

马红虎,隋明坤,赵昆. 2019年6月18日日本山形县 $M_w6.7$ 级地震场地非线性反应特征研究[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 91-96. [MA Honghu, SUI Mingkun, ZHAO Kun. Study on Nonlinear Site Response Characteristics of the Yamagata $M_w 6.7$ Earthquake in Japan on June 18th, 2019 [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 91-96]

2019年6月18日日本山形县 $M_w6.7$ 级地震 场地非线性反应特征研究

马红虎, 隋明坤, 赵 昆

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 强震作用下的土层非线性是研究场地效应的重要因素之一。选取2019年6月18日日本山形 $M_w6.7$ 级地震中8个台站的主震及20次余震的强震动记录, 采用主余震速度反应谱水平/垂直(HVSR)谱比, 并结合非线性识别指标DNL、ADNL和PNL对主震中可能发生非线性反应特征的台站进行研究。结果表明: 土体在强震动作用下场地卓越频率有向低频移动的趋势, 体现了土层非线性反应的特征; 非线性指标DNL和ADNL与地震动峰值加速度之间存在显著的相关性, 但PNL对应关系不明显。

关键词: 强震动; 非线性; 日本山形地震; HVSR谱比

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0091-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.12

Study on Nonlinear Site Response Characteristics of the Yamagata $M_w 6.7$ Earthquake in Japan on June 18th, 2019

MA Honghu, SUI Mingkun, ZHAO Kun

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: Soil nonlinearity under strong earthquake is one of the important factors for the site response research. This paper selects strong motion records of the mainshock and 20 aftershocks of 8 stations during the Yamagata $M_w6.7$ earthquake on June 18th, 2019, uses the main aftershock velocity response spectrum horizontal/vertical (HVSR) spectrum ratio, and combines the nonlinear identification indexes DNL, ADNL and PNL to study the stations that may have nonlinear response characteristics in the main earthquake. The results show that the predominant frequency of the soil site moves to low frequency under strong vibration, which reflects the characteristics of the nonlinear response of the soil layer; there is a significant correlation between the nonlinear indexes DNL and ADNL and the peak acceleration of ground motion, but the corresponding relationship between PNL is not obvious.

Keywords: Strong-motion; Nonlinearity; Yamagata earthquake in Japan; Horizontal-to-vertical spectral ratio

收稿日期: 2021-05-16

基金项目: 云南省地震局青年地震科学基金项目(2019ZX02)

作者简介: 马红虎(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震监测、水库地震监测、工程地震监测及水库诱发地震研究。

E-mail: 41427282@qq.com

0 引言

已有研究表明,强震作用下土体会呈现显著的非线性效应,如剪切波速降低、阻尼比升高、场地卓越频率降低等^[1-2]。地震波在软弱土层中传播会造成地震动强度和频率的变化,此种场地效应将直接导致建筑物的损害加重。如1985年墨西哥地震中,破坏主要在距震中400 km以外墨西哥市内古湖泊沉积层地区,软土效应造成严重的灾害^[3]。因而对地震工程结构抗震来讲考虑场地反应中产生的非线性特征显得至关重要。

土体非线性特性通常由实验室测定的动剪切模量和阻尼比与剪应变曲线来表示^[4]。但实际地震作用下土体承受的加载路径与实验室明显不同,边界条件、排水条件等因素也较难模拟^[5]。随着强震观测数据的不断积累,土体非线性动力反应在1994年Northridge地震^[6]、1995年日本神户地震^[7]和1999^[8]等地震中被直接证实。

继中国数字强震动台网于2007年建成以来,许多学者基于获取的大量观测记录研究场地在强震作用下的非线性反应。梁建文^[9]选择天津地区的参考场地和待识别场地,用强震记录来识别场地总体非线性动力特征,识别的总体非线性动力特征可以准确估计场地的强地震动。冀昆^[10]以2013年芦山余震中加速度峰值水平较低的观测记录作为场地线性反应参考,对主震中可能发生非线性反应的台站进行研究。任叶飞^[11]利用汶川地震主余震加速度记录水平/垂直谱比,分析主震的场地非线性反应,并提出评估非线性的5个重要参数。Rong^[12]利用中国西部强震动观测记录来识别台站场地非线性,并反演台站场地土层速度结构。

本文选取2019年6月18日日本山形6.7级地震主震中峰值加速度大于150 gal的8个台站,采用主震和余震速度反应谱水平/垂直(HVSR)谱比,并结合非线性识别指标DNL、ADNL和PNL对主震中可能发生非线性反应特征的台站进行研究。

1 台站选取和强震记录处理

2019年6月18日日本山形县近海海域发生6.7级地震,震源深度14 km,日本K-net和Kik-net台网分别有263个、218个台站,共计481个台站记录到此次地震加速度记录。本文选取主震加速度峰值在150 gal以上且余震记录超过5次的8个强震动台站进行场地非线性反应分析,台阵震中距从10 km至102 km,台站、主震和余震地理位置见图1所示,台站强震动记录参数见表1。8个台站中YMT005覆盖层为1 m,YMT014、YMT13和NIG012覆盖层厚度分别在6 m以内,其他4个台站覆盖层为20m以上的砂土或砾土。震中距10 km的YMT004台站获取到此次地震的最大加速度峰值,其东西、南北和竖向的峰值加速度分别为-570.6 cm/s²、-633.4 cm/s²和213.9 cm/s²,加速度时程曲线如图2(a)所示。

本文选取8个台站峰值加速度低于60 gal^[13]20次余震加速度记录(2019年6月18日至2020年3月3日),震级范围从3.1至4.4(见表2)。首先对加速度记录进行基线校正,去除背景噪声和地震时仪器倾斜所导致的基线漂移,再经0.1~20 Hz巴特沃斯带通非因果滤波进行处理。为避免截取S波和不同窗函数平滑所带来的主观误差,本文用5%阻尼比速度反应谱(见图2(b))来代替傅里叶谱计算计算水平/竖向谱比^[10,14]。

表1 所选8个台站强震动记录参数
Table 1 Strong motion recording parameters of 8 selected stations

台站编码	所属台网名称	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	震中距/km	主震峰值加速度/(cm·s ⁻²)		
						EW	NS	UD
YMT004	K-Net	139.5889	38.6276	15	10	-570.6	-633.4	213.9
NIG006	K-Net	139.4961	38.4501	6.1	17.52	212.3	-233.4	-153.8
YMT13	KiK-net	139.7606	38.4704	265	28.89	235	240.6	-113.7
YMT003	K-Net	139.8013	38.7292	17	31.18	218.5	180.6	-108.7
NIGH02	KiK-net	139.5486	38.2799	34	36.89	164.2	-187.7	-126.3
YMT005	K-Net	140.1621	38.607	350	59.44	-330.8	215	164.8
YMT014	K-Net	139.8697	37.9207	370	83.63	-248.7	167.9	35.9
NIG012	K-Net	139.4772	37.6863	68	102.38	159.1	180.1	45.9

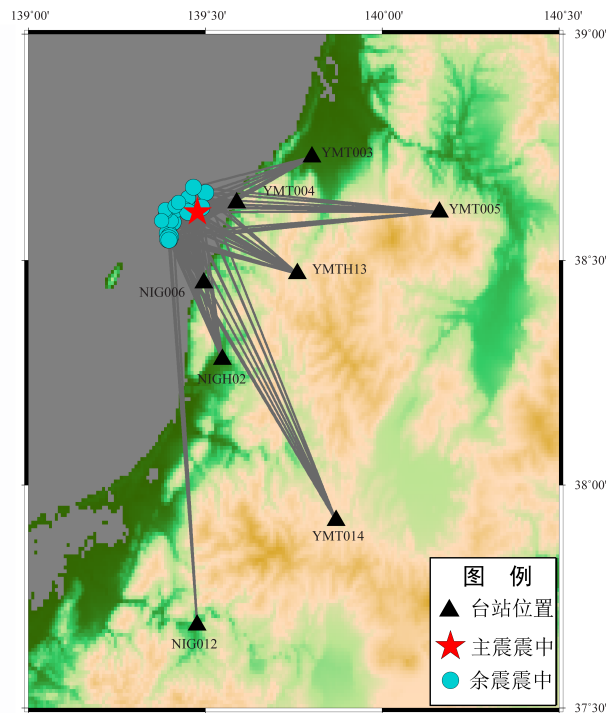


图1 主余震和台站位置分布图

Fig.1 Distribution map of main aftershocks and station locations

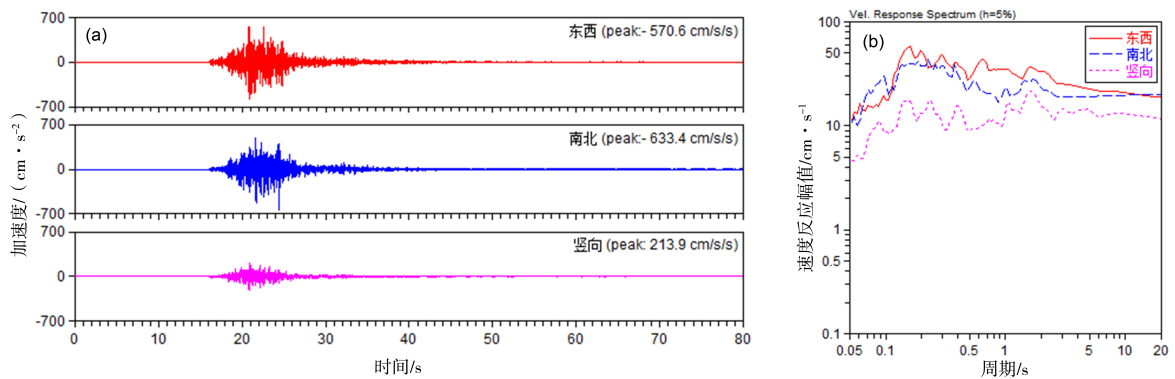


图2 YMT004加速度时程曲线和5%阻尼比速度反应谱

Fig.2 The acceleration time history and 5% damping ratio velocityresponse spectrum of the YMT004

表2 余震参数信息表

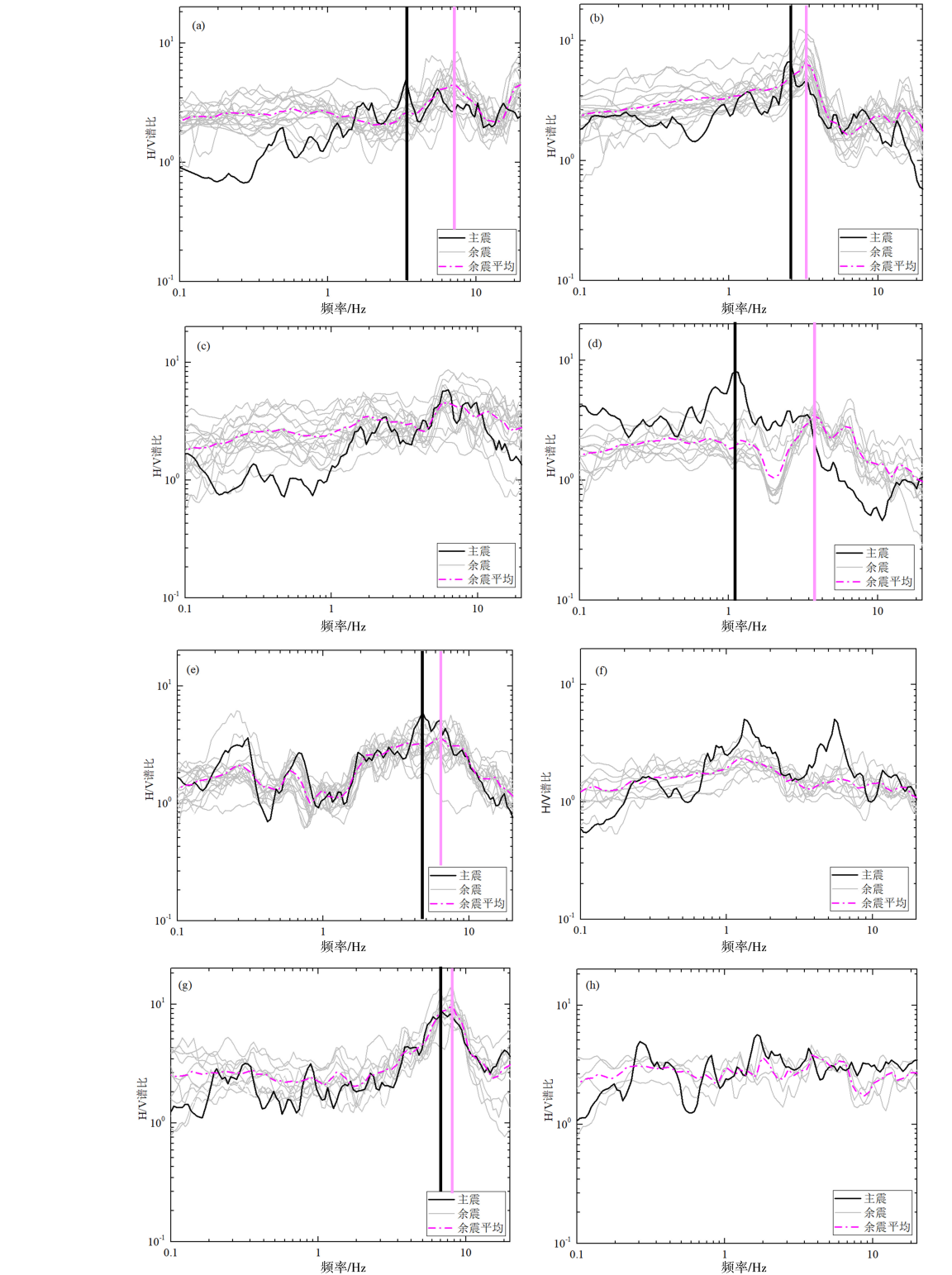
Table 2 Information table of aftershock parameters

日期/年-月-日	h : min	经度/ (°)	纬度/ (°)	深度/ km	震级	日期/年-月- 日	h : min	经度/ (°)	纬度/ (°)	深度/ km	震级
2019-06-18	22 : 26	139.502	38.65	13	3.8	2019/06/19	14 : 15	139.388	38.608	12	3.4
2019-06-18	22 : 27	139.49	38.617	13	4	2019/06/21	05 : 33	139.452	38.607	13	4
2019-06-18	22 : 37	139.447	38.62	12	3.8	2019/06/23	08 : 26	139.387	38.612	12	3.4
2019-06-18	22 : 41	139.408	38.585	12	4.1	2019/07/03	02 : 15	139.415	38.62	12	3.4
2019-06-18	23 : 14	139.452	38.638	13	3.6	2019/07/10	17 : 22	139.425	38.628	11	3.5
2019-06-18	23 : 57	139.395	38.585	12	3.3	2019/07/11	16 : 04	139.4	38.552	11	4.3
2019-06-19	00 : 23	139.42	38.612	12	3.6	2019/08/18	19 : 06	139.397	38.547	11	4.4
2019-06-19	00 : 27	139.445	38.615	12	3.1	2019/08/21	00 : 07	139.398	38.545	11	3.9
2019-06-19	00 : 57	139.395	38.56	12	4.2	2019/11/11	01 : 28	139.467	38.662	14	3.8
2019-06-19	03 : 54	139.405	38.587	12	3.3	2020/03/03	12 : 33	139.377	38.588	11	3.5

2 HVSR 谱比分析

水平/竖向 HVSR 谱比 (Horizontal-to-vertical spectrum ratio) 自^[15]提出以来被广泛地用于地脉动估计场地卓越周期和剪切波速。近年来许多学者基

于该方法用强震和弱震观测记录来估算经验传递函数和分析土层场地非线性反应^[13, 16], 为使用 HVSR 方法研究土层的非线性反应提供了理论基础。本文将 HVSR 方法计算 8 个台站的主震和余震谱比曲线, 谱比结果如图 3 所示。



(a)YMT004;(b)NIG006;(c)YMTH13;(d)YMT003;(e)NIGH02;(f)YMT005;(g)YMT014;(h)NIG012
图 3 台站主余震 HVSR 谱比曲线

Fig.3 HVSR spectrum ratio curve of main aftershocks at the station

研究结果表明,强地震动作用下土体剪切模量会随应变的增加而降低,而阻尼比会增加,进而导致有效剪切波速减小,共振频率向低频移动^[17]。从图3可以看出,YMT004,NIG006,YMT003,NIGH02和YMT014五个台站在强震下出现了不同程度的卓越频率向低频移动现象,其中YMT004和YMT003比较明显。而台站YMTH13,YMT005和NIG012三个台站谱比曲线相对较为平坦,谱比幅值位于2或3附近,没有明显卓越频率或存在卓越频率多峰现象。未出现土层非线性反应特征是因为这个3个台站属于基岩台站,本质上不具备土层非线性反应。

3 非线性反应指标分析

除强震动时土层场地卓越频率向低频移动的非线性反应特征外,Noguchi and Sasatani^[18]定义了参数DNL(Degree of nonlinearity)来体现土层的非线性程度,见公式(1)。Régnier^[17]定义参数PNL(Percentage of nonlinearity)来表征场地发生非线性的百分比,见公式(2)。因DNL参数计算时未考虑HVS曲线多次地震平均产生的标准差,任叶飞^[19]提出ADNL(Absolute degree of nonlinearity)参数来改进,见公式(3)。DNL、PNL和ADNL在前人的研究结果中都很好地表征场地的非线性反应特征。

$$DNL = \sum_{i=N_1}^{N_2} \left| \log \left[\frac{R_{\text{strong}}(i)}{R_{\text{weak}}(i)} \right] \right| \cdot (f_{i+1} - f_i) \quad (1)$$

$$PNL = A_2 / A_1$$

$$A_1 = \sum_{i=N_1}^{N_2} R_{\text{weak}}(i) \cdot [\log(f_{i+1}) - \log(f_i)] \quad \delta(i) = \begin{cases} R_{\text{strong}}(i) - R_{\text{weak}}^+(i) & R_{\text{strong}}(i) \geq R_{\text{weak}}^+(i) \\ R_{\text{weak}}^-(i) - R_{\text{strong}}(i) & R_{\text{strong}}(i) \leq R_{\text{weak}}^-(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$A_2 = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(i) \cdot [\log(f_{i+1}) - \log(f_i)]$$

$$ADNL = \sum_{i=N_1}^{N_2} \Delta(i) \cdot [\log(f_{i+1}) - \log(f_i)] \quad \Delta(i) = \begin{cases} \log(R_{\text{strong}}(i)) - \log(R_{\text{weak}}^+(i)) & R_{\text{strong}}(i) \geq R_{\text{weak}}^+(i) \\ \log(R_{\text{weak}}^-(i)) - \log(R_{\text{strong}}(i)) & R_{\text{strong}}(i) \leq R_{\text{weak}}^-(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

公式(1),(2)和(3)中 $R_{\text{strong}}(i)$ 和 $R_{\text{weak}}(i)$ 分别代表在强震和弱震下频率点 f_i 处H/V谱比幅值,和分别代表0.1 Hz和20 Hz处频率指针。 R_{weak}^+ 和 R_{weak}^- 表示平均HVS平均曲线加减频率点 f_i 处1倍标准差。DNL代表强弱震作用下场地谱比曲线与坐标轴围城的面积差,而ADNL则表示强震谱比曲线与弱震标准差曲线所围面积,PNL指ADNL与平均谱比曲线与横坐标轴所围面积的比值。按上述公式分别计算8个台站的DNL、ADNL和PNL指标,计算结果如表3所示。根据任叶飞(2017)对汶川地震主余震33个台站的非线性反应分析统计结果,DNL ≥ 4 、ADNL ≥ 0.2 和PNL $\geq 7\%$ 时场地会呈现非线性反应。

本文计算结果中YMT004、NIG006、YMT003和NIGH02四个台站DNL值在4以上,其中3个台站的ADNL大于0.3,而NIGH02的ADNL和PNL值均较低,结合前面频率迁移分析就结果,可认为YMT004、NIG006和YMT003个台站发生了强的非线性,NIGH02非线性反应较弱。对土层台站而言,

DNL和PNL有随着PGA值增加而增大的趋势,说明非线性程度随地震动强度变大而更为明显。台站YMT005为无覆盖层的基岩台站,YMT014和YMTH13可近似认为基岩台站,其非线性反应指标参数值均较低,故认为未发生非线性反应。

4 结论和讨论

本文用日本山形县Mw6.7级地震中8个台站的主震和约20次余震加速度记录,采用谱比法,基于频率迁移、DNL、ADNL和PNL等指标对台站发生非线性反应进行分析和识别,得到主要以下结论:

(1)用H/V谱比法分别计算主震谱比曲线和余震平均谱比曲线,结果显示发生非线性反应的台站其卓越频率在强震作用下出现了向低频偏移的现象。

(2)对于发生非线性反应的台站,DNL和ADNL非线性的参数指标与峰值加速度PGA之间存在显著的相关性,体现了强震动作用下场地反应的

显著变化。 $DNL \geq 4$ 和 $ADNL \geq 0.2$ 阈值设定能较好的对应场地非线性, PNL 参数在 8 个台站中的对应关系尚不明显。

(3)YMT005、YMT014 和 YMTH13 三个台站因

可近似为基岩台站, 不呈现非线性反应, NIG012 台站因震中距较远非线性水平亦不明显, 其他 4 个台站均出现了不同程度的非线性反应特征。

表 3 山形地震强震动台站非线性反应 DNL、ADNL 和 PNL 参数指标
Table 3 Non-linear response parameter indexes DNL, ADNL and PNL of strong motion stations in Yamagata earthquake

台站编码	水平向 PGA/(cm · s ⁻²)	DNL	ADNL	PNL	非线性程度
YMT004	852	5.10	0.35	0.08	强
NIG006	315	4.51	0.34	0.05	强
YMTH13	336	2.97	0.08	0.05	无
YMT003	283	4.98	0.31	0.60	强
NIGH02	249	4.14	0.03	0.06	弱
YMT005	394	2.53	0.13	0.29	无
YMT014	300	1.61	0.05	0.05	无
NIG012	240	1.89	0.15	0.06	无

由于此次地震的余震记录不够丰富, 尚不能分不同的峰值加速度区间进行谱比法的非线性反应分析, 故对于地震中能发生非线性反应的震动阈值无法给予定量的评价。

参考文献

[1] Hardin B.O., Drnevich V.P.. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1972,98(7):667-692.

[2] Celebi M., Prince J., Dietel C., , at al. The culprit in Mexico City-amplification of motions[J]. Earthquake Spectra, 1987 (3):315-328.

[3] Campillo M., Gariel J.C., Aki K., et al. Destructive strong ground motion in Mexico city: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacan earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989, 79 (6): 1718-1735.

[4] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1):73-84.

[5] 王玉石, 李小俊, 兰日清, 等. 强震动作用下土体非线性动力特征研究发展与展望[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(3): 480-492.

[6] Trifunac M., Todorovska M. Nonlinear soil response - 1994 Northridge, California, earthquake[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(9):725-735.

[7] Pavlenko O. V., Irikura K.. Estimation of nonlinear time-dependent soil behavior in strong ground motion based on vertical array data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(12):2365-2379.

[8] Pavlenko O. V., Wen K. L. Estimation of nonlinear soil behavior during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(2):373-407.

[9] 梁建文, 何颖. 利用强震记录识别场地的总体非线性动力特性[J]. 振动工程学报, 2013, 26(4):506-515.

[10] 冀昆, 温瑞智, 任叶飞, 等. 芦山地震场地非线性反应特征分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34:333-338.

[11] 任叶飞. 基于强震动记录的汶川地震场地效应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.

[12] Mianshui Rong, Zhenming Wang, Edward W. Woolery, et al. Nonlinear site response from the strong ground-motion recordings in western China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016(82):99-110.

[13] Wen K L, Chang T M, Lin C M, et al. Identification of nonlinear site response using the *H/V* spectral ratio method [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, 2006, 17(3):533-546.

[14] Zhao J X, Irikura K, Zhang J, et al. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using *H/V* response ratio[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3) :914-925.

[15] Nakamura, Y. A Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Quarterly Report of Railway Technical Institute (RTRI), 1989(30):25-33.

[16] Lermo J, Chavez-Garcia F. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1993, 83(5):1574-1594.

[17] Regnier J, Cadet H, Bonilla LF, , at al. Assessing nonlinear behavior of soils in seismic site response: statistical analysis on KiK-net strong-motion data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013(03):1750-1770.

[18] Noguchi S, Sasatani T. Quantification of degree of nonlinear site response[C]//14th world conference on earthquake engineering, Beijing: publisher unknown, 2008.

[19] Yefei Ren, Ruizhi Wen, Xinxin Yao, at al. Five parameters for the evaluation of the soil nonlinearity during the *Ms*8.0 Wenchuan Earthquake using the HVSR method[J]. Earth, Planets and Space, 2017(69):116.