性与地基土层的结构有关,其频谱优势频率会随着土层厚度、岩石岩性的不同而不断变化。大量宏

观震害现象表明,软弱场地上的长周期结构物和硬场地上的短周期结构物易遭到地震时的共振破坏,地脉动则恰可以反映场地土的振动特性。在相同场地条件下,其地脉动的频谱特性和地震动的频谱存在一定的关联性,可以作为场地的一些基本参量应用于工程场地评价和地震小区划中。

3 场地卓越周期的分布及覆盖层厚度的反演

采用 H/V 频谱分析法,频谱图峰值对应的频率为场地的卓越频率。单峰型其峰值对应频率即为场地的卓越频率,双峰型采用二者频率的平均值作为场地的卓越频率,多峰型采用多个明显峰值的平均值作为场地卓越频率,继而求解场地卓越周期。

对 45 个地脉动测点进行分类,其中一级阶地中有 1 个点卓越周期小于 0.1 s(占总数的 5%),有 2 个点卓越周期大于 0.41 s(占总数的 10%),其余 17 个点都在 0.2~0.41 s 之间,一级阶地所有测点卓越周期平均值为 0.38 s;二级阶地中有 1 个点卓越周期小于 0.15 s(占总数的 7.5%),有 1 个点卓越周期大于 0.41s(占总数的 7.5%),其余 13 个点都在 0.15~0.41 s 之间,二级阶地所有测点卓越周期平均值为 0.30 s;三级阶地中有 1 个点卓越频率小于 0.1 s(占总数的 10%),有 1 个点卓越周期大于 0.3 s(占总数的 10%),其余 8 个点都在 0.2~0.41 s,三级阶地所有测点卓越周期平均值为 0.23 s。随着阶地等级的增加,卓越周期平均值处于下降趋势。将一、二、三级阶地所有点的卓越周期进行汇总可得:0~0.1 s 占总数的 5%,0.1~0.2 s 占总数的 10%,0.2~0.35 s 占总数的 75%,0.35~0.45 s 占总数的 5%(图 3),可将 0.3 s 作为该地区场地卓越周期的建议值,为场地的工程建设提供参考。

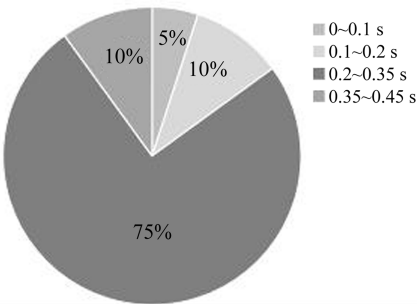


图 3 卓越周期分布范围百分比
Fig. 3 The percentage of the predominant period

成县总面积 1 676.54 km²,由于面积较大,所以本次地脉动测试点都集中在成县有钻孔资料记录点的附近,大多数在成县县城及其西北方向。本次实测了 47 组数据,剔除不能使用的两组。之前在成县获得 90 个钻孔,表 1 列举了其中分布于地脉动测点周边的部分钻孔点,并通过查阅相关资料得到其覆盖层厚度。

表 1 钻孔对应覆盖层厚度

Tab. 1 The layer thickness of the corresponding drilling					
钻孔号	卓越周期 /s	覆盖层厚度/m	钻孔号	卓越周期 /s	覆盖层厚度/m
ZK8	0.27	25.00	ZK7	0.40	23.00
ZK18	0.31	23.00	补点 1	0.29	21.00
ZK13	0.16	20.00	SJ8	0.36	21.80
ZK16	0.15	22.00	SJ2	0.40	21.60
ZK15	0.10	22.00	SJ1	0.21	19.70
ZK6	0.19	21.00	SJ9	0.10	16.50
ZK5	0.20	18.50	SJ7	0.24	17.70
ZK14	0.15	18.00	SJ3	0.40	23.00
SJ15	0.24	21.80	SJ11	0.44	22.50
补点 3	0.28	22.00	ZK21	0.15	25.00
ZK20	0.20	23.00	SJ12	0.20	16.50
SJ13	0.19	21.80	ZK1	0.17	22.00
ZK2	0.21	21.00	补点 4	0.17	19.00
ZK4	0.19	19.00	ZK19	0.34	22.50
ZK3	0.44	26.00	补点 2	0.26	22.00

将地脉动测点获得的场地卓越周期和钻孔获得的覆盖层厚度建立一一对应的关系进行拟合,如图 4 所示。

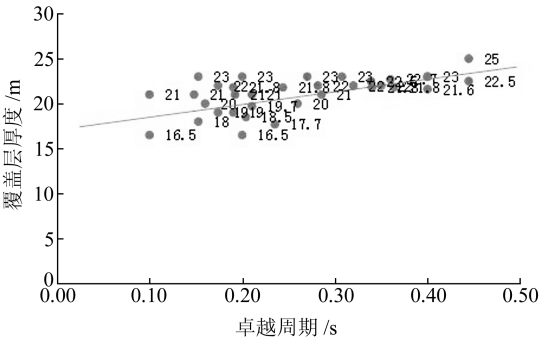


图 4 卓越周期与覆盖层厚度关系
Fig. 4 The relationship between the layer thickness and the predominant period

拟合曲线的方程如式(1)所示,其中卓越周期用 T_0 表示,覆盖层厚度(为基岩以上至顶层面厚度)用 H_0 表示,剪切波速则通常取 500 m/s。

$$H_0 = 15.732\ 59 + 18.182\ 1T_0$$

(1)

式(1)采用最小二乘拟合直线法获得,用最小二乘法计算时要求所有的测量数据 H 偏差的加权平方和最小,即满足:

$$\sum_1^n [H_i - (a + bT_i)]^2 = \min \tag{2}$$

对式(2)求导,最终获得 a 、 b 的值。设相关系数为 r ,则定义:

$$r = \frac{\sum (T_i - \bar{T}) \sum (H_i - \bar{H})}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum (H_i - \bar{H})^2}} \tag{3}$$

经验算, $|r|$ 趋近 1,表明二者之间线性良好,高度拟合,符合标准,可认为覆盖层厚度和场地的卓越周期密切相关。

4 反演结果验证

为验证式(1)的精确性和普适性,通过查询成县范围内的地质资料,选取有明确覆盖层厚度记录的重要工程场点(与之前 45 组地脉动测点分布各不相同)进行地脉动测试,获得的场地卓越周期代入式(1)反演出覆盖层厚度。此次收集整理了 40 个有明确覆盖层厚度记录的重要工程场点,在其周边进行脉动测试并获得其卓越周期,将覆盖层记录结果与反演的结果进行对比,其中 26 个工程场点结果如表 2 所示。

表 2 反演和实际结果的对比
Tab. 2 Comparison of the inversion results and the actual results

记录点	卓越周期/s	反演厚度/m	实际厚度/m
JL1	0.17	18.50	19.21
JL2	0.23	19.50	21.30
JL3	0.26	20.10	19.62
JL4	0.29	20.64	21.32
JL5	0.33	21.37	22.30
JL6	0.41	22.89	24.00
JL7	0.12	17.56	15.75
JL8	0.39	22.56	22.00
JL9	0.43	23.19	25.31
JL10	0.26	20.10	22.11
JL11	0.28	20.53	20.10
JL12	0.37	22.10	24.30
JL13	0.43	23.10	25.31
JL14	0.18	18.65	21.00
JL15	0.15	18.10	20.00
JL16	0.30	20.83	22.10
JL17	0.31	21.01	23.12
JL18	0.33	21.37	23.17
JL19	0.35	21.74	22.56
JL20	0.26	20.10	21.35
JL21	0.29	20.65	22.56
JL22	0.28	20.46	18.45
JL23	0.34	21.56	20.31
JL24	0.17	18.46	19.65
JL25	0.22	19.37	21.32
JL26	0.34	21.56	22.39

从表 2 可以看出,反演值和实际值之间存在差异,但最大差值不超过 3 m,平均差值在 1 m 左右,可认为在误差范围内二者结果十分接近,从而验证了反演结果的准确性和普适性。因此,在整个成县范围内由于地形条件复杂而不宜进行钻孔勘探的场地,可以通过地脉动测试来反演其覆盖层厚度。同时,如果获得覆盖层厚度就可以推测场地的卓越周期,为场地类别划分、场地选择和评价提供基础资料。

5 结 语

1)运用单点谱比法分析地脉动数据发现,不同阶地、不同土层厚度场地的地脉动时程曲线和频谱的某些特征与分布规律各不相同。

2)运用数学统计法对频谱分类结果进行总结,可以得到不同阶地上卓越周期在不同范围内的分布规律,可将 0.3 s 作为该地区场地卓越周期的建议值,为场地的工程建设提供参考。

3)将地脉动测点获得的场地卓越周期和周边钻孔获得的覆盖层厚度建立一一对应的关系,从而反演出适用于整个成县范围内覆盖层厚度计算的普遍公式,可在地形复杂不宜进行钻孔的场地进行覆盖层厚度的推算。

4)通过工程实际数据将反演结果和真实结果进行对比,验证了反演结果的精确性和普适性,为该地区地形条件复杂不宜进行钻孔勘探场地的地震安全评价和地震小区划、场地类别划分、场地选择和评价提供了基础资料。

参考文献

[1] 王兰民,石玉成,刘旭,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003(Wang Lanmin, Shi Yucheng, Liu Xu, et al. Loess Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003)

[2] 黄蕾,方云,严绍军,等.地脉动测试测定场地的卓越周期[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):122-137 (Huang Lei, Fang Yun, Yan Shaojun, et al. Determination for Predominant Period of Site by Earth Pulse Test[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(1):122-137)

[3] 石玉成,王兰民,张颖.黄土场地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J].地震工程学报,1999,21(2):203-208(Shi Yucheng, Wang Lanmin, Zhang Ying. Effects of Overburden Thickness and Topography of Loess Sites Earthquake Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 1999, 21(2):203-208)

[4] 许建聪,简文斌,尚岳全,等.地脉动在福州市区地基土层场地评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2014,23(17):3 014-3 020(Xu Jiancong, Jian Wenbin, Shang Yuequan, et al. Application of Microtremor to Site Evaluation in Fuzhou

[J]. Chinese Journey of Rock Mechanics and Engineering, 2014,23(17):3 014-3 020)

[5] 师黎静,陶夏新. 地脉动方法最新研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 30-37 (Shi Lijing, Tao Xiaxin. Latest Advance in Microtremor Methods[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2007, 27(6): 30-37)

[6] 胡仲有,杨仕生,李航. 地脉动测试及其在场地评价中的应用[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 212-218 (Hu Zhongyou, Yang Shisheng, Li Hang. Ground Microtremor Test and Its Application in Evaluation of Sites[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 212-218)

[7] 李平,薄景山,孙有为,等. 安宁河及邛海周边地区地脉动特征分析[J]. 地震研究, 2013, 36(1): 81-85 (Li Ping, Bo Jingshan, Sun Youwei, et al. Characteristics Analysis of Ground Micro-Tremor in Surrounding Area of Anning River and Qionghai Lake[J]. Journal of Seismological Research, 2013, 36(1): 81-85)

[8] 王国新,黄坤朋. 表层土结构对地表地震动的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 34-40 (Wang Guoxin, Huang Kunpeng. Effects of Surface Soil on Ground Motion Characters[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(5): 34-40)

[9] 卢育霞,石玉成,万秀红,等. 近地表速度结构对场地强地震动特征的影响[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 813-819 (Lu Yuxia, Shi Yucheng, Wan Xiuhong, et al. Influence of Near-Surface Velocity Structure on Site Characteristics of Strong Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 813-819)

[10] 马林伟,卢育霞,王良,等. 黄土丘陵河谷场地地震动特征研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(3): 373-381 (Ma Linwei, Lu Yuxia, Wang Liang, et al. Study on Ground Motion Characteristics in Loss Hill Valley Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3): 373-381)

[11] Sawada Y, Taga M, Watanabe M, et al. Applicability of Microtremor *H/V* Method for KiK-net Strong Motion Observation Sites and Nobi Plain[C]. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, Canada, 2004

[12] Parolai S, Bormann P, Milkereit C. New Relationships between V_s , Thickness of Sediments, and Resonance Frequency Calculated by the *H/V* Ratio of Seismic Noise for the Cologne Area (Germany)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(6): 2 521-2 527

[13] Uebayashi H. Extrapolation of Irregular Subsurface Structures Using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Long-Period Microtremors[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(2): 570-582

Application Study of Micro-Tremor Test in Evaluating Engineering Sites

WANG Liang¹ LU Yuxia^{1,2} MA Linwei¹ KONG Dezheng¹

1 Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 450 West-Donggang Road, Lanzhou 730000, China

2 Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, 450 West-Donggang Road, Lanzhou 730000, China

Abstract: Using the continuous and uniform micro-tremor test, data are collected in Chengxian. We analyze the spectrum characteristics of micro-tremor test data using a single point of spectrum ratio method, then the recommended value of the site predominant period is obtained according to the classification of the spectrum type results. Based on existing drilling data, the correlation between site predominant period and the thickness of the overlay is established. Using the actual engineering data to verify the accuracy and the universality of the relationship. Due to its economy, simplicity and speed, the micro-tremor test provides basic data for the seismic safety evaluation of region engineering sites, earthquake seismic micro-zoning, the categories of site classification, site selection and evaluation.

Key words: micro-tremor; spectral characteristic; suggested value of predominant period; seismic micro-zoning

Foundation support: Basic Research Fund of Institute of Earthquake Science, CAE, No. 2015IESLZ05; National Natural Science Foundation of China, No. 51248005.

About the first author: WANG Liang, postgraduate, majors in geotechnical engineering and engineering seismology, E-mail: 549533696@qq.com.

Corresponding author: LU Yuxia, associate researcher, majors in geotechnical engineering and engineering seismology, E-mail: yuxial@163.com.