

石春香, 李胡生, 罗奇峰, 施卫星. 2011. 振动台试验模型地震反应的 HHT 研究. 地震学报, 33(1): 114-119.
Shi Chunxiang, Li Husheng, Luo Qifeng, Shi Weixing. 2011. HHT analysis on seismic response of a structure model tested on shake table. *Acta Seismologica Sinica*, 33(1): 114-119.

振动台试验模型地震反应的 HHT 研究^{*}

石春香^{1),*} 李胡生¹⁾ 罗奇峰²⁾ 施卫星²⁾

1) 中国上海 200235 上海应用技术学院土木建筑与安全工程学院

2) 中国上海 200092 同济大学结构工程与防灾研究所

摘要 Hilbert-Huang Transform(HHT)是一种新的适用于非线性、非平稳信号,且具有自适应性的数据处理方法. 本文简要介绍了一座 45 层钢筋混凝土框架结构及其振动台试验模型概况. 利用 HHT 分析了模型结构在不同烈度地震中的反应记录,得到了 Hilbert 时频幅值三维分布和 Hilbert 边际谱. Hilbert 谱得到记录能量集中分布的频段与时间范围,捕捉到信号变化的主要特征. Hilbert 边际谱曲线形状和峰值频率值随着地震烈度的升级而发生了相应变化,而且所有的结果图形体现出相同的规律性,预示着 Hilbert 边际谱在土木工程结构安全评价中的应用前景.

关键词 Hilbert-Huang 变换 边际谱 地震反应 振动台试验

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.01.010

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

HHT analysis on seismic response of a structure model tested on shake table

Shi Chunxiang^{1),*} Li Husheng¹⁾ Luo Qifeng²⁾ Shi Weixing²⁾

1) School of Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology,
Shanghai 200235, China

2) Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University,
Shanghai 200092, China

Abstract: Hilbert-Huang transform (HHT) is a novel data analysis method which can be used to process nonlinear, non-stationary data and is very adaptive. A 45-storey RC frame structure and its shake table test model were briefly introduced. The structural response records under different seismic intensities were analyzed with HHT method, and the time-frequency-amplitude and Hilbert marginal spectrum were obtained. The result shows that Hilbert spectrum can clearly present the energy distribution with time and frequency. Most energy of Hilbert spectrum is much more concentrated in the definite range of time and frequency. The Hilbert spectrum can grasp main characteristics of the signal. Hilbert marginal spectrum curve and natural vibration frequency at peak amplitude vary with different seismic intensity. The same trend of all figures

^{*} 基金项目 上海市科委重点攻关项目(072105115)和上海市教育委员会重点学科建设项目(J51502)资助.

收稿日期 2009-08-22 收到初稿, 2010-06-13 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: scx76@sit.edu.cn

shows that Hilbert marginal spectrum can be used in the safety assessment of civil engineering structures.

Key words: Hilbert-Huang Transform; marginal spectrum; seismic response; shake table

引言

长期以来,地震工程领域对振动台试验数据处理采用的信号分析技术是傅里叶变换,但傅里叶变换只适用于稳态信号的分析,不能适用于非稳态信号的分析,而且也不能作局部分析(大崎顺彦,1976).针对这些矛盾,许多学者经过长期努力和探索,终于找到了既保留傅里叶变换优点又能弥补它不足的小波变换.小波分析是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法,它具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力(朱继梅,1996a, b).但是小波分析的结果强烈受到所选小波基的限制,通过小波分析得到的小波分量和小波谱只相对于所选择的小波基有意义,不是直接对于原始数据,而且容易造成能量泄漏(石春香,罗奇峰,2003).近年发展起来的基于经验模态分解方法(empirical mode decomposition, 简称为 EMD)的 Hilbert-Huang 变换理论(简称 HHT),也是一种适合对非平稳信号进行分析的有效工具(Huang *et al.*, 1998),被认为是信号处理领域的一大突破,在地震工程领域得到了广泛应用. HHT 变换能有效地将地震波的各种频率成分以固有模态函数的形式,从时程曲线中分离出来; HHT 变换中的 Hilbert 谱是包含时间、频率、振幅的三维谱,它能用来分析地震波的能量随时间、瞬时频率的分布.国外一些学者把它应用到近场强地面运动及结构反应特性(Loh *et al.*, 2001; Ma, 2001; Zhang, 2002).国内一些学者用 Hilbert-Huang 变换分析了一座 7 层钢筋混凝土框架结构在 3 次地震中的反应记录(公茂盛,谢礼立,2006),并利用该方法对模型拱坝结构进行了模态参数识别(寇立夯,金峰,2008).我们曾简要阐述过 HHT 变换理论,并对比分析过 HHT 变换与傅里叶变换,对 Huang 变换中出现的端点飞翼问题及其解决方法进行了研究(罗奇峰,石春香,2003),而且在 Hilbert-Huang 变换理论和 Hilbert 阻尼谱的基础上,对深圳罗湖商务大厦振动台试验模型 31 层楼面 y 面 x 和 y 方向上布置的加速度传感器记录到的加速度进行 Hilbert-Huang 变换,确定结构模型在各级地震波输入后前两阶自振频率的变化和 Hilbert 阻尼谱的变化(石春香等,2005).本文借助该方法,对深圳罗湖商务大厦 45 层钢筋混凝土框架振动台试验模型 y 面 x 方向上所有布置的加速度传感器记录到的加速度进行 Hilbert-Huang 变换,确定各级地震波输入后的 Hilbert 能量谱和 Hilbert 边际谱,得到一些有意义的结论.

1 振动台试验模型简介

为了进行深圳罗湖商务大厦抗震试验研究,同济大学土木工程学院结构工程与防灾研究所曾设计制作了如图 1 所示的 1:25 微粒混凝土模型,进行模拟地震振动台试验.其中加速度传感器的布置位置如图 2 所示.试验用地震波形为深圳人工波 SR,Ⅶ度基本烈度地震 x 方向时程曲线如图 3 所示.试验过程中,根据加载等级的不同,对各个工况加速度幅值进行调整,其中Ⅶ度多遇地震、Ⅶ度基本地震、Ⅶ度罕遇地震和Ⅷ度罕遇地震输入加速度峰值分别为 $0.14 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$, $0.4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$, $0.8 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 和 $1.6 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$.



图 1 试验模型
Fig. 1 Test model

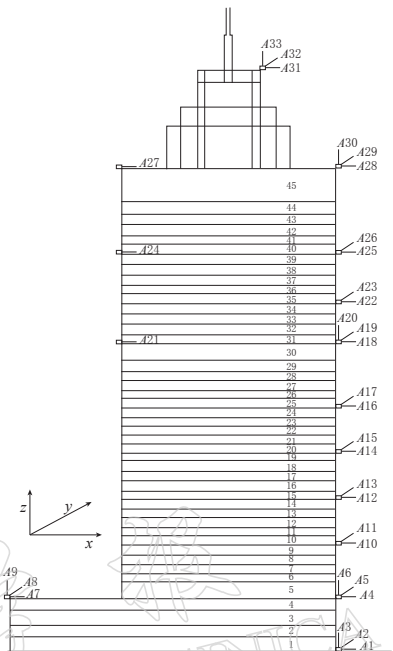


图 2 加速度传感器布置
Fig. 2 Accelerometers disposal

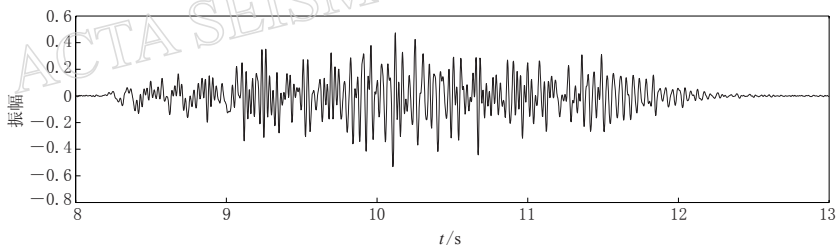


图 3 人工地震 SR 波 x 方向时程曲线
Fig. 3 Artificial SR time history in x direction

2 基于 HHT 的地震反应

首先对大厦模型 31 层楼面 y 面 x 方向上布置的加速度传感器记录到的加速度进行 Hilbert-Huang 变换, 确定结构模型在各级地震波输入后结构模型 Hilbert 谱, 如图 4 所示. 其中图 4a—d 分别对应Ⅶ度多遇地震、Ⅶ度基本地震、Ⅶ度罕遇地震和Ⅷ度罕遇地震波输入后结构模型 Hilbert 能量谱.

由图 4 可以看出, Hilbert 能量谱反应了信号分布的频段与时间范围, 能量主要集中在 50 Hz 之内, 其余部分幅值较小, 捕捉到信号随时间和频率变化的主要特征.

然后, 对不同楼层布置的加速度传感器在Ⅶ度多遇地震、Ⅶ度基本地震、Ⅶ度罕遇地震和Ⅷ度罕遇地震作用下采集到的加速度数据进行 Hilbert-Huang 变换得到 Hilbert 边际谱, 如图 5 所示. 其中图 5a—j 分别对应 1, 5, 10, 15, 20, 25, 31, 36, 41 楼层和楼顶层的 Hilbert 边际谱.

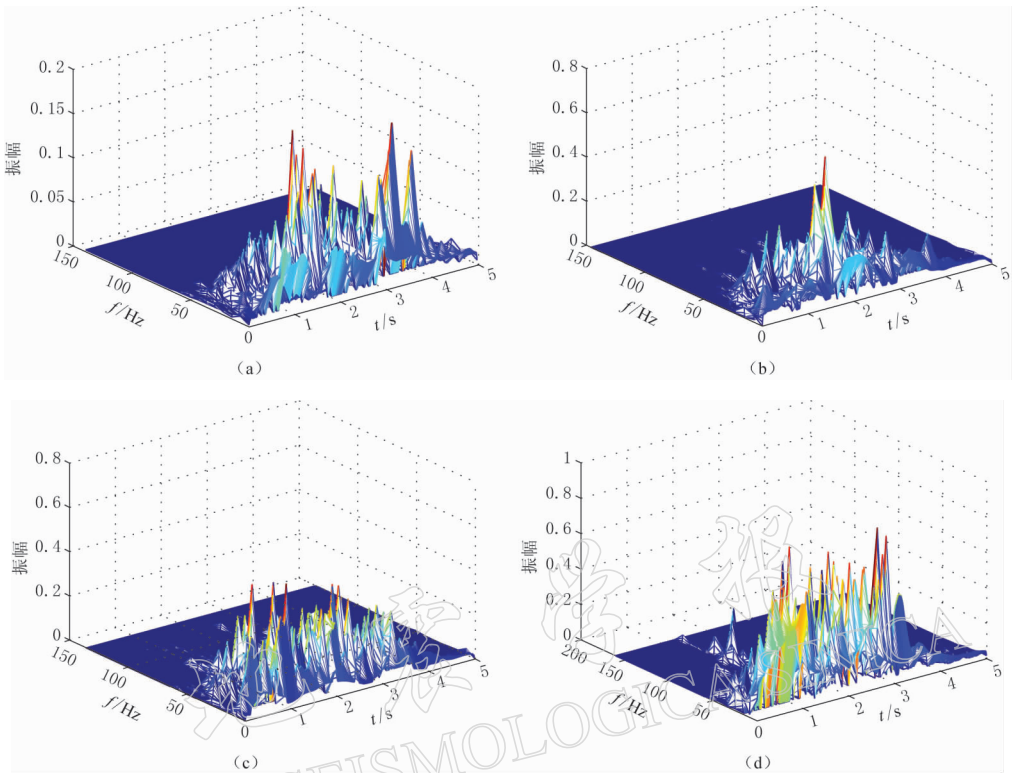


图 4 不同烈度地震后的 Hilbert 谱

(a) Ⅶ度多遇地震；(b) Ⅶ度基本地震；(c) Ⅶ度罕遇地震；(d) Ⅷ度罕遇地震

Fig. 4 Hilbert spectra under different intensity ground motion input

(a) Frequently happened earthquake of intensity Ⅶ；(b) datum earthquake of intensity Ⅶ；(c) occasionally happened earthquake of intensity Ⅶ；(d) occasionally happened earthquake of intensity Ⅷ

Hilbert 边际谱反应了信号在不同频率成分上的分布状况，能捕捉到信号能量随频率变化的主要特征，而且各结果图形体现出相同的规律性：

1) 随着地震输入加速度峰值的增加，各图中 Hilbert 边际谱曲线上移，从试验现象发现各楼层结构开裂加剧，裂缝宽度增大，说明模型结构的损伤发生和不同程度的损伤造成了 Hilbert 边际谱能量分布的相应变化。

2) Hilbert 边际谱峰值频率值随着地震烈度的升级而左移，体现出结构自振频率和刚度的下降。

3 讨论与结论

目前在土木工程结构安全评价的研究成果多为数值模拟研究，缺乏动力试验验证。为了探讨对于损伤具有良好敏感性的桥梁预警指标，因在大型桥梁的实时动态监控系统中采集到的信号多为非平稳信号，本文利用 HHT 方法能适应非平稳信号，有较好的抗噪性能，Hilbert 谱反映的信号频率成分带有统计性，对深圳罗湖商务大厦模型结构振动台试验采集到的加速度数据进行了分析。结果得出，Hilbert 能量谱反应了信号分布的频段与时间范围，Hilbert 边际谱反应了信号在不同频率成分上的分布状况，能捕捉到信号能量随频率变

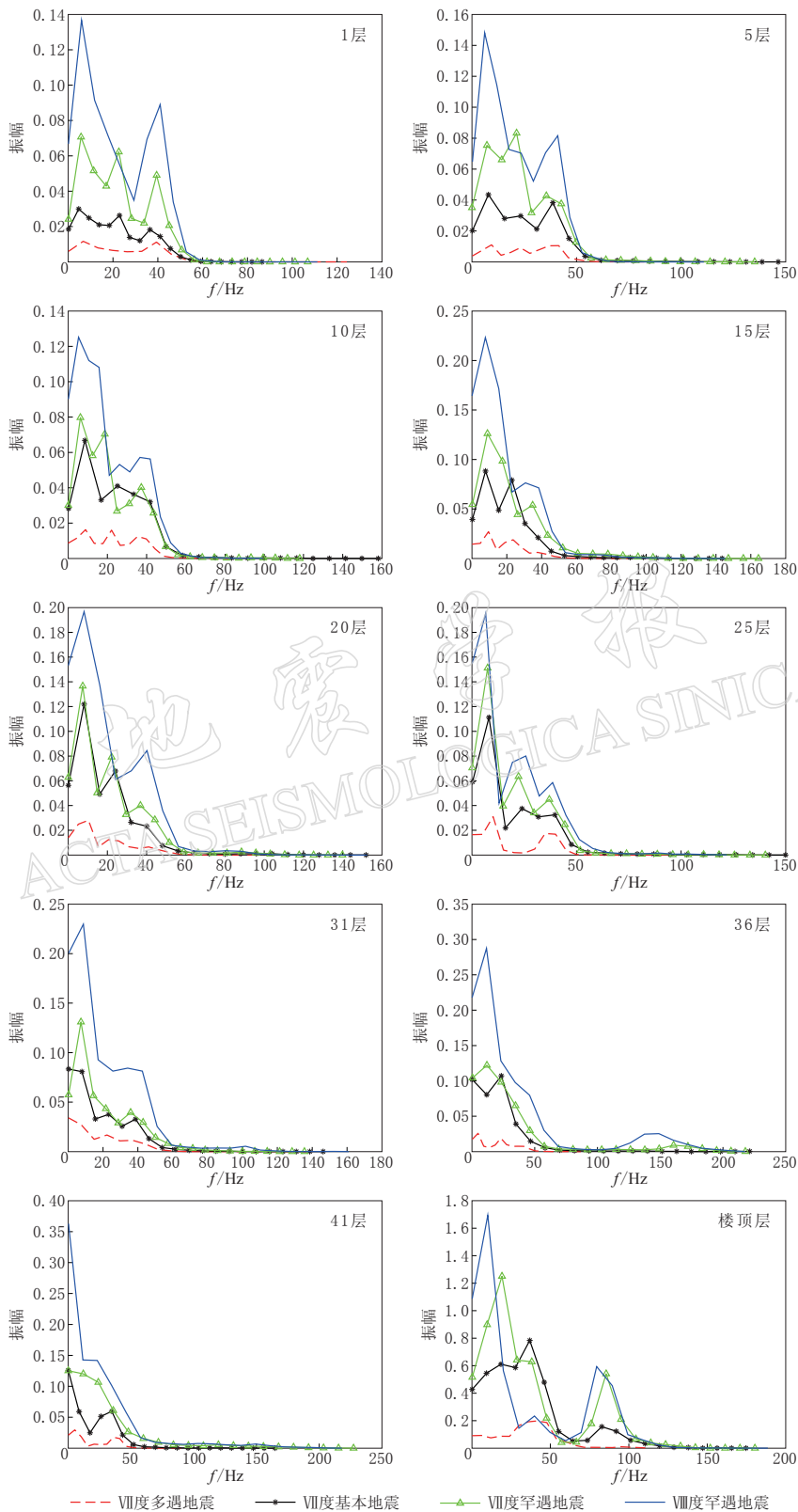


图 5 不同楼层的 Hilbert 边际谱

Fig. 5 Hilbert marginal spectra for different floor

化的主要特征, 其曲线和峰值对应的频率值随着地震烈度的升级而发生了相应变化, 并且不同楼层的结果图形体现出相同的规律性, 表明 Hilbert 边际谱对于结构的损伤具有良好的敏感性. 而且 Hilbert 边际谱无需结构的模态参数等其它特征信息, 也无需外部激励信息, 只需对任一位置处加速度响应进行监测即可实现, 更适用于大型桥梁结构健康监测的动态、实时性要求. 但对于桥梁结构损伤位置的精确定位和损伤程度的精确辨识, 以及如何对实际结构采集数据中的噪声干扰进行处理, 还需进一步研究.

参 考 文 献

- 大崎顺彦(著). 1976. 吕敏申, 谢礼立(译). 1980. 地震动的谱分析入门[M]. 北京: 地震出版社: 45-60.
- 公茂盛, 谢礼立. 2006. 结构地震反应记录 HHT 分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), **38**(4): 450-454.
- 寇立芳, 金峰. 2008. 基于 HHT 方法的结构模态参数识别[J]. 水利水电科技进步, **28**(3): 45-49.
- 罗奇峰, 石春香. 2003. Hilbert-Huang 变换理论及其计算中的问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), **31**(6): 637-640.
- 石春香, 罗奇峰. 2003. 时程信号的 Hilbert-Huang 变换与小波分析[J]. 地震学报, **25**(4): 398-405.
- 石春香, 罗奇峰, 施卫星. 2005. 基于 Hilbert-Huang 变换的结构损伤诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), **33**(1): 16-20.
- 朱继梅. 1996a. 小波变换及其工程应用(连载)[J]. 振动与冲击, **15**(2): 94-100.
- 朱继梅. 1996b. 小波变换及其工程应用[J]. 振动与冲击, **15**(3): 85-91, 94-101.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q, Yen N C, Tung C C, Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]// *Proc R Soc Lond A*, 454. Royal Society: 903-995.
- Loh C H, Wu T C, Huang N E. 2001. Application of the empirical mode decomposition-Hilbert spectrum method to identify near-fault ground-motion characteristics[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(5): 1339-1357.
- Ma S. 2001. *HHT Analysis of Near-Field Seismic Ground Motions*[D]. The Colorado School of Mines: 20-35.
- Zhang R C. 2002. Applications of non-stationary, nonlinear data processing and analysis in earthquake engineering[C]// *The Fourth International Conference on Nonlinear Mechanics*. Shanghai: 721-727.