

基于 HHT 的典型红土区 地脉动特性与场地特征关联性研究

周仰新¹, 李永强^{1,2}, 许言¹, 刘旭锋¹, 陈波¹

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 南昌市应急管理局, 江西 南昌 330038)

摘要: 对典型红土地开展系统的地脉动测试, 基于希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 中的经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 从测试信号中分解出场地有效地脉动信号, 对其进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 和 Hilbert 变换, 产生功率谱曲线和 Hilbert 边际谱曲线, 以确定场地卓越周期, 进而探索与直接傅氏法和 H/V 谱比法不同的场地特征参数判别方法。目标场地的有效地脉动信号为 EMD 分解后的第 4 个本征模态函数 (4th intrinsic mode function, IMF4), 对各个测点的 IMF4 进行 FFT 和 Hilbert 变换, 获取的地脉动卓越周期水平向在 0.20~0.36 s, 垂直向在 0.23~0.39 s, 结果表明, 基于 HHT 的地脉动测试法来确定场地类别、划分场地岩土类型, 与场地钻孔分析结果一致性高, 关联性强。

关键词: 地脉动; 场地特征; HHT; 卓越周期; 红土区

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0016-06

Study on correlation between microtremor characteristics and site characteristics in typical laterite areas based on HHT

ZHOU Yangxin¹, LI Yongqiang^{1,2}, XU Yan¹, LIU Xufeng¹, CHEN Bo¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Nanchang Emergency Management Bureau, Nanchang 330038, China)

Abstract: A systematic microtremor measurement was conducted on typical laterite sites. The empirical mode decomposition (EMD) in Hilbert Huang transform (HHT) was used to decompose the effective microtremor signals from the measurement signals. Fast Fourier transform (FFT) and Hilbert transform were used to generate power spectral curves and Hilbert marginal spectral curves of the effective microtremor signal to determine the predominant period of the site, and then to explore methods for determining site characteristic parameters that are different from the direct Fourier methods and H/V spectral ratio methods. The effective microtremor signal of the target site is the fourth intrinsic mode function (IMF4) derived from EMD. The predominant period of microtremor obtained by FFT and Hilbert transformation on the IMF4 of each measurement point ranges from 0.20~0.36s in the horizontal direction and from 0.23~0.39s in the vertical direction. Such results indicate that the determination of site classification and division of geotechnical types through microtremor measurement based on HHT is highly consistent and correlated with the drilling results of the site.

Keywords: microtremor; site characteristics; HHT; predominant period; laterite areas

地脉动信号中蕴含了丰富的地球物理信息, 通过分析地脉动频谱特性可获取场地卓越周期, 进而判别场地类别、区分场地岩土类型等^[1], 且地脉动测试具备耗时短、成本低、易操作、对环境

没有影响等优势。

利用地脉动信号获取卓越周期常见的方法有直接傅氏法和 H/V 谱比法, Khedr^[2] 按照地脉动 H/V 谱比卓越频率与峰值两个参数进行场地类别

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52068002); 江西省“双千计划”项目 (DHSQT32022006/JXSQ2020101041); 江西省自然科学基金项目 (20202BABL204064)

第一作者简介: 周仰新 (1998—), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向: 工程地震。

通信作者: 李永强 (1983—), 男, 河南济源人, 副研究员, 博士, 研究方向: 岩土地震工程与波动数值模拟。

的划分;Laouami^[3]通过计算不同场地类别的标准 H/V 谱比曲线,建立新的场地分类标准;郑芳等^[4]利用直接傅氏法研究了黄土的地脉动特征;刘宇实等^[5]通过 H/V 谱比法快速测出场地卓越周期并分析其与覆盖层厚度的关系。目前常用的地脉动信号处理方法是先对测试数据滤波,然后开展傅里叶变换形成频谱曲线^[6],其中包含有干扰信号成分,而 Liu^[7]和李传金等^[8]利用 HHT 对地脉动信号分析,发现有效的地脉动信号为测试信号通过 HHT 处理后的某一 IMF 分量或测试信号数据减去 IMF 分量后剩余数据,并可确定场地卓越周期。HHT 虽然从出现至今已超过 20 a,但其在地震波、爆破振动信号和电磁信号等应用较多,在处理地脉动信号领域的应用较少^[8],尤其是在南方红土地特征参数研究中的应用尚未找到相关案例,考虑到 HHT 在地脉动信号处理中,可剔除非天然地脉动噪声,且通过其边际谱特性获取的场地特征与钻孔勘探一致性高,本研究对一红土地进行地脉动测试分析,通过 HHT 方法提取该场地有效地脉动信号,利用 Hilbert 变换和 FFT,将地脉动测试时域信号转换为频谱曲线,根据地脉动频谱特性获取场地卓越周期,确定场地类型及岩土类别,并对钻探与地脉动测算结果进行对比分析,突显 HHT 在红土地地脉动测试中的适用性和优势。

1 地脉动测试原理

地脉动在土层传播过程中,经过不同介质层

的多次反射、折射,并携带了反映场地土层特性的丰富信息,而土层的固有特性是稳态的,不随时间变化^[9]。因此,可以通过地脉动测试,利用 FFT、HHT 等方法从地脉动信号中获取相关频谱曲线,分析地脉动信号,并进行场地影响估计,进而测算场地土层参数。

本研究对场地具有地质钻孔及波速测试信息的代表性测点进行地脉动信号采集,详见表 1。

2 数据处理

2.1 希尔伯特—黄变换(HHT)

HHT 包含经验模态分解(EMD)和 Hilbert 变换两部分,是一种自适应时频分析法,一般用来处理非平稳信号。在实际观测中,地脉动信号易受机械振动、过往车辆等影响,记录到的地脉动非平稳^[10],这时就可利用 HHT 对地脉动测试信号进行分析。通过 EMD 对原信号分解,直至满足残余分量为单调函数或常数时,终止 EMD 分解过程,场地地脉动有效信号一般在前 5 个 IMF,最终分解成 10 个 IMF,其中包含 1 个残余分量,图 1(a-e)显示前 5 个 IMF,对各个 IMF 分量在频域上展开分析,结合场地钻探信息可确定目标场地有效地脉动信号。利用 HHT 中的 Hilbert 变换对其处理,并在时间轴上积分形成 Hilbert 边际谱,边际谱和功率谱具有较好的一致性^[7],均可获取地脉动卓越频率。

表 1 代表性地脉动测点钻孔及波速实测数据

Tab.1 Drilling and wave velocity measurement data of representative microtremor measurement points

岩土类型	层厚/m						剪切波速/(m·s ⁻¹)					
	ZK1	ZK3	ZK4	ZK8	ZK9	ZK26	ZK1	ZK3	ZK4	ZK8	ZK9	ZK26
1-1 Q ₄ ^{al+pl} 粉质黏土	2.80	3.50	6.00	—	4.20	14.60	198	206	228	—	223	267
2-1 Q ₄ ^{al+pl} 细砂	1.20	—	—	—	—	—	237	—	—	—	—	—
1-2 Q ₄ ^{al+pl} 粉质黏土	1.20	—	—	—	—	—	255	—	—	—	—	—
2-2 Q _{al+pl4} 细砂	1.20	—	—	—	—	—	289	—	—	—	—	—
K ₂ 强风化砂岩	1.00	—	—	—	—	4.90	450	—	—	—	—	450
K ₂ 中风化砂岩	3.20	—	—	—	—	12.50	622	—	—	—	—	740
P ₁₂ 全风化千枚岩	—	11.50	10.00	26.70	8.20	—	—	342	366	339	325	—
P ₁₂ 强风化千枚岩	—	3.20	8.50	0.80	11.10	—	—	506	544	527	528	—
P ₁₂ 中风化千枚岩	—	3.80	3.30	4.30	12.50	—	—	644	689	670	777	—

注:表中“—”表示该钻孔没有对应地层。

2.2 快速傅里叶变换

对原信号各个 IMF 进行 FFT 变换,得到对应功率谱,如图 1(f~j)所示,对功率谱进行分析,可

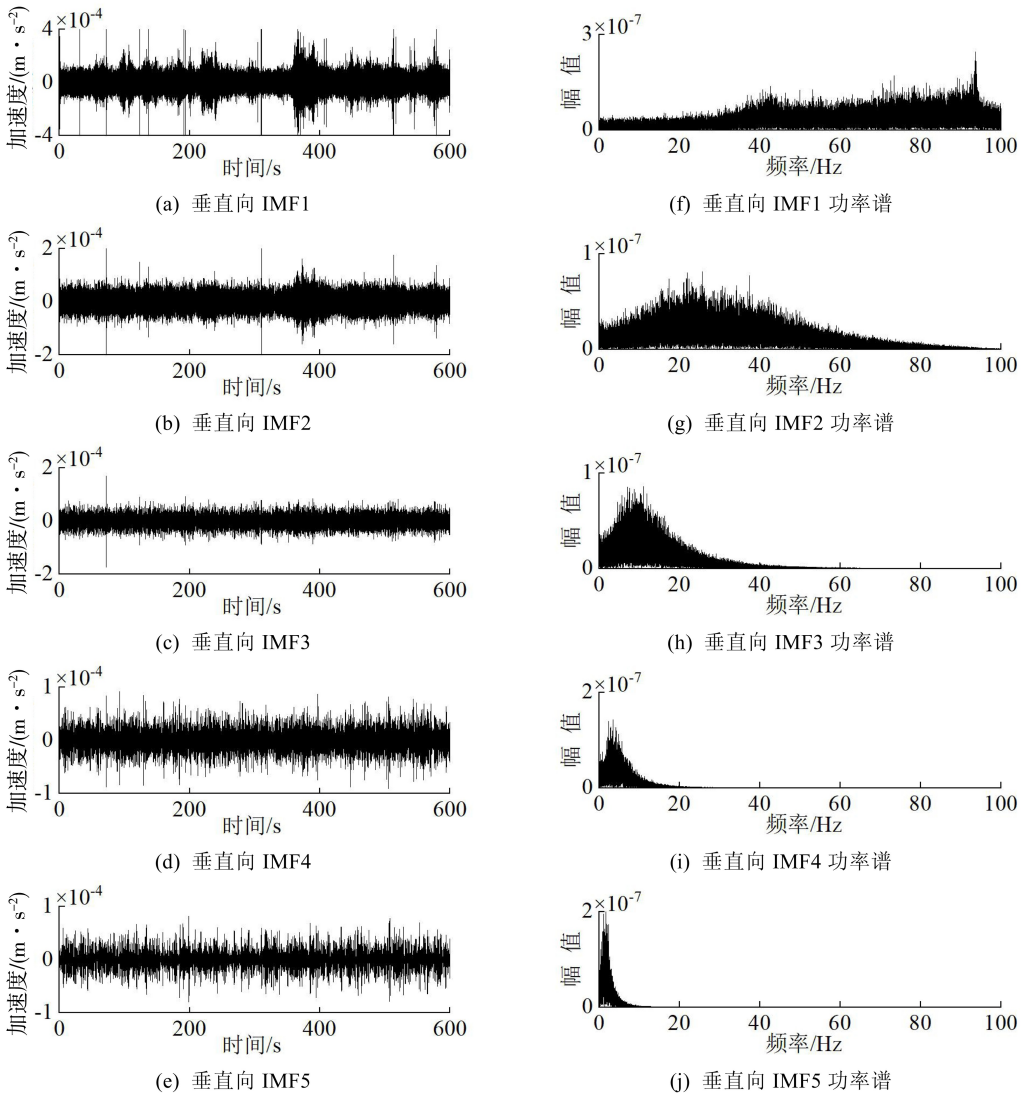


图 1 测点 ZK4 垂直方向的 5 个 IMF 及其功率谱

Fig.1 5 IMFs and their power spectra in vertical direction of ZK4

2.3 场地有效地脉动信号提取

通过目标场地已有地质钻孔和剪切波速信息计算出场地卓越频率在 2~4 Hz 范围内。

各个测点测试信号通过 EMD 得到的第 n 个 IMF 称为 IMF_n ,计算结果表明,各测点 IMF1 的主频分布在 20 Hz 以后,IMF2 的主频分布在 10~50 Hz,IMF3 的主频分布在 5~15 Hz,IMF5~IMF10 的主频均分布在 2 Hz 以前,而 IMF4 的主频稳定在 2~6 Hz 范围内。

根据对场地条件和各 IMF 特征的分析,IMF4 主频范围与工程场地卓越频率范围相符,且与目

获取场地的卓越周期并用于确定场地类别,判别场地岩土类型及推求剪切波速范围等。

标场地通过剪切波速计算出的卓越频率范围吻合,确定其为目标场地的有效地脉动信号并开展相关数据计算及分析。

3 结果分析

结合场地钻孔及剪切波速资料,根据公式 (1)~(8)^[13] 分别计算出测试场地 20、25、30 m 和整个覆盖层的等效剪切波速 V_{s20} 、 V_{s25} 、 V_{s30} 及 V_{sb} 和波速卓越周期 T_{s20} 、 T_{s25} 、 T_{s30} 及 T_{sb} :

$$V_{s20} = d_0 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i} \quad (1)$$

$$V_{s25} = 25 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i} \quad (2)$$

$$V_{s30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i} \quad (3)$$

$$V_{sb} = H / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i} \quad (4)$$

$$T_{s20} = \frac{4d_0}{V_{s20}} \quad (5)$$

$$T_{s25} = \frac{100}{V_{s20}} \quad (6)$$

$$T_{s30} = \frac{120}{V_{s30}} \quad (7)$$

$$T_{sb} = \frac{4H}{V_{sb}} \quad (8)$$

式中, d_0 为覆盖层厚度与 20 m 中的小者, m; H 为覆盖层厚度, m; d_i 为第 i 层土厚度, m; v_i 为第 i 层土剪切波速, m/s。

根据我国场地分类指标中采取的等效剪切波速为 V_{s20} [13], 结合式(5) 计算出的场地代表性钻孔波速卓越周期 T_{s20} 及土层相关资料, 确定该场地垂直、东西和南北向的地脉动信号均为测试信号分解出来的 IMF4, 对各测点 3 个方向的 IMF4 进行 FFT, 获取地脉动信号功率谱以及 Hilbert 变换获取边际谱如图 2。频谱中峰值所对应频率即为该方向的地脉动卓越频率, 并以东西和南北向地脉动卓越周期的算术平均值作为水平向地脉动卓越周期。表 2 为该场地代表性钻孔测点钻孔信息及等效剪切波速与波速卓越周期计算结果, 场地不同岩土类型代表性钻孔的地脉动三分量测试计算结果见表 3。

在目标场地代表性钻孔位置开展地脉动测试,

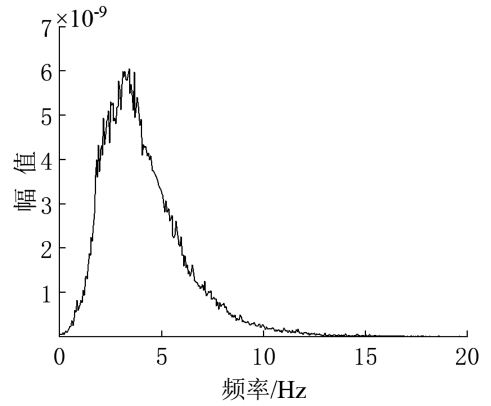


图 2 测点 ZK4 垂直方向的 IMF4 边际谱

Fig.2 IMF4 marginal spectrum in vertical direction of ZK4

由功率谱确定的地脉动卓越周期, 垂直向为 0.23~0.36 s, 水平向为 0.20~0.36 s; 由边际谱确定的地脉动卓越周期, 垂直向为 0.26~0.39 s, 水平向为 0.22~0.36 s。按《地震区工程选址手册》[14]卓越周期为 $0.1 \text{ s} \leq T < 0.4 \text{ s}$ 时, 场地类别为 II 类; 按 CECS74:95《场地微振动测量技术规程》[15]卓越周期为 $0.2 \text{ s} \leq T < 0.4 \text{ s}$ 时, 场地土类型为以洪积层为代表的硬而厚的场地土。图 3 分别给出了按不同深度计算的波速卓越周期 T_{s20} 、 T_{s25} 、 T_{s30} 及 T_{sb} 与 HHT 和 FFT 得到的垂直和水平向卓越周期的关系图, 其中由 FFT 得到的水平向卓越周期与我国场地分类指标中采取的以等效剪切波速为 V_{s20} 计算得到的卓越周期 T_{s20} 较为接近, 而通过 HHT 得到的水平卓越周期则与欧美等场地分类指标中采取的以等效剪切波速为 V_{s30} [13] 及 V_{s25} 计算得到的卓越周期 T_{s30} 或 T_{s25} 更为接近, 但 T_{s30} 数据线性度更好, 为准确判定场地类别, 建议采用 T_{s30} 。

表 2 场地代表性测点钻探信息及等效波速卓越周期计算结果

Tab.2 Drilling information of representative measurement points on the site and calculation results of equivalent wave velocity predominant period

测点	钻孔深度 h/m	计算深度 d_0/m	覆盖层厚 H/m	场地 类别	等效剪切波速计算值/($m \cdot s^{-1}$)				波速卓越周期/s			
					V_{s20}	V_{s25}	V_{s30}	V_{sb}	T_{s20}	T_{s25}	T_{s30}	T_{sb}
ZK1	25.00	11.00	11.00	II	275.91	400.79	426.04	275.91	0.16	0.25	0.28	0.16
ZK3	22.00	17.00	17.00	II	311.53	370.38	398.60	311.53	0.22	0.27	0.30	0.22
ZK4	27.80	18.00	18.00	II	314.06	323.64	394.30	314.06	0.23	0.31	0.30	0.23
ZK8	31.80	20.00	27.00	II	339.00	339.00	357.10	366.12	0.24	0.29	0.34	0.29
ZK9	36.00	16.00	16.00	II	273.70	373.03	408.42	273.70	0.23	0.27	0.29	0.23
ZK26	33.00	19.00	19.00	II	294.76	342.45	376.13	294.76	0.26	0.29	0.32	0.26

注:表中土的类型均为中硬土。

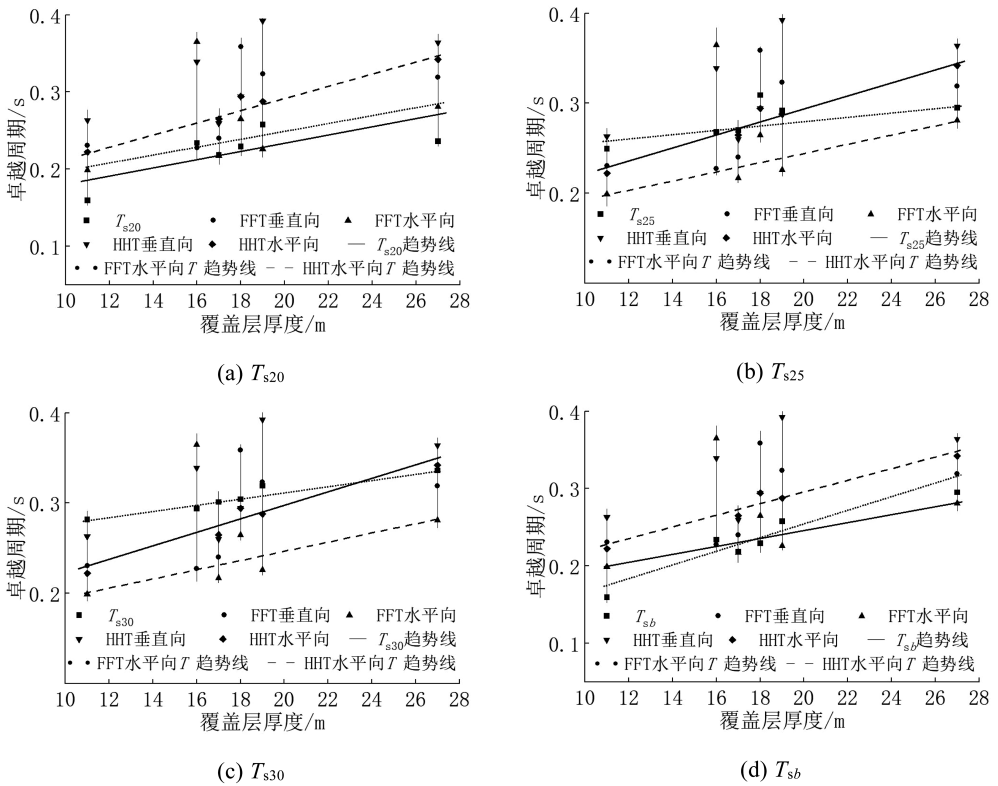


图 3 波速卓越周期与地脉动卓越周期关系图

Fig.3 Relationship between predominant period of wave velocity and predominant period of microtremor

由图 3 可知, T_{s30} 与覆盖层厚度之间有显著的线性关系, 由 HHT 确定的水平向卓越周期同样与覆盖层厚度之间有良好的线性关系(除厚度 16 m 处水平向误差较大外), 而 FFT 方法确定的水平向卓越周期总体偏小。考虑到钻孔及波速测试结果的不完全性及价格昂贵, HHT 方法为确定场地卓越周期的简便实用和有效方法。

表 3 代表性钻孔的地脉动三分量测试计算结果

Tab.3 Calculation results of microtremor's three-component testing for representative drilling

测点	测试方向	FFT 卓越频率/Hz	FFT 卓越周期/s	HHT 卓越频率/Hz	HHT 卓越周期/s
ZK1	垂直	4.33	0.23	3.80	0.26
	东西	5.12	0.20	5.00	0.20
	南北	4.93	0.20	4.00	0.25
	水平平均值	5.03	0.20	4.50	0.22
	ZK3	垂直	4.16	0.24	3.85
	东西	5.05	0.20	3.00	0.33
	南北	4.16	0.24	4.55	0.22
	水平平均值	4.61	0.22	3.78	0.26

续表

测点	测试方向	FFT 卓越频率/Hz	FFT 卓越周期/s	HHT 卓越频率/Hz	HHT 卓越周期/s
ZK4	垂直	2.79	0.36	3.40	0.29
	东西	3.98	0.25	3.40	0.29
	南北	3.57	0.28	3.40	0.29
	水平平均值	3.78	0.26	3.40	0.29
	ZK8	垂直	3.14	0.32	2.75
	东西	3.79	0.26	3.15	0.32
	南北	3.33	0.30	2.70	0.37
	水平平均值	3.56	0.28	2.93	0.34
ZK9	垂直	4.39	0.23	2.95	0.34
	东西	2.76	0.36	2.75	0.36
	南北	2.73	0.37	2.80	0.36
	水平平均值	2.74	0.36	2.78	0.36
	ZK26	垂直	3.10	0.32	2.55
	东西	4.29	0.23	3.60	0.28
	南北	4.55	0.22	3.35	0.30
	水平平均值	4.42	0.23	3.48	0.29

综上,基于HHT的地脉动测试确定场地类别及岩土类型结果与钻探结果一致性高,关联性强。

4 结论

1) 场地地脉动有效信号可通过HHT提取某个IMF分量来确定,且通过HHT得到的边际谱可用来确定场地的卓越周期,场地的有效地脉动信号分量为测试信号的IMF4分量,该信号的频率范围为2~6 Hz;

2) 对目标场地具备详细钻探信息的点位测试地脉动,利用HHT对地脉动信号处理,最终获取的地脉动卓越周期,水平向在0.20~0.36 s,垂

直向在0.23~0.39 s;

3) 基于HHT的地脉动测试对目标场地类别划分为Ⅱ类,场地岩土类别为以洪积层为代表的硬而厚的场地土,划分结果与钻孔勘探结果一致性高;

4) 由HHT方法确定的场地卓越周期与钻孔波速结果测算的 T_{s30} 或 T_{s25} 趋势一致,误差较小,反映了场地更细致的内在特征,在实际工程中一定程度上可替代常规钻孔波速测试分析法。考虑到钻孔波速测试结果的非完全渐变性,本研究给出的结果可能更精确。因本方法的简便可靠,后续可进一步深入探索基于HHT方法的脉动特性相关场地分类方法并实用化。

参考文献:

- [1] 胡仲有,杨仕升,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):211-218.
- [2] KHEDR F, MARZOUK I, ELRAYESS M. Site effect estimation using horizontal to vertical (H/V) spectral ratio technique in Nile Delta, Egypt[J]. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2019, 8(1):84-96.
- [3] LAOUAMI N. Proposal for a new site classification tool using microtremor data[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(10):4681-4704.
- [4] 郑芳,邓津. 海原地区黄土的微观结构及地脉动特征分析[J]. 地震工程学报,2020,42(5):1173-1178.
- [5] 刘宇实,师黎静. 基于地脉动谱比法的场地特征参数快速测定[J]. 振动与冲击,2018,37(13):235-242.
- [6] 师黎静,刘佳轩,陈盛扬. 基于地脉动H/V谱比卓越周期的场地类别划分[J]. 振动与冲击,2022,41(13):34-42,51.
- [7] LIU L B, MEHL R, WANG W J, et al. Applications of the Hilbert-Huang transform for microtremor data analysis enhancement[J]. Journal of Earth Science, 2015, 26(6):799-806.
- [8] 李传金,渐翔,王强,等. Hilbert-Huang变换在地脉动卓越周期计算中的应用[J]. 地球物理学进展,2021,36(4):1688-1693.
- [9] 董连成,申学金,李广影,等. 青藏铁路典型场地地脉动台阵观测研究[J]. 世界地震工程,2015,31(2):43-51.
- [10] 李传金,杜亚楠,游志伟,等. 微动数据平稳性检验方法的适用性分析[J]. 地球物理学进展,2018,33(2):823-829.
- [11] 秦彤威,王少瞳,冯宣政,等. 微动H/V谱比方法[J]. 地球与行星物理论评,2021,52(6):587-622.
- [12] 言利帮. 地脉动在场地卓越周期测试中的应用[J]. 工程地球物理学报,2009,6(S1):195-196.
- [13] 师黎静,陈盛扬. 基于地脉动单点谱比的场地特征参数测定方法适用性研究[J]. 振动与冲击,2020,39(11):138-145.
- [14] 王钟琦,张荣祥,汪敏,等. 地震区工程选址手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [15] 中国工程建设标准化协会. 场地微振动测量技术规程:CECS 74:95[S]. 北京:中国计划出版社,1995.

(责任编辑:陈雯)