

基于 *HVSR* 谱比法研究场地反应非线性特征^{*}

罗桂纯^{1,2}, 李小军^{2,3}, 傅磊², 王玉石²

(1. 北京市地震局, 北京 100080; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 针对汶川地震近断层的众多量大面广的Ⅱ类场地, 选用理县木卡台作为研究对象, 采用主震、余震和地脉动记录, 基于傅里叶谱 *HVSR* 谱比和速度反应谱 *HVSR* 谱比结果, 研究场地反应的非线性特征。结果表明: 主震、余震、地脉动的速度反应谱 *HVSR* 谱比曲线平滑, 峰值突出, 清楚地给出了场地的卓越频率; 场地地震反应随着 *PGA* 的变化出现明显的非线性反应, 随着 *PGA* 的增大, 小于 100 gal 余震、100 ~ 200 gal 余震、200 ~ 300 gal 余震以及主震的记录中场地卓越频率有向低频偏移的趋势。

关键词: 傅里叶谱; 速度反应谱; *HVSR* 谱比法; 场地反应; 卓越频率; 非线性特征

中图分类号: P315.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0546-09

0 引言

场地条件影响地震动特性, 从而直接影响地震灾害的严重程度(胡聿贤等, 1980, 2006; 李焯芬, 1996; 周锡元等, 1990; 罗桂纯, 2016)。不同场地条件对地震动的影响以及地震动对建筑结构的影响不同(李小军等, 2001; 陈棋福等, 2008; 罗桂纯等, 2011), 从根本上来说, 这种差异是由场地反应引起的。场地反应的影响, 不但在纵向和横向上表现出不均匀性, 在力学性质上也表现出不连续性和非线性等特征。2008年汶川8.0级地震, 断层距220 km的自贡地震影响台阵, 台阵中相距仅为50 m的0514Z0台(土层台)与0514Z1台(基岩台)加速度时程的幅值、傅里叶谱和加速度反应谱均存在明显的差异(卢滔等, 2006; 王海云, 谢礼立, 2010; 杨宇等, 2011; 唐晖等, 2012; 王玉石等, 2013, 2016)。

Hardin和Drnevich(1972)研究表明, 地震动增大时, 场地放大程度降低, 共振频率向低频移动, 表现为非线性。Seed和Idross(1982)认为当*PGA*地震动峰值加速度超过0.1 g时, 相对于岩石场地而言, 沉积层场地的*PGA*反而是小的。Chin和Aki(1991)和Aki(1993)通过对1989年美国

Loma Prieta地震的研究发现, 近场沉积层场地合成的*PGA*都大于观测值, 他们认为场地非线性反应的结果。随着*HVSR*谱比法的提出和推广, 该方法被广泛应用于场地特性研究。在之后1994年美国加州北岭地震(Northridge Earthquake)(Beresnev *et al.*, 1998a, b; Dimitriu, 2002; Field *et al.*, 1997, 1998a, b; Hartzell, 1998; Su *et al.*, 1998; Trifunac, Todorovska, 1996, 1998), 1995年的日本阪神地震(Aguirre, Irikura, 1997; Pavlenko, Irikura, 2002), 1999年中国台湾集集地震(Bernardie *et al.*, 2006; Pavlenko, Loh, 2005; Pavlenko, Wen, 2008), 更是验证了沉积层在强地面运动作用下发生非线性反应的可能。Dimitriu等(1999, 2000)利用希腊强震动台网在17次中等地震中观测到的强震动记录, 研究了*HVSR*谱比法评估场地非线性反应的适用性, 认为受非线性反应影响, 场地卓越频率与*PGA*、*PGV*存在很好的负相关, 相关系数为0.7~0.8。姚鑫鑫(2017)利用*HVSR*谱比法, 计算了汶川地震不同强余震*PGA*分档中场地非线性反应识别参数*R_f*和*DNL*, 分析场地发生非线性的*PGA*阈值。刘宇实和师黎静(2018)通过37个场地的地脉动单点三分量观测, 研究了*HVSR*谱比的卓越频率与覆盖层厚度、等效剪切波速等场地特征参数之间的相关性。李红光

^{*} 收稿日期: 2019-07-30.

基金项目: 大中城市地震灾害情景构建重点专项(2016QJGJ01、2018QJGJ04)资助.

和冷崴（2019）使用滇西南地区的强震动记录，研究了 HVSR 谱比法处理强震数据时的主要影响因素。2011 年新西兰 Christchurch 地震（Wen *et al.*, 2011），2011 年日本 Tohoku 地震（Bonilla *et al.*, 2011）、2013 年芦山地震（冀昆，2014）等都有利用 HVSR 谱比法得出场地非线性反应的证据。

上述研究都是针对不同地震作用下场地非线性特征进行分析，还没有开展利用 HVSR 方法开展主震、余震和地脉动记录的系统分析。本文针对汶川地震近断层中主要的 II 类场地台站，选用主震记录大于 300 gal、余震次数记录最多的理县木卡台作为研究对象，采用 2008 年汶川地震的主震、余震和地脉动记录，基于傅里叶谱 HVSR 谱比和速度反应谱 HVSR 谱比法，研究场地反应的非线性特征。

1 数据筛选

1.1 台站筛选

汶川地震发生时，国家数字强震台网有 450 个台站（其中包括 402 个固定自由场地台站、1 个地形影响台阵和 2 个结构台阵）的强震仪被触发，获得了大量较完整的强震动加速度记录，如卢寿德和李小军（2009）获取的汶川 8.0 级地震未校正加速度记录（中国强震记录汇报），李小军

（2009）获取的汶川 8.0 级地震余震固定台站观测未校正加速度记录。其中布设在龙门山断裂带及其周围地区的 50 多个台站获得了大于 100 gal 的加速度记录。

在四川省近断层台站中，场地土层主要是杂填土和风化岩，台站场址都选择在龙门山断裂带附近，场地类型以 II 类场地为主，台站的基本情况如表 1 所示。有 8 个台站的主震 PGA（UD 分量）超过了 300 gal，其中，记录到余震次数超过 100 次的台站只有茂县南新台、理县桃平台和理县木卡台。其中理县木卡台最多，达 154 次，5.0 级以上余震多达 29 次。因此，本文选用理县木卡台作为研究对象。

1.2 数据筛选

理县木卡台的主震 PGA 是 357.8 gal，余震记录多达 154 次，且 $PGA > 100$ gal 的余震事件有 4 次，其中还有一次余震事件的 $PGA > 200$ gal。虽然总体上 $PGA < 100$ gal 的余震居多，但是 100 gal，200 gal 以及 300 gal 以上的记录都有，这为本文分析在不同强度地震动作用下的场地地震反应提供了非常好的基础资料。

选用汶川地震余震事件前理县木卡台的地脉动记录作为研究对象。余震可能发生在一天中的任何时段，由于白天人类活动频繁、夜间人类活动平静，对地脉动的影

表 1 近断层 15 个 II 类场地台站基本情况

Tab. 1 Basic information of the 15 II near-fault stations

台站名称	EW 分量 PGA/gal	NS 分量 PGA/gal	UD 分量 PGA/gal	覆盖土层厚度/m	等效剪切波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
绵竹清平	-824.3	802.5	622.9	9.1	339
汶川卧龙	957.4	655.8	948.1	15.88	295
什邡八角	-548.9	-585.7	632.9	12	323
安县塔水	-289.3	203.4	179.9	9.9	191
茂县南新	-421.1	349.4	-352.5	>22	359
茂县叠溪	246.6	-206.5	-143.9	>22	241
江油地震台	-511.8	458.8	-198.2	8.4	336
江油含增	-519.3	-350.1	-444.3	17.5	237
江油重华	296.8	281.4	-180.5	5.7	355
理县桃平	339.6	342.1	379.6	12.6	231
理县木卡	321.5	-283.9	357.8	>20	261
平武木座	273.8	287.4	177.4	19	392
德阳白马	-126.5	-136.3	88.9	12	232
大庖银屏	-135.1	-127.6	82.7	>20	310
邛崃油榨	-173.8	-199.8	55.1	6.1	216

响非常大, 同一个台站不同时段的地脉动记录数值差别可达几倍。为了截取出合理的地脉动数据, 本文采用统一的标准进行筛选。以每个余震记录事前 20.48 s 作为截取范围, 如果前 5 s 的 PGA (简称 $A5$) 大于 0.5 gal, 直接弃用此数据, 如果 $A5$ 小于 0.5 gal, 截取 20.48 s 内大于 3 倍 $A5$ 之前的所有数据, 作为地脉动记录分析的对象。并且要求 3 个分量都能截取到数据, 如果缺少任何一个分量, 弃用该数据。

2 研究方法

2.1 傅里叶谱和速度反应谱的对比

传统的 $HVSR$ 谱比法, 都是采用傅里叶谱进行比值。傅里叶幅值谱与速度反应谱的关系如下文所述 (袁一凡, 田启文, 2012)。

在单自由度线性振子中, 若忽略阻尼 (即令 $\lambda = 0$), 反应位移 $u(t)$ 和速度 $\dot{u}(t)$ 表示为:

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_0} \int_0^t a(\tau) \sin \omega_0(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

$$\dot{u}(t) = -\int_0^t a(\tau) \cos \omega_0(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 为位移; $\dot{u}(t)$ 为速度; $a(t)$ 为地震动时程; t 为时间; λ 为阻尼比; ω_0 为自振圆频率; τ 为延迟时间。

该振子中的总能量, 即动能和应变能之和为:

$$E = \frac{1}{2} m \dot{u}^2 + \frac{1}{2} k u^2 \quad (3)$$

式中: E 为总能量; m 为质量; k 是弹性系数。

将式 (1) 和 (2) 代入式 (3), 并经一定代数处理之后, 总能量可以写成如下形式:

$$E(t, \omega_0) = \frac{1}{2} m \left[\left(\int_0^t a(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau \right)^2 + \left(\int_0^t a(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau \right)^2 \right] \quad (4)$$

取能量的 2 倍, 除以质量 m , 再取平方根得:

$$\sqrt{\frac{2E(t, \omega)}{m}} = \left[\left(\int_0^t a(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau \right)^2 + \left(\int_0^t a(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

如果 $a(\tau)$ 的持续时间区间是从 $[0, t_1]$, 则在时刻 t_1 , 地震动时程 $a(t)$ 的傅里叶幅值谱 $|A(\omega_0)|$ 可表示为:

$$|A(\omega_0)| = \sqrt{\frac{(2E(t_1, \omega_0))}{m}} = \left[\left(\int_0^{t_1} a(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau \right)^2 + \left(\int_0^{t_1} a(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式 (6) 表明, 傅里叶幅值谱可以度量振子的最终能量, 它是振子卓越周期的函数。反应谱曲线上的峰值表明在与这些峰值相对应的周期有比较大的能量输入到这个振子体系。既然傅里叶谱是扰动终了时刻能量的一种度量, 那么, 最大能量似乎发生在 $t_m < t_1$ 的某个时刻。从工程观点看, 最大能量 $E(t_m, \omega_0)$ 比扰动终了时刻的能量更为重要。按照式 (4) 将对应最大能量的时刻 t_m 的值标出来, 就能计算出能量的最大值 $E(t_m, \omega_0)$, 将此作为周期的函数绘成曲线, 叫作能量反应谱。这时, $\sqrt{2E(t_m, \omega_0)/m}$ 所表示的正是该振子的最大速度, 即速度反应谱:

$$\sqrt{2E(t_m, \omega_0)/m} = \left| \dot{u}(t) \right|_{\max} = \left| \int_0^{t_m} a(\tau) \cos \omega_0(t - \tau) d\tau \right|_{\max} = \left[\left(\int_0^{t_m} a(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau \right)^2 + \left(\int_0^{t_m} a(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

亦即:

$$S_v(0, \omega_0) = \left\{ \left[\int_0^{t_m} a(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau \right]^2 + \left[\int_0^{t_m} a(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

式中: S_v 为速度反应谱。

从式 (6) 和式 (8) 不难看出, 地震动时程 $a(t)$ 的傅里叶谱和零阻尼的速度反应谱都是振子体系的能量的某种度量, 傅里叶谱度量振子在扰动终了时刻的能量, 而速度反应谱度量振子所具有的最大能量, 显然有:

$$|A(\omega_0)| \leq S_v(0, \omega_0) \quad (9)$$

从式 (9) 可以看出傅里叶谱曲线总是包含在速度反应谱曲线之内, 从式 (6) 和 (8) 可以得出, 两者的谱值曲线形状也会非常相似。

2.2 傅里叶谱和速度反应谱的优化

傅里叶谱的缺点是毛刺太多，不能一目了然地识别出卓越频率和放大倍数。因此，本文采用 konno - ohmachi 的滤波器做平滑：

$$W_B(f, f_c) = \left[\sin(\ln(f/f_c)^b / \ln(f/f_c)^b) \right]^4 \quad (10)$$

式中： f_c 是中心频率； b 是带宽； f 是频率。其平滑效果如图 1 所示。

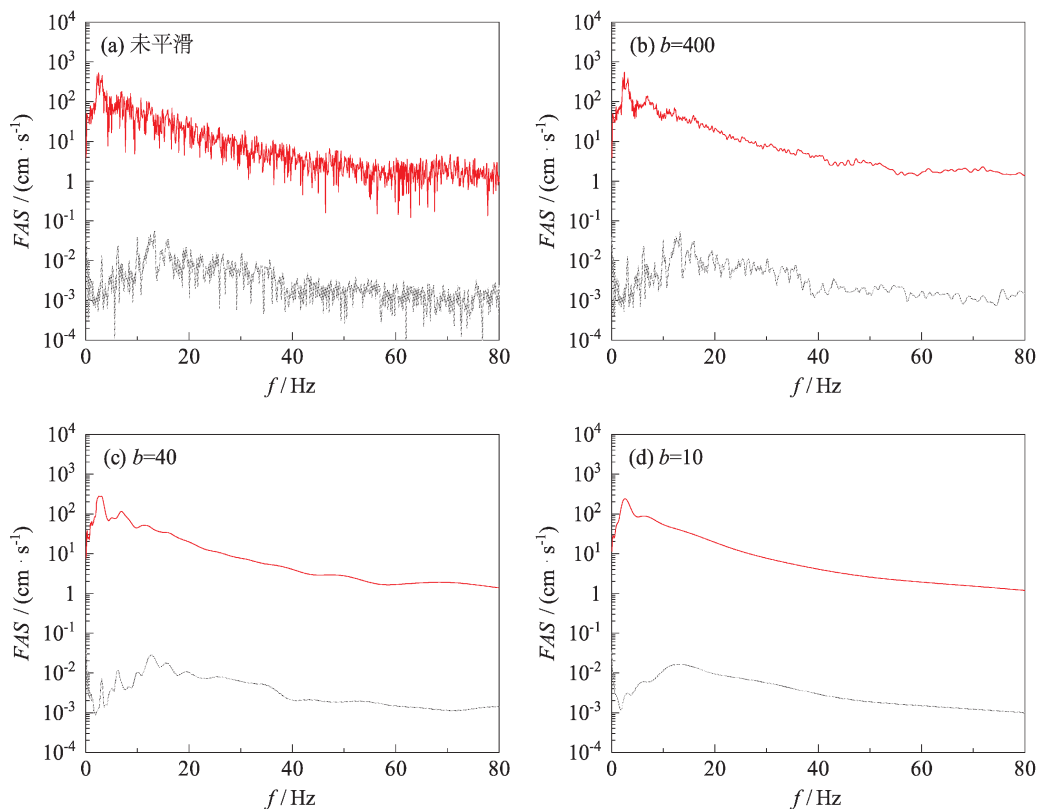


图 1 不同 b 值的傅里叶谱的平滑效果图

Fig. 1 Smoothing effect of Fourier spectrums based on different b values

由图 1 可见，平滑的程度主要由 b 值决定。经过多次的试验和比对，当 $b = 160$ 的时候的平滑效果最佳，既能有效的去除毛刺，又能保证误差在合理的范围之内。因此，最终决定采用 $b = 160$ 的平滑器进行平滑，效果如图 2 所示。

以往研究表明，速度反应谱取 5% 阻尼比可以起到平滑作用，计算结果能较好地识别场地卓越周期，稳定的体现场地特征（冀昆，2014）。

根据日本抗震设计规范和美国 NEHPR 规范中的场地分类（Japan Road Aociation, 1980），结合 Zhao 等（2006）给出的 4 类场地的平均 HVSR 曲线和我国的主要场地分类方法（薄景山等，2004），可以得到各类场地的卓越频率主要在 0.05 Hz 以上。

综上所述，本文采用截止频率为 0.05 Hz 的巴特沃斯高通滤波器，并采用 $b = 160$ 平滑器的傅里

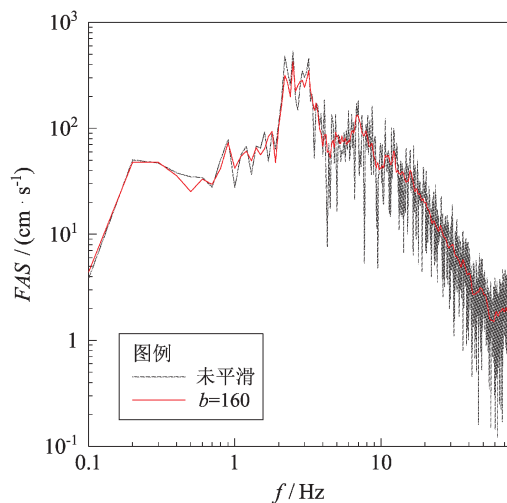


图 2 未平滑和 $b = 160$ 的傅里叶谱的平滑效果对比图

Fig. 2 Comparison of effect drawing of no smoothing and smoothing Fourier spectrum when $b = 160$

叶 *HVSR* 谱比和 5% 阻尼比的速度反应谱 *HVSR* 谱比, 对主震、余震和地脉动记录进行处理和分析。

3 数据处理

3.1 主震数据处理结果对比

首先对理县木卡台的主震记录进行处理, 得到该台汶川主震的傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果, 谱比曲线的峰值位置就是场地的卓越频率, 峰值就是场地的放大倍数。因此, 可以得到理县木卡台在主震作用下场地的卓越频率为 2.52 Hz, 场地放大倍数为 18.15, 如图 3 所示。

通过平滑和滤波器处理的傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果仍然有较多突出的毛刺, 低频影响比较明显。虽然此方法简单易行, 但是准确率却不高。为了更加合理地分析场地效应, 笔者基于速度反应谱 *HVSR* 谱比法对主震记录进行处理, 得到场地的卓越频率为 2.37 Hz, 场地放大倍数为 10.07。将傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果 (*FAS*) 和速度反应谱 *HVSR* 谱比结果 (*PSV*) 叠加进行对比, 如图 3 所示。

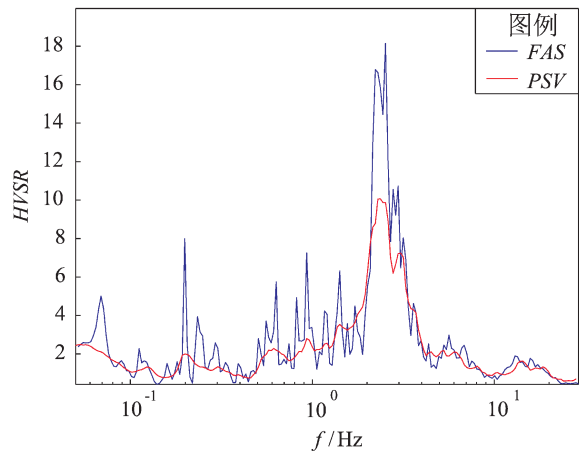


图3 主震的傅里叶谱 *HVSR* 谱比和速度反应谱 *HVSR* 谱比

Fig.3 *HVSR* ratio of Fourier spectrum and velocity response spectrum of mainshock

从图 3 可以看出, 速度反应谱 *HVSR* 谱比曲线, 有效地去除了 1 Hz 以下的低频成分, 去除了不合理的干扰; 曲线干净平滑, 毛刺减少, 卓越频率更加突出。2 种谱比结果得到的场地卓越频率非常接近, 但是放大倍数却相差甚多。基于以往有关于 *HVSR* 方法有效性的研究 (罗桂纯等, 2014) 分析认为: *HVSR* 谱比法能有效地得到场地

的卓越频率, 但是放大倍数只是一个相对值, 不能真实表示场地的放大效果。

3.2 余震数据处理结果对比

表 2 为理县木卡台强震动记录的 *PGA* 统计情况。首先, 对每个台站的地震记录按照 *PGA* 为 100 gal, 200 gal, 300 gal 的临界值进行分组。首先对每一个余震记录进行傅里叶谱 *HVSR* 谱比分析, 由于单一一次余震事件没有代表性, 本文根据分组, 再对 *PGA* 小于 100 gal, 100 gal ≤ *PGA* ≤ 200 gal, 200 gal < *PGA* ≤ 300 gal (其中理县木卡地震台只有主震 *PGA* 大于 300 gal) 都分别叠加取均值, 研究场地非线性反应。

表 2 理县木卡台强震动记录加速度峰值统计表

Tab.2 Statistical table of strong motion *PGA* from Lixianmuka station

地震事件	EW 分量 <i>PGA</i> /gal	NS 分量 <i>PGA</i> /gal	UD 分量 <i>PGA</i> /gal	次数
主震	321.5	-283.9	357.8	1
余震 (<i>PGA</i> ≥ 100 gal)	141	-137	96	4
	216	188	192	
	129	-128	85	
	-101	53	52	
余震 (<i>PGA</i> < 100 gal)	< 100	< 100	< 100	150

图 4a 是理县木卡台余震的均值傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果, 从图中可以得到, 不同分档值 *PGA* 的余震, 其场地效应影响最明显都集中在 2 ~ 3 Hz; *PGA* < 100 gal 的余震的 *HVSR* 谱比峰值的卓越频率是 2.96 Hz, 放大倍数是 20.95; *PGA* 为 100 ~ 200 gal 的余震的 *HVSR* 谱比峰值的卓越频率是 2.87 Hz, 放大倍数是 19.62; *PGA* > 200 gal 的余震的 *HVSR* 谱比峰值的卓越频率是 2.78 Hz, 放大倍数是 22.25。理县木卡台的土层厚度大于 20 m, 主震 *PGA* 为 357.8 gal, 由主震的傅里叶谱 *HVSR* 谱比得到的卓越频率是 2.52 Hz, 放大倍数为 18.15。本文同时计算了 154 次余震的傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果, 限于篇幅, 不做详细展示。从所有的计算结果可以得到: 不论是单个余震事件还是 *PGA* 分组均值的结果, 场地卓越频率均随着 *PGA* 的增大有向低频偏移的趋势; 而放大倍数不随着 *PGA* 的增大而单一地增加或减小; 场地放大倍数在不同频段表现出的非线性反应特征也不一样。

图 4b 是理县木卡台的均值速度反应谱 *HVSR*

谱比结果。不同分档值 PGA 的余震，其场地效应影响最明显的是 $2 \sim 3$ Hz。 $PGA < 100$ gal 的余震的 $HVSR$ 谱比峰值的频率是 2.87 Hz，放大倍数是 9.48 ； PGA 为 $100 \sim 200$ gal 的余震的 $HVSR$ 谱比峰值的频率是 2.61 Hz，放大倍数是 10.97 ； $PGA >$

200 gal 的余震的 $HVSR$ 比峰值的频率是 2.45 Hz，放大倍数是 11.86 。由此可见：随着 PGA 的增大场地卓越频率有向低频偏移的趋势；随着 PGA 的增大放大倍数增大；非线性反应特征在不同频段的影响是明显不一样。

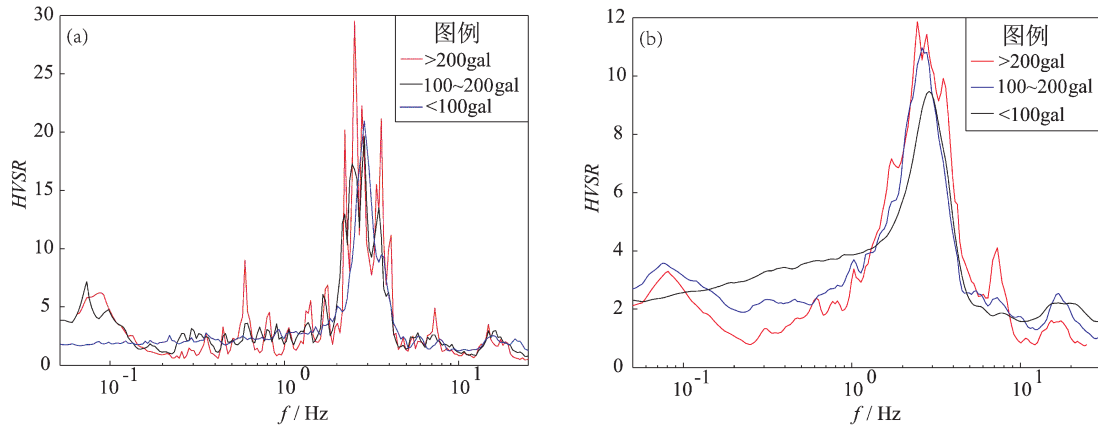


图4 余震的傅里叶谱 $HVSR$ 谱比 (a) 和速度反应谱 $HVSR$ 谱比 (b) 结果

Fig. 4 $HVSR$ ratio of Fourier spectrum (a) and velocity response spectrum (b) from aftershock

3.3 地脉动数据处理结果对比

根据本文的地脉动筛选规则，理县木卡台共截取到 83 条地脉动记录，对截取好的地脉动记录进行傅里叶谱 $HVSR$ 谱比计算，并将 83 次计算结果进行叠加平均。将叠加平均后的地脉动傅里叶谱 $HVSR$ 谱比结果和主震的傅里叶谱 $HVSR$ 谱比结果进行对比，如图 5 所示。

从图 5a 中可以看到，地脉动傅里叶谱 $HVSR$ 谱比结果能有效地辨别场地的卓越频率，主震傅里叶谱 $HVSR$ 谱比计算结果中场地卓越频率向低频偏移。地脉动数据的质量对计算结果有很大的影

响，因此，要尽量要采集到高质量的地脉动信号进行场地效应的分析。

同样，将叠加平均后的地脉动速度反应谱 $HVSR$ 谱比结果和主震的速度反应谱 $HVSR$ 谱比结果进行对比，如图 5b 所示。

由图 5b 可见，主震速度反应谱 $HVSR$ 谱比结果峰值突出，没有明显的毛刺。地脉动的速度反应谱 $HVSR$ 谱比得到的场地卓越频率低于主震的速度反应谱 $HVSR$ 谱比，这与前面得到的结论不一致，其原因将在后续的研究中将进行更深入的分析 and 讨论。

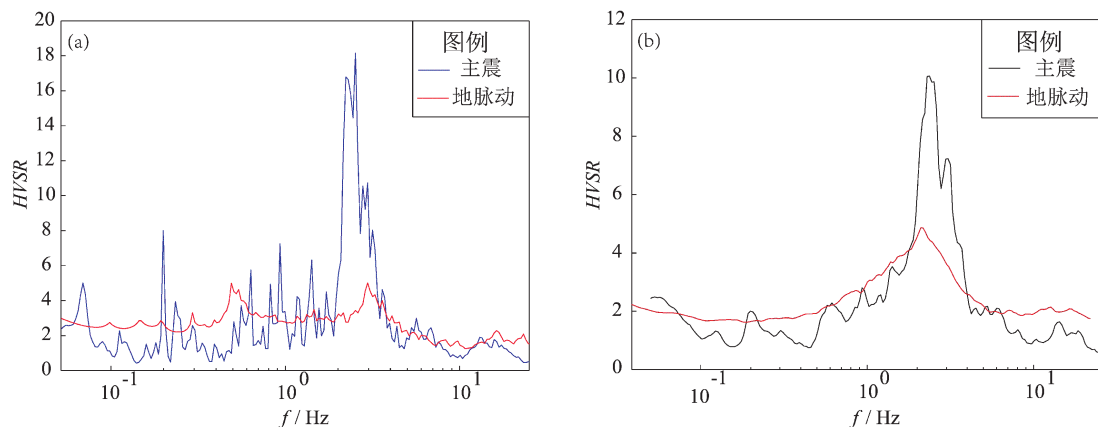


图5 地脉动和主震的傅里叶谱 $HVSR$ 谱比 (a) 和速度反应谱 $HVSR$ 谱比 (b) 结果

Fig. 5 $HVSR$ ratio of Fourier spectrum (a) and velocity response spectrum (b) from microtremors and mainshock

3.4 综合对比分析

抗震设计规范中对于不同场地地震动的放大效应考虑了其非线性反应的影响,当地震动强度达到一定水平时,调整场地影响系数以减小场地放大效应。为了便于对比分析和讨论,本文将理县木卡台的主震、余震、地脉动记录的计算结果叠加在一起进行对比(图6)。

图6a中主震、余震、地脉动的傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果清楚地给出了场地的卓越频率,地脉动和小于 100 gal 的余震的傅里叶谱 *HVSR* 谱比得到的场地卓越频率也非常一致,都是 2.96 Hz。*PGA* 为 100 ~ 200 gal 的余震,场地的非线性反应不明

显,但是主要频率已经扩宽,低频开始发育。*PGA* 为 200 ~ 300 gal 的余震,其卓越频率有向低频偏移的趋势。主震的 *PGA* > 300 gal,从谱比曲线看到,场地非线性效应对频率的影响非常明显,场地在主震下的卓越频率明显向低频偏移。放大倍数随 *PGA* 的变化并没有明显规律。

从图6b中可以发现,主震、余震、地脉动的速度反应谱 *HVSR* 谱比曲线平滑,峰值突出,清楚地给出了场地的卓越频率。随着 *PGA* 的增大,小于 100 gal 余震、100 ~ 200 gal 余震、200 ~ 300 gal 余震以及主震的场地卓越频率有向低频偏移的趋势。场地放大倍数随 *PGA* 的变化并没有明显规律。

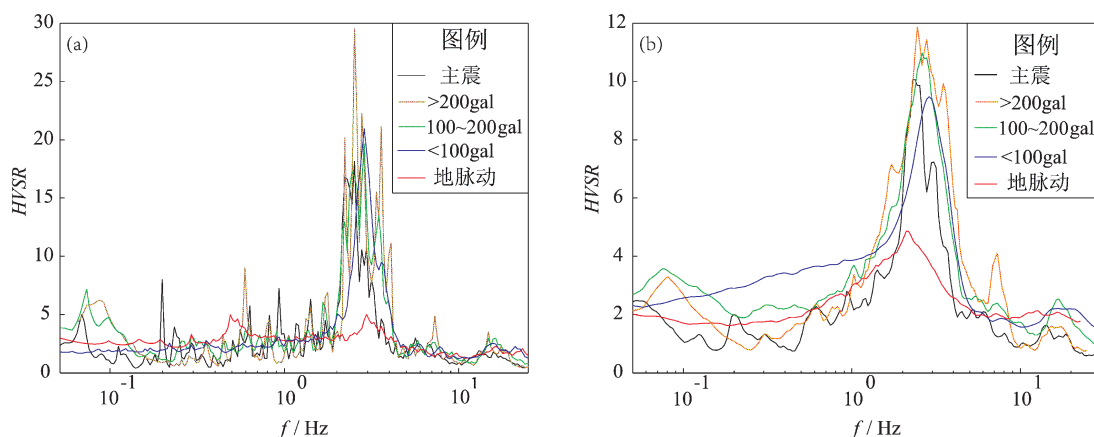


图6 主震、余震、地脉动的傅里叶谱 *HVSR* 谱比 (a) 和速度反应谱 *HVSR* 谱比 (b) 结果

Fig. 6 *HVSR* ratio of Fourier spectrum (a) and velocity response spectrum (b)

from mainshock, aftershock and microtremors

4 结论

本文以理县木卡台作为研究对象,采用 2008 年汶川地震的主震、余震、地脉动记录,对速度反应谱 *HVSR* 谱比和傅里叶谱 *HVSR* 谱比结果进行对比,研究场地反应的非线性特征,得到的主要结论如下:

(1) 传统的傅里叶谱 *HVSR* 谱比方法虽然简单易行,但如果不加平滑会导致毛刺太多,平滑之后又会带来误差。

(2) 速度反应谱在 5% 的阻尼比的作用下,有效地平滑了反应谱曲线、去除了低频成分、去除了不合理的干扰,卓越频率更加突出和容易辨认。

(3) 主震、余震、地脉动记录的速度反应谱 *HVSR* 谱比,曲线平滑、峰值突出,清楚地给出了

场地的卓越频率。随着 *PGA* 的增大,小于 100 gal 余震、100 ~ 200 gal 余震、200 ~ 300 gal 余震以及主震的场地卓越频率有向低频偏移的趋势。

(4) *HVSR* 谱比法能有效地得到场地的卓越频率,但是放大倍数只是一个相对值,不能真实地反映场地的放大效果。

参考文献:

- 薄景山,翟庆生,吴兆英,等. 2004. 基于土层结构的场地分类方法[J]. 地震工程与工程振动, 24(4): 46-49.
- 陈棋福,刘澜波,王伟军,等. 2008. 利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应[J]. 科学通报, 53(18): 2229-2235.
- 胡聿贤,孙平善,章在塘,等. 1980. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程震动, 1(试刊): 34-41.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学(第二版)[M]. 北京:地震出版社.
- 冀昆. 2014. 基于 H/V 谱比法的场地特征分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 李焯芬. 1996. 场地地质对震害的影响[J]. 自然灾害学报, 5(1): 59-66.

- 李红光,冷崑. 2019. H/V 谱比方法在强震记录应用中几个影响因素的初步研究[J]. 地震工程学报, 41(1): 169–176.
- 李小军,彭青,刘文忠. 2001. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J]. 世界地震工程, 17(4): 34–41.
- 李小军. 2009. 汶川 8.0 级地震余震流动台站观测未校正加速度记录[M]. 北京:地震出版社.
- 刘宇实,师黎静. 2018. 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, 37(12): 235–242.
- 卢寿德,李小军. 2008. 汶川 8.0 级地震未校正加速度记录(中国强震记录汇报)[M]. 北京:地震出版社.
- 卢滔,周正华,周雍年,等. 2006. 关于 Nakamura 方法有效性的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 26(1): 43–48.
- 罗桂纯,李小军,王玉石,等. 2014. 关于中村(Nakamura)方法分析结构响应有效性的讨论[J]. 地震学报, 36(3): 491–499.
- 罗桂纯,刘澜波,齐诚,等. 2011. 基于地脉动和地铁振动的钢筋混凝土建筑结构响应分析[J]. 地球物理学报, 54(10): 2708–2715.
- 罗桂纯. 2016. 基于强震动观测的场地效应非线性特性研究[J]. 国际地震动态, (1): 46–48.
- 唐晖,李小军,李亚琦. 2012. 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. 振动与冲击, 31(8): 74–79.
- 王海云,谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 53(7): 1631–1638.
- 王玉石,李小军,兰日清,等. 2016. 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, 11(3): 480–492.
- 王玉石,李小军,周正华. 2013. 川滇地区水平向强地震动衰减关系研究[J]. 地震学报, 35(2): 238–249.
- 魏勇,崔建文,王秋良,等. 2018. 基于合成地震动的 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震场地效应分析[J]. 地震研究, 41(1): 32–37.
- 杨宇,李小军,贺秋梅. 2011. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. 震灾防御技术, 6(4): 436–447.
- 姚鑫鑫. 2017. 利用强震动记录的谱比分析场地非线性反应[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 袁一凡,田启文. 2012. 工程地震学[M]. 北京:地震出版社.
- 周锡元,王广军,苏经宇,等. 1990. 场地·地基·设计地震[M]. 北京:地震出版社.
- Aguirre J, Irikura K. 1997. Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 87(5): 1244–1258.
- Aki K. 1993. Local site effects on weak and strong ground motion[J]. Tectonophysics, 218(1–3): 93–111.
- Beresnev I A, Atkinson G M, Johnson P A, et al. 1998a. Stochastic Finite-fault Modeling of Ground Motions from the 1994 Northridge, California, Earthquake. II. Widespread Nonlinear Response at Soil Sites[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(6): 1402–1410.
- Beresnev I A, Field E H, Abeele K V D, et al. 1998b. Magnitude of Nonlinear Sediment Response in Los Angeles Basin during the 1994 Northridge, California, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(4): 1079–1084.
- Bernardie S, Foerster E, Modaresi H. 2006. Non-linear site response simulations in Chang-Hwa region during the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26(11): 1038–1048.
- Bonilla L F, Tsuda K, Pulido N, et al. 2011. Nonlinear site response evidence of K-NET and KiK-net records from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake[J]. Earth Planets Space, 63(7): 785–789.
- Chin B H, Aki K. 1991. Simultaneous study of the source, path, and site effects on strong ground motion during the 1989 Loma Prieta earthquake: A preliminary result on pervasive nonlinear site effects[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 81(5): 1859–1884.
- Dimitriu P, Kalogeras I, Theodulidis N. 1999. Evidence of nonlinear site response in horizontal-to-vertical spectral ratio from near-field earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18(6): 423–435.
- Dimitriu P, Theodulidis N, Bard P Y. 2000. Evidence of nonlinear site response in *HVSR* from SMART1 (Taiwan) data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20(1–4): 155–165.
- Dimitriu P. 2002. The *HVSR* technique reveals pervasive nonlinear sediment response during the 1994 Northridge earthquake ($M_w6.7$) [J]. Journal of Seismology, 6(2): 247–255.
- Field E H, Johnson P A, Beresnev I A, et al. 1997. Nonlinear ground-motion amplification by sediments during the 1994 Northridge earthquake[J]. Nature, 390: 599–602.
- Field E H, Kramer S, Elgamal A W, et al. 1998a. Nonlinear site response: where we're at[J]. Seismological Research Letters, 69(3): 230–234.
- Field E H, Zeng Y H, Johnson P A, et al. 1998b. Nonlinear sediment response during the 1994 Northridge earthquake: Observations and finite source simulations[J]. Journal of Geophysical Research, 103(B11): 26869–26883.
- Hardin B O, Drnevich V P. 1972. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98(6): 603–624.
- Hartzell S. 1998. Variability in Nonlinear Sediment Response during the 1994 Northridge, California, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(6): 1426–1437.
- Japan Road Association. 1980. Specifications for Highway Bridges, Part V, Seismic Design[S].
- Pavlenko O, Irikura K. 2002. Nonlinearity in the response of soils in the 1995 Kobe earthquake in vertical components of records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9–12): 967–975.
- Pavlenko O, Loh C H. 2005. Nonlinear identification of the soil response at Dahan downhole array site during the 1999 Chi-Chi earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(3): 241–250.
- Pavlenko O, Wen K L. 2008. Estimation of nonlinear soil behavior during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake[J]. Pure and Applied Geophysics, 165(2): 373–407.
- Seed H B, Idriss I M. 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes[M]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Institute.

- Su F, Anderson J G, Zeng Y H. 1998. Study of Weak and Strong Ground Motion Including Nonlinearity from the Northridge, California, Earthquake Sequence[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(6): 1411 – 1425.
- Trifunac M D, Todorovska M I. 1996. Nonlinear soil response—1994 Northridge, California, Earthquake[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(9): 725 – 735.
- Trifunac M D, Todorovska M I. 1998. Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism—the 1994 Northridge, California, Earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 17(1): 41 – 51.
- Zhao J X, Irikura K, Zhang J. 2006. An Empirical Site – Classification Method for Strong – Motion Stations in Japan Using H/V Response Ratio[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3): 914 – 925.

Study on Nonlinearity of Site Effect with the *HVSR* Spectral Ratio

LUO Guichun^{1,2}, LI Xiaojun^{2,3}, FU Lei², Wang Yushi²

(1. *Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China*)

(2. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(3. *Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract

SC II stations do have an overall majority near the fault. We select the mainshock, aftershocks, and micro-tremors strong – motion observation data of the Wenchuan earthquake recorded by the Lixianmuka station. This paper calculates the *HVSR* spectral ratio of the Fourier amplitude spectrum and velocity response spectrum, and analyzes the nonlinearity of site effect. Research shows the predominant frequency from the *HVSR* spectral ratio of velocity response spectrum is much more prominent. The result shows that the site response appears obvious non-linearity when *PGA* in different scale. The predominant frequency of the site is gradually decreasing along with the *PGA* of >100 gal aftershocks, 100 – 200 gal aftershocks, 200 – 300 gal aftershocks, and the mainshock.

Keywords: Fourier spectrum; velocity response spectrum; *HVSR* spectral ratio; site effect; predominant frequency; nonlinearity