

运用广义反演法研究汶川地震场地效应

任叶飞¹ 温瑞智¹ 山中浩明² 鹿嶋俊英³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080;

2. 日本东京工业大学, 日本东京 226-8502; 3. 日本建筑研究所, 日本筑波 305-0802)

摘要: 选取从96个汶川地震余震中由28个强震动台站获取的602组强震动记录, 假设地表观测到的地震动由震源、路径和场地三项因素组成, 运用广义反演法(GIT)分离这三项因素, 获得这些台站的场地反应, 并与采用HVS方法获得的结果进行比较。结果表明: 两种方法获得的场地卓越频率具有较好的一致性, 但是对于1.0~5.0Hz、5.0~10.0Hz和1.0~10.0Hz频段内的平均场地放大, HVS方法获得的结果要普遍小于广义反演法。进一步说明了HVS方法可以合理精确地估计场地的卓越频率但却低估平均场地放大。最后统计这三个频段内的平均场地放大与台站上覆土层20m的平均剪切波速(V_{s20})间的函数关系, 结果表明两者之间存在较强的相关性。

关键词: 广义反演法; 汶川地震; 场地效应; HVS方法

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2013)S2-0146-06

Research on site effect of Wenchuan Earthquake by using generalized inversion technique

Ren Yefei¹ Wen Ruizhi¹ Hiroaki Yamanaka² Toshihide Kashima³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,

CEA, Harbin 150080, China; 2. Tokyo Institute of Technology, Tokyo 226-8502, Japan;

3. Building Research Institute, Tsukuba 305-0802, Japan)

Abstract: Total 602 recordings from 28 strong motion stations captured in 96 aftershocks of the Wenchuan Earthquake were selected and processed at first. It was assumed that the observed surface ground motion is comprised of three factors that are the source, path and site. The generalized inversion technique (GIT) was applied to separate these factors and then the site responses of these stations were obtained. Comparing them with the ones by the HVS method, it shows that the site predominant frequency from two methods have a good agreement, but for the average site amplification in the frequency bands of 1.0–5.0Hz, 5.0–10.0Hz and 1.0–10.0Hz, the results by HVS method are mostly smaller than the ones by GIT. It further illustrates that the HVS method can accurately evaluate the site predominant frequency but underestimate the site amplification amplitude. At last the relationship between the average site amplification of those three frequency bands and the average uppermost-20m shear wave velocity (V_{s20}) was regressed. It shows that there is a strong correlation between them.

Keywords: generalized inversion technique; Wenchuan Earthquake; site effect; HVS method

E-mail: renyefei@iem.net.cn

引言

自Wood等人^[1]在1906年美国旧金山大地震中认识到局部场地条件对于震害及地震动特性有着显著的影响开始, 随后几乎所有较大地震都证实了不同场地条件上的建筑物震害差异极其显著。另外, 世界

各国的抗震设计规范都采用了考虑不同场地类别的设计反应谱。可以说, 场地效应研究一直以来是人们关注的热点问题。

有关汶川地震的场地效应研究已经大量开展^[2-5], 然而这些研究仅侧重于定性评估。理论上, 场地地震动反应可以通过地震波传播理论进行定量数值计算, 然而确切的场地地表土层分布和岩土信息较难获取, 加上三维土体物理模型的复杂性以及大应变下土层非线性的不确定性, 数值计算较难实现。因而通过真实获取的地表强震动记录反演场地地震动反应在场地效应研究问题中较为实用而变得流行。常

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务项目(2011B06)和公益性行业科研专项(201208014)

作者简介: 任叶飞, 博士研究生, 助理研究员

收稿日期: 2012-11-20

用的方法有参考场地法(RSM-Reference Site Method), 又称传统谱比法^[6], 广义反演法(GIT-Generalized Inversion Technique)^[7]以及水平/垂直谱比法(HVSR-Horizontal- to-Vertical Spectra Ratio), 欧阳行艳和章文波对这方面的研究进行了综述评论^[8]。为了研究汶川地震场地效应, 运用广义反演法来计算台站场地的地震动反应。

2 广义反演法

广义反演法, 又称谱反演法(SIM-Spectral Inversion Method), 由 Andrews 首次提出^[7], 最大的优点是能够分离地震动的震源、传播、场地三项因素。Iwata 和 Irikura 对其进行了改进使其变得更加合理而在国际上被广泛应用^[9-10], 我国章文波等人运用此方法进行了唐山地震的场地效应研究^[11]。该方法的原理如下:

通常认为地表观测到的地震动在时域内可表示为震源、路径和场地三项因素的卷积, 通过时频转换在频域内可表示成这三项因素的乘积, 也就是:

$$O_{ij}(f) = S_i(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot G_j(f) \quad (1)$$

式中: $O_{ij}(f)$ 表示第 j 个台站在第 i 个地震中观测到的地震动的傅氏谱; $S_i(f)$ 表示第 i 个地震的震源谱; $G_j(f)$ 表示第 j 个台站的场地反应; $P_{ij}(f)$ 表示第 j 个台站至第 i 个地震震中的路径效应, 也就是地震动的衰减项。

假设震源是点源形式, 那么地震动的衰减可由两部分组成: 几何扩散, 可表示成距离的倒数 R_{ij}^{-1} ; 非弹性损失, 以指数形式 $\exp(-\pi f R_{ij}/Q(f) \cdot V_s)$ 表示, 因此 $P_{ij}(f)$ 可表示成:

$$P_{ij}(f) = E_{ij}^{-1} \exp(-\pi f R_{ij}/Q(f) \cdot V_s) \quad (2)$$

式中: R_{ij} 表示第 j 个台站至第 i 个地震震中的距离; $Q(f)$ 表示与频率 f 相关的品质因子; V_s 表示介质剪切波速。因此式(1)可表示成如下形式:

$$O_{ij}(f) = S_i(f) \cdot G_j(f) \cdot R_{ij}^{-1} \cdot \exp(-\pi f R_{ij}/Q(f) \cdot V_s) \quad (3)$$

取对数后上式可表示为线性相加的形式:

$$\ln(O_{ij}(f)) + \ln R_{ij} = \ln(S_i(f)) + \ln(G_j(f)) - (\pi f R_{ij}/V_s) \cdot Q(f) \quad (4)$$

式(4)实际上是一个线性方程组, 包含 $i+j+1$ 个未知量(i 个 $S_i(f)$ j 个 $G_j(f)$ 和 1 个 $Q(f)$), 可通过奇异值分解法获得最小二乘解。

为了消除 $S_i(f)$ 和 $G_j(f)$ 之间存在的权衡(trade-off), 必须给式(4)一个限制条件。这里选取甘肃文县台(编码 62WIX)为参考台站, 考虑自由地表的放大效

应将场地反应设置为 2, 选取这个台的主要原因是该台站同时也为测震台站, 位于山洞内, 安置了宽频带地震仪, 需满足非常低的背景噪声要求。因此可以认为加速度传感器布设在硬基岩之上, 不存在场地放大作用。

3 强震动记录

3.1 记录选取

汶川地震大量余震中, 中国数字强震动台网获取了超过 2000 组三分量强震动记录^[12]。为了选取合适的能用于本文研究的记录, 设定了以下三个选取条件: ①选取震源距在 30 ~ 150km 之内的记录。第一个原因是这些记录的震源距主要分布在这一范围内。众所周知, 地震动衰减与距离息息相关, 如果选取的记录震源距分布不均匀, 反演得到的体现地震动衰减特性的 Q 值将会很离散。第二个原因是这个范围内关于前述地震动衰减几何扩散项为 R_{ij}^{-1} 的假设比较合理。第三个原因是为了减少震源距计算过程中震源深度误差带来的影响。这些记录的震源深度普遍为 10 ~ 20km, 最大为 30km, 因此选取 30km 作为下限值。②选取 PGA 大于 2Gal 且小于 100Gal 的记录。设置下限值 2Gal 是为了避免噪声对于记录的干扰影响, 上限值 100Gal 是为了避免土层非线性反应的影响。③选取至少含有满足条件①和②的 4 组记录的地震, 以及选取至少获得满足条件①和②的 4 组记录的台站, 这样做的原因是减少数据的离散性。

最终, 从 96 个余震中由 28 个台站获取的 602 组强震动记录被选取运用到该研究中。图 1 给出了这些地震震中及台站位置的地理分布, 详细的台站基本信息见表 1。

3.2 记录处理

由于上述广义反演法只是针对 S 波建立的, 而 S 波因引起结构破坏也是被大家关注的, 因此首先需要对所选记录提取 S 波部分。这里采用 Husid 法确定 S 波的初时^[13], 以及采用累积的均方根函数确定 S 波的末时^[14]。为了移除数据截断引起的误差, 对时程进行加窗处理, 采用余弦形式的渐变窗, 如图 2 所示。

接下来, 对各记录两水平分量的 S 波部分分别计算傅氏谱(FAS), 采用 0.5Hz 的帕曾窗平滑后, 对两水平分量进行向量合成。

4 场地效应

4.1 台站场地反应

通过上述广义反演法将 28 个台站的场地反应、96 个地震的震源谱以及汶川周边区域内的地壳平均 Q 值

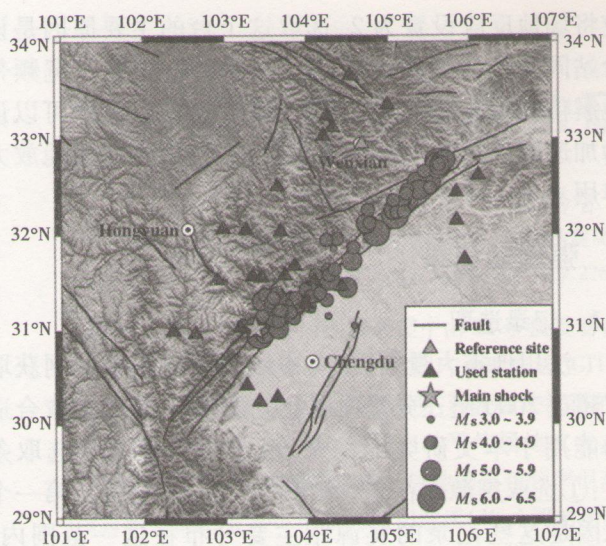


图1 选取的地震震中以及台站位置分布

Fig.1 Epicenter location of the earthquakes and geographical distribution of strong motion stations used in present study

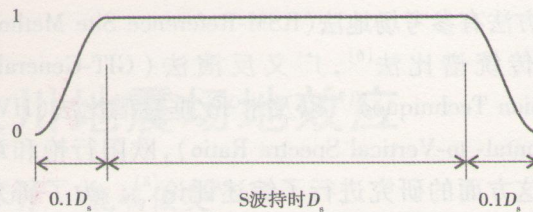


图2 本文采用的渐变窗

Fig.2 The tapered window used in present study

进行分离。图3给出了各台站场地反应反演结果以及与HVSr方法结果的比较,此结果由Wen等人给出^[4]。由于考虑了自由地表的放大,因此对HVSr结果进行了乘2处理。从图3可以地清晰看出,对于某些台站,如51CXQ,51GYQ,51GYS,51QLY和62WIX,两种方法的结果非常一致;而对于其他大部分台站,HVSr方法的场地放大要小于广义反演法的结果,但是两者具有相似的曲线以及相近的卓越频率值。

表1 台站相关参数以及场地卓越频率和平均场地放大

Table 1 Parameters of strong motion stations and their calculated predominant frequency and average site amplification

台站代码	记录数量	V_{s20} (m/s)	卓越频率		平均场地放大		
			广义反演法	HVSr法	1.0 ~ 5.0Hz	5.0 ~ 10.0Hz	1.0 ~ 10.0Hz
51AXT	6	×	2.54	1.61	5.11	2.67	3.76
51CXQ	4	×	3.81	3.85	9.38	7.43	8.30
51GYQ	7	Bedrock	10.94	11.76	2.76	3.15	2.98
51GYS	5	×	8.01	8.33	5.51	10.58	8.32
51GYZ	6	291	5.22	4.00	7.65	6.65	7.10
51HSD	28	294	13.09	12.50	7.13	6.79	6.94
51HSL	33	291	3.96	3.70	10.84	6.82	8.61
51JZG	24	260	5.18	5.00	15.22	12.74	13.84
51JZW	23	273	4.00	3.85	9.76	8.03	8.80
51JZY	27	369	6.93	6.67	6.25	6.39	6.33
51LXM	60	261	2.98	3.03	17.00	9.16	12.65
51LXS	36	270	3.86/13.0	3.85/12.5	7.03	6.91	6.96
51LXT	58	281	13.23	—	4.18	7.88	6.23
51MXB	13	Bedrock	2.78	—	5.22	3.70	4.38
51MXD	62	238	2.64	1.35	22.40	7.54	14.16
51MXN	55	348	2.44	1.96	9.31	5.33	7.10
51MZQ	4	×	2.44	6.67	2.97	2.24	2.57
51PJD	7	×	3.03	2.94	20.67	4.07	11.47
51PJW	9	×	3.66	3.23	12.76	3.27	7.50
51QLY	17	×	8.64	6.67	7.45	10.02	8.87
51SFB	6	302	6.59	6.67	2.98	9.10	6.37
51SPA	38	301	3.96	6.67	6.36	6.27	6.31
51WCW	9	315	8.64	8.33	4.36	9.26	7.08
51XJB	16	293	13.04	—	5.75	5.25	5.47
51XJD	9	297	2.69	—	7.89	6.78	7.27
62SHW	7	342	8.94	3.57	5.63	6.81	6.29
62WIX	8	Ourcrop	—	—	2.00	2.00	2.00
62WUD	25	205	1.51/2.88	1.41/4.76	17.63	9.30	13.02

注: × 表示台站无钻孔资料; — 表示台站场地卓越频率不明显,难以识别;/ 表示对于台站51LXS和62WUD存在两个场地卓越频率。

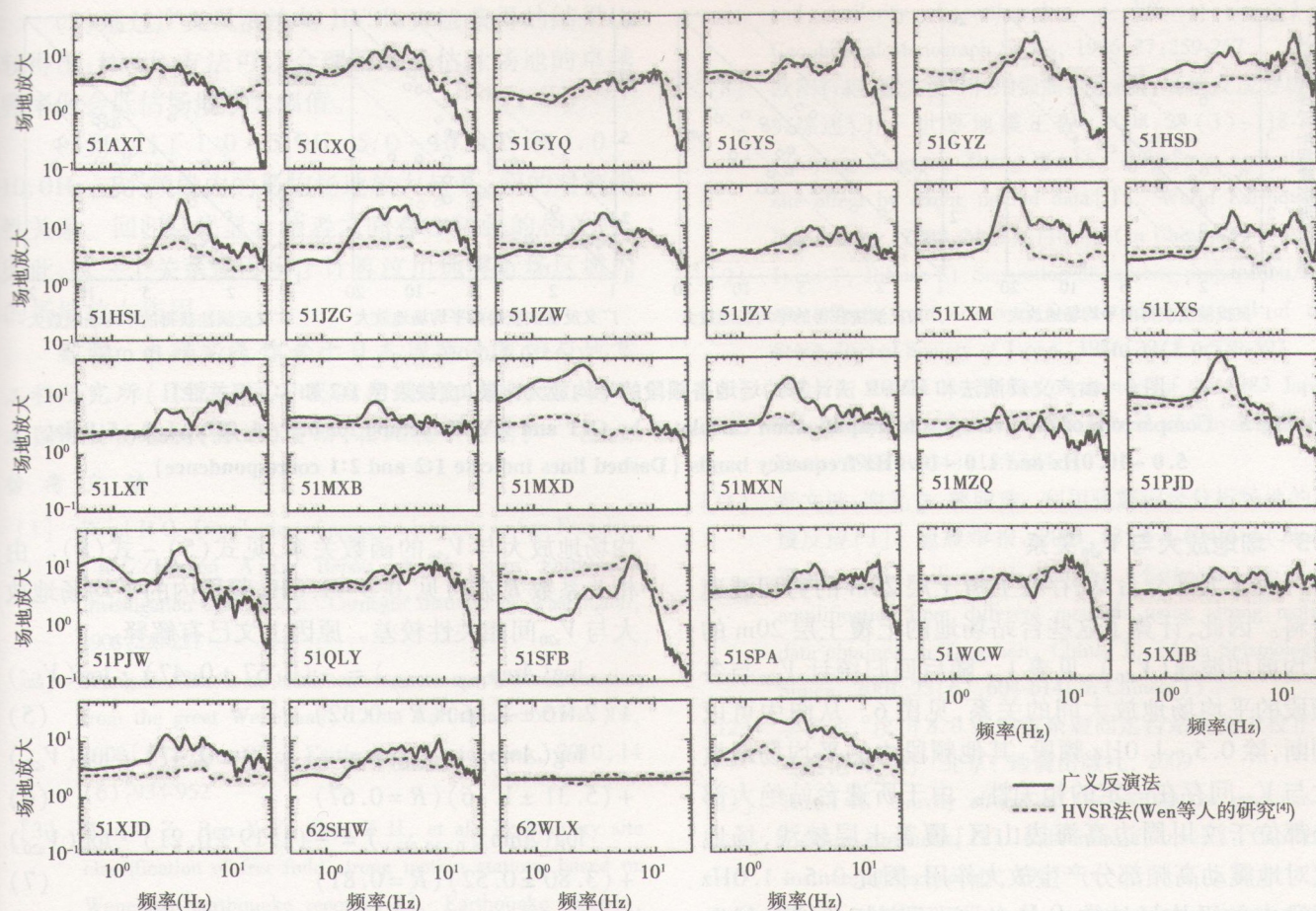


图3 由广义反演法和 HVSR 法获得的 28 个台站的场地反应

Fig. 3 Site response of 28 strong motion stations calculated by generalized inversion technique and HVSR method

从图3还可以发现对于62WIX台站,由HVSR法得到各频率的场地放大几乎都接近2,这与前述采用此台站为参考台站并设定场地反应为2的假设相一致,由此一定程度上说明了前述采用的限制条件是较合理的。

4.2 场地放大及卓越频率

比较两种方法获得的各台站卓越频率以及不同频带内的平均场地放大,见图4和图5。表1给出了这两种方法的计算结果。从图4可以看出,两种方法获得的场地卓越频率较一致。另外从图3还可以看出,例如51LXS和51WUD拥有两个卓越频率的台站,两种方法的结果也较一致。

但是,从图5可以看出,对于平均场地放大,HVSR方法的结果在频段1.0~5.0Hz、5.0~10.0Hz和1.0~10.0Hz都要小于广义反演法的结果。对于0.5~1.0Hz频段,两种方法的结果显得较一致,主要原因是在这一频段内对于大部分台站仅有轻微的放大效应,如图3所示,值几乎接近于2。最终可以得出这样的结论:HVSR方法可以精确合理地估计场地的卓越频率但会低估场地放大,类似的结论也已由其他研究

给出^[15-17]。

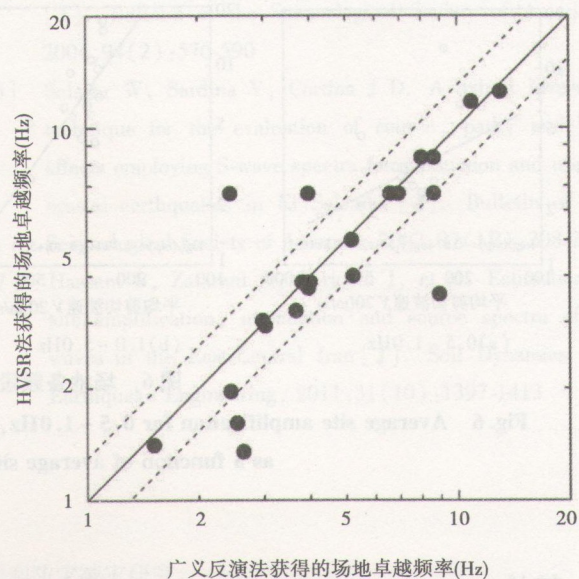


图4 由广义反演法和 HVSR 法获得的场地卓越频率比较
Fig. 4 Comparison of the predominant frequency calculated by GIT and HVSR method
(Dashed lines indicate 30% deviation)

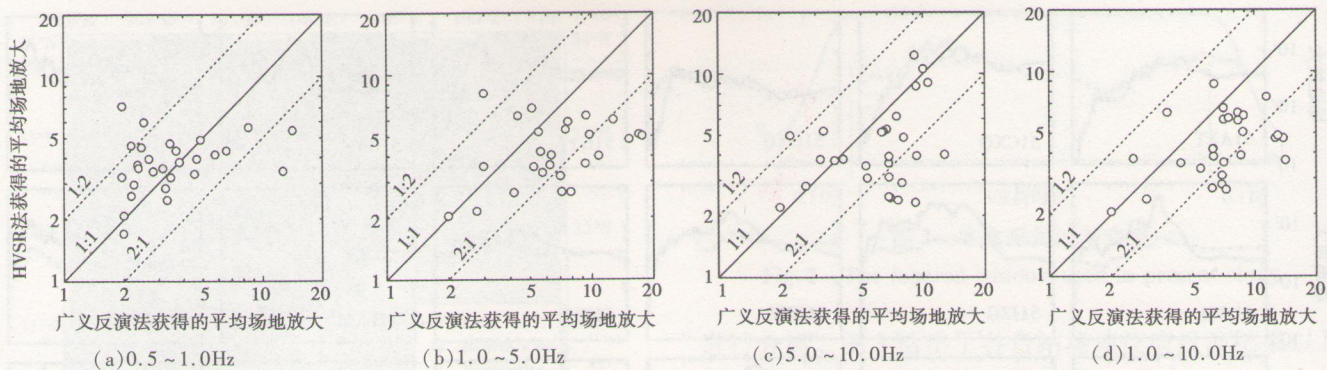


图 5 由广义反演法和 HVSR 法计算的场地各频段的平均放大比较 (虚线表示 1:2 和 2:1 相关性)

Fig. 5 Comparison of the average site amplification calculated by GIT and HVSR method for 0.5 ~ 1.0Hz, 1.0 ~ 5.0Hz, 5.0 ~ 10.0Hz and 1.0 ~ 10.0Hz frequency bands (Dashed lines indicate 1:2 and 2:1 correspondence)

4.3 场地放大与 V_{s20} 关系

对于大部分台站,存在上覆土层 20m 的剪切波速资料。因此,计算了这些台站场地的上覆土层 20m 的平均剪切波速 (V_{s20}),见表 1。随后回归统计 V_{s20} 与各频段的平均场地放大间的关系,见图 6。从图中可以判断,除 0.5 ~ 1.0Hz 频段,其他频段内的平均场地放大与 V_{s20} 间存在一定的相关性。由于所选台站绝大部分都位于汶川周边高海拔山区,覆盖土层较浅,场地仅对地震动高频部分产生放大作用,因此 0.5 ~ 1.0Hz 频段内的平均场地放大与 V_{s20} 间不存相关性是较合理的。

在对数刻度下,通过线性拟合得到各频段内的平

均场地放大与 V_{s20} 的函数关系,见式(5)~式(8)。由相关系数 R 亦可见,0.5 ~ 1.0Hz 频段内的平均场地放大与 V_{s20} 间相关性较差。原因上文已有解释。

$$\log(\text{Amp}_{(0.5 \sim 1.0\text{Hz})}) = -(0.67 \pm 0.47) \cdot \log(V_{s20}) + (2.16 \pm 1.16) \quad (R=0.32) \quad (5)$$

$$\log(\text{Amp}_{(1.0 \sim 5.0\text{Hz})}) = -(1.79 \pm 0.47) \cdot \log(V_{s20}) + (5.31 \pm 1.16) \quad (R=0.67) \quad (6)$$

$$\log(\text{Amp}_{(5.0 \sim 10.0\text{Hz})}) = -(1.19 \pm 0.21) \cdot \log(V_{s20}) + (3.80 \pm 0.52) \quad (R=0.81) \quad (7)$$

$$\log(\text{Amp}_{(1.0 \sim 10.0\text{Hz})}) = -(1.52 \pm 0.23) \cdot \log(V_{s20}) + (4.64 \pm 0.57) \quad (R=0.85) \quad (8)$$

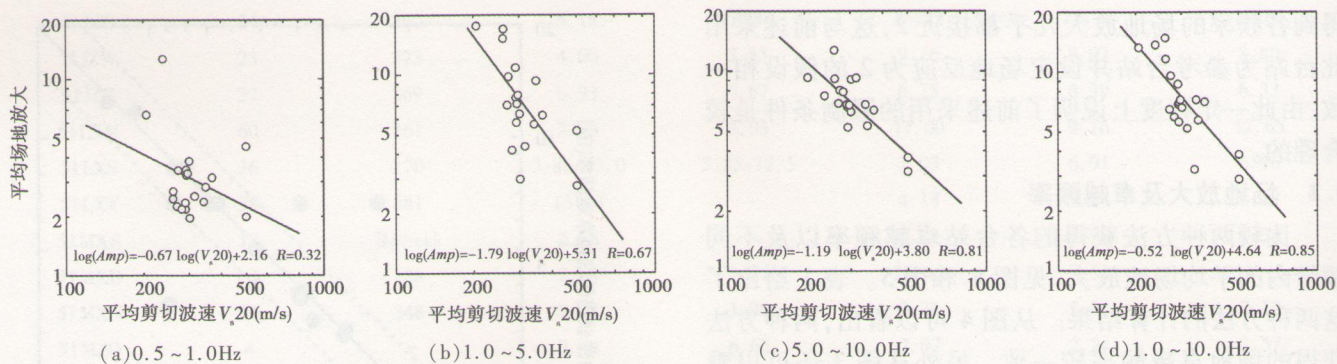


图 6 场地各频段的平均放大与 V_{s20} 间函数关系

Fig. 6 Average site amplification for 0.5 ~ 1.0Hz, 1.0 ~ 5.0Hz, 5.0 ~ 10.0Hz and 1.0 ~ 10.0Hz frequency bands as a function of average shear wave velocity of upper 20m (V_{s20})

5 结论

针对汶川地震中获取大量强震动记录的 28 个观测台站,运用广义反演法获得了这些台站的场地反应,并与 HVSR 法获得的结果进行了比较。最后回归

分析了 1.0 ~ 5.0Hz、5.0 ~ 10.0Hz 和 1.0 ~ 10.0Hz 频段内的平均场地放大与台站上覆土层 20m 的平均剪切波速 (V_{s20}) 间的关系。最终得出如下结论:

(1) 获得了 28 个汶川地区强震动台站的场地反应,包括场地卓越频率以及 1.0 ~ 5.0Hz、5.0 ~ 10.0Hz 和 1.0 ~ 10.0Hz 频段内的平均场地放大幅度;

(2)通过广义反演法与 HVSR 方法获得的结果比较得出:HVSR 方法可以合理精确地估计场地的卓越频率但会低估场地放大幅值。

(3)回归了 1.0~5.0Hz、5.0~10.0Hz 和 1.0~10.0Hz 三个频段内的平均场地放大与 V_{s20} 间的对数线性关系。回归结果显示两者之间存在较强的相关性。因此,这三个关系式可用于计算汶川地震近场区域内的场地放大作用。

致谢 本研究是作者于日本国际地震学与地震工程研究所(IISEE)学习交流期间的工作内容,受日本国际协力机构(JICA)资助,在此表示感谢!

参考文献

- [1] Wood H O. Distribution of apparent intensity in San Francisco [R]//Lawson A C. Report of the State Earthquake Investigation Commission. Carnegie Institute of Washington, 1908:220-227
- [2] Wang D, Xie L L. Study on response spectral acceleration from the great Wenchuan, China Earthquake of May 12, 2008[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010, 14(6):934-952
- [3] Wen R Z, Ren Y F, Zhou Z H, et al. Preliminary site classification of free-field strong motion stations based on Wenchuan earthquake records[J]. Earthquake Science, 2010, 23(1):101-110
- [4] Wen R Z, Ren Y F, Shi D C. Improved HVSR site classification method for free-field strong motion stations validated with Wenchuan aftershock recordings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 10(3):325-337
- [5] 薄景山,齐文浩,刘红帅,等. 汶川特大地震汉源烈度异常原因的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6):53-63(Bo Jingshan, Qi Wenhao, Liu Hongshuai, et al. Abnormality of seismic intensity in Hanyuan during Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6):53-63(in Chinese))
- [6] Borchardt R D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1):29-61
- [7] Andrews D J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size [J]. Geophysical Monograph Series, 1986, 37:259-267
- [8] 欧阳行艳,章文波. 利用强震记录进行场地反应分析研究综述[J]. 世界地震工程, 2008, 24(3):118-126 (Ouyang Xingyan, Zhang Wenbo. Review on analysis of site effect by strong motion data[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(3):118-126(in Chinese))
- [9] Iwata T, Irikura K. Separation of source, propagation and site effects from observed S-wave [J]. Journal of the Seismological Society of Japan, 1986, 39(2):579-593
- [10] Iwata T, Irikura K. Source parameters of the 1983 Japan Sea earthquake sequence [J]. Journal of Physics of the Earth, 1988, 36(4):155-184
- [11] 章文波,谢礼立,郭明珠. 利用强震记录分析场地的地震反应[J]. 地震学报, 2001, 23(6):604-614 (Zhang Wenbo, Xie Lili, Guo Mingzhu. Estimation on site-amplification from different methods using strong motion data obtained in Tangshan, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(6):604-614(in Chinese))
- [12] 李小军. 汶川 8.0 级地震余震固定台站观测未校正加速度记录[M]. 北京:地震出版社, 2009
- [13] Husid R. Gravity effects on the earthquake response of yielding structures[D]. California of America: California Institute of Technology, 1967
- [14] McCann M W J, Shah H C. Determining strong motion duration of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69(4):1253-1265
- [15] Castro R R, Pacor F, Bindi D, et al. Site response of strong motion stations in the Umbria, Central Italy, Region [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2):576-590
- [16] Salazar W, Sardina V, Cortina J D. A hybrid inversion technique for the evaluation of source, path, and site effects employing S-wave spectra for subduction and upper-crustal earthquakes in El Salvador[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(1B):208-221
- [17] Hassani B, Zafarani H, Farjoodi J, et al. Estimation of site amplification, attenuation and source spectra of S-waves in the East-Central Iran [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(10):1397-1413

任叶飞(1983-),男,博士研究生,助理研究员。主要从事地震工程和防灾减灾研究。

温瑞智(1968-),男,博士,研究员。主要从事地震工程和防灾减灾研究。

山中浩明(1961-),男,博士,教授。主要从事工程地震及地球物理勘探研究。

鹿嶋俊英(1962-),男,博士,上席研究员。主要从事强震动观测与应用研究。