

用数字地震资料确定软基岩场地放大和衰减的联合效应^{*}

姜 慧^{1, 2)} 高孟潭¹⁾ 俞言祥¹⁾ 赵翠萍²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

摘要 从强地面运动随机模拟方法应用出发, 针对我国很多地区浅地壳 S 波速度结构研究程度较低, 场地放大和衰减联合效应(简称“场地联合效应”)估计困难的现状, 提出一种用中小地震的数字观测资料确定软基岩场地联合效应的方法. 并采用该方法, 结合研究区实际算例, 确定出研究区软基岩场地的联合效应.

关键词 数字地震资料 软基岩 联合效应

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

引言

所谓“场地联合效应”, 是指随机模拟方法中的场地放大因子和高频滤波因子的乘积 $V(f) \cdot P(f)$ (式(1)). 无论是软基岩场地还是土层场地, 相对于下伏硬基岩地层, 对某些频率的地震动都有一定的放大作用; 同时, 由于上覆地层较下伏硬基岩地层软弱, 对地震动高频成分具有更强的滤波作用. 本研究的软基岩场地联合效应, 就是指软基岩相对于下伏硬基岩地层的放大和衰减联合效应. 过去地震动估计方法只关心剪切波速小于 500 m/s 的场地的地震反应, 尽管软基岩对场地地震动的放大作用也达到 1.5 倍左右, 因为它的剪切波速在 500~1 500 m/s 之间, 一直没有引起工程师的注意. 但在目前国际上流行的、我国正在开展研究的地震动随机模拟方法中, 软基岩场地的联合效应对地震动随机模拟结果影响可观, 且在浅地壳中普遍存在, 具有重要的研究价值.

软基岩场地联合效应的确定方法很多, 依据所采用的资料可分 3 类: 第一类是依据地层速度结构的方法(Boore, Joyner, 1991, 1997); 第二类是依据强震记录或数字地震资料的方法(Moya *et al*, 2000; 黄玉龙等, 2003); 第三类是依据钻孔和各层位强震记录的方法(Abercrombie, 1997; Satoh *et al*, 1997; Bonilla *et al*, 2002).

在我国大部分地区, 特别是西部地区, 浅地壳速度结构普遍不清楚, 这类场地的联合效应无法采用第一类和第三类方法确定. 在第二类方法中, Maya 等(2000)的方法是把场地联合效应与震源谱放在一起确定, 震源谱幅值没有约束. 该方法确定的场地效应随频率变化的趋势是合理的, 但放大倍数不合理. 黄玉龙等(2003)的方法是把场地联合效应与非

^{*} 国家自然科学基金项目(5048003)和国家 973 项目(编号: 2002CB412706)联合资助. 中国地震局地球物理研究所论著 04AC1035.

2003-08-20 收到初稿, 2004-06-14 收到修改稿并决定采用.

弹性衰减因子放在一起确定, 该方法确定的场地效应, 放大倍数是合理的, 但随频率变化的趋势不合理. 另外, 他们的方法过于复杂, 不便于随机模拟方法应用.

强地面运动随机模拟方法, 关心的是区域平均场地的联合效应. 本文推荐的方法是, 根据地震学方法确定的震源和传播模型, 用中小地震的数字地震资料估计软基岩场地的联合效应. 其方法简单易行, 结果也较合理.

1 本研究的场地联合效应的确定方法

随机模拟方法的场地水平向地震动傅立叶谱为

$$A_0(M_0, R, f) = S(M_0, f) \cdot I(f) \cdot G(R) \cdot A_n(R, f) \cdot V(f) \cdot P(f) \quad (1)$$

其中, 震源位移谱 $S(M_0, f)$ 可用 ω^2 Brune 理论谱模型描述; $I(f) = (2\pi f)^p$ 为地震动选择因子, $p = 0, 1, 2$ 时分别对应于位移、速度和加速度谱; $G(R)$ 为几何衰减因子, 常采用 3 段几何模型 (Atkinson, 1984); $A_n(R, f) = e^{-\pi f R / \beta Q_s(f)}$ 为全路径非弹性衰减因子, 其中的品质因子 Q_s 常用 (S 波) 尾波等方法确定. $V(f)$ 为场地放大因子, $P(f)$ 为高频滤波因子. 其中, 场地放大因子和高频滤波因子的乘积 $V(f) \cdot P(f)$, 就是本文要研究的场地联合效应.

随机模拟方法的最大优点是把震源、传播和场地的影响分离成各因子的乘积 (式 (1)). 并且, 除了场地放大因子 $V(f)$ 外, 都可用一定的模型来表示.

假如研究区的几何衰减因子 $G(R)$ 、全路径非弹性衰减因子 $A_n(R, f)$ 已知, 震源谱依据“中小地震的震源谱服从 ω^2 Brune 模型 (Brune, 1970, 1971)”的理论假定, 用地震矩 M_0 、拐角频率 f_c 标定出来, 我们就可以用中小地震的数字地震观测资料, 依据预测方程 (1) 估计随机模拟方法需要的场地联合效应.

假如在一个研究区内有 N 次地震, M 个台站, 对每个台站的水平向观测记录进行基线、仪器响应校正, 高频或低频滤波, 去除高频或低频噪声; 然后, 把两个水平分量的 S 波谱合成, 即可得到第 j 号台站对第 i 次地震的 S 波速度观测谱 $A_0(M_0^i, R_{i,j}, f)$. 其场地联合效应 $C_{i,j}^{vp}$ 可由式 (1) 导出.

$$C_{i,j}^{vp} = [V(f) \cdot P(f)]_{i,j} = \frac{A_0(M_0^i, R_{i,j}, f)}{S(M_0^i, f) \cdot I(f) \cdot G(R_{i,j}) \cdot A_n(R_{i,j}, f)} \quad (2)$$

对于速度观测记录取: $I(f) = 2\pi f$; 对于强震记录取: $I(f) = (2\pi f)^2$.

第 j 个台站的场地联合效应为

$$C_j^{vp}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{i,j}^{vp}(f) \quad (3)$$

研究区的场地联合效应为

$$C_{vp}(f) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M C_j^{vp}(f) \quad (4)$$

2 资料

为了验证该方法的可靠性, 我们在天山地震带中选择一个研究区进行试算. 研究区范围和台站、地震分布见图 1, 台站的场地情况见表 1, 地震简目见表 2.

表 1 研究区台站一览表

台站编号	台站名	海拔高度/m	台基岩性	仪器响应的 平台值/Hz	数字地震仪类型
1	硫磺沟(LHG)	1 621	粗砂岩	0.5~20	FBS-3A+EDAS-16
2	乌什城(WSC)	1 500	硅质岩	1.5~20	FBS-3A+EDAS-16
3	高崖子(GAZ)	1 810	砂岩	1.5~20	JC-V104+EDAS-16
4	石梯子(STZ)	2 260	砂砾岩	0.2~20	JC-V104+EDAS-16
5	乌苏(WSU)	1 830	花岗岩	0.2~20	FBS-3A+EDAS-16
6	库尔勒(KOL)	1 100	前震旦纪花岗岩	0.5~20	FBS-3A+EDAS-24
7	天池(TCH)	2 580	安山岩	1.0~20	FBS-3A+EDAS-16
8	呼图壁(HTB)	970	第四纪卵石	1.0~20	FBS-3A+EDAS-16

表 2 研究区地震简目

地震编号	日期 年-月-日	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	M_L
001	2001-04-03	43.77	87.92	15	3.3
002	2001-11-17	42.63	85.80	14	3.7
003	2001-11-23	43.92	86.12	30	3.9
004	2001-12-22	43.78	86.63	30	4.5
005	2002-02-08	44.07	84.60	25	5.1
006	2002-02-08	44.05	84.60	29	3.5
007	2002-02-10	42.65	86.47	29	4.2
008	2002-02-20	42.05	85.87	23	3.5
009	2002-03-12	42.38	85.87	30	4.9
010	2002-03-13	42.00	84.18	28	4.7
011	2002-03-22	43.80	83.88	31	4.6
012	2002-03-29	41.90	84.18	20	3.5
013	2002-05-28	43.72	84.65	31	4.6
014	2002-08-22	42.15	87.89	13	3.6
015	2002-05-07	43.18	87.40	22	2.9
016	2001-11-22	44.05	86.93	15	3.1
017	2001-12-06	41.88	86.48	15	3.4
018	2001-12-15	43.37	87.18	15	2.8
019	2002-01-02	42.30	86.73	24	2.5
020	2002-01-15	42.00	86.13	20	3.1
021	2002-03-03	43.72	87.90	36	2.7
022	2002-04-04	43.07	84.62	20	2.6
023	2002-06-18	43.57	85.02	18	2.6

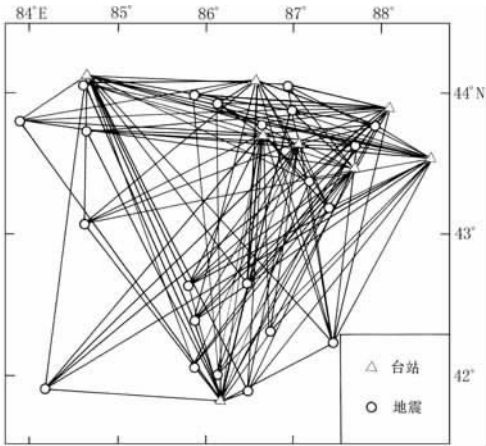


图 1 研究区地震到台站的路径分布射线图

3 参数确定和结果分析

首先依据 Atkinson 三段几何模型, 确定出该地区的三段几何衰减模型为: 震源距 $R < 68 \text{ km}$, 按 R^{-1} 衰减; $68 \text{ km} \leq R \leq 111 \text{ km}$, 不衰减; $R > 111 \text{ km}$, 按 $R^{-0.5}$ 衰减. 另外, 采用 S 波波尾等算法确定出该地区的品质因子 $Q_s = 357.5 f^{0.568}$.

在研究区内, 有 23 次 $M_L 2.5 \sim 5.1$ 地震同时被 8 个基岩台站记录到, 根据联合反演方法, 可确定出研究区 23 次地震的震源位移谱 $S(M_0, f)$. 该方法的前提是: 在某

一地区，有多个地震事件同时被多个数字地震台记录到。其原理是：对同一次地震，由多个地震台校正得到的震源谱与 ω^2 Brune 模型谱的谱形相似；同时，多次地震在同一地震台站的场地响应误差最小，在以上条件的约束下，可以通过对场地响应初值的不断调整，获得与各台站对应的 23 次地震的震源位移谱，进而得到每次地震的平均震源谱(图 2)。低频水平 Ω_0 和拐角频率 f_c 同时被确定出来。

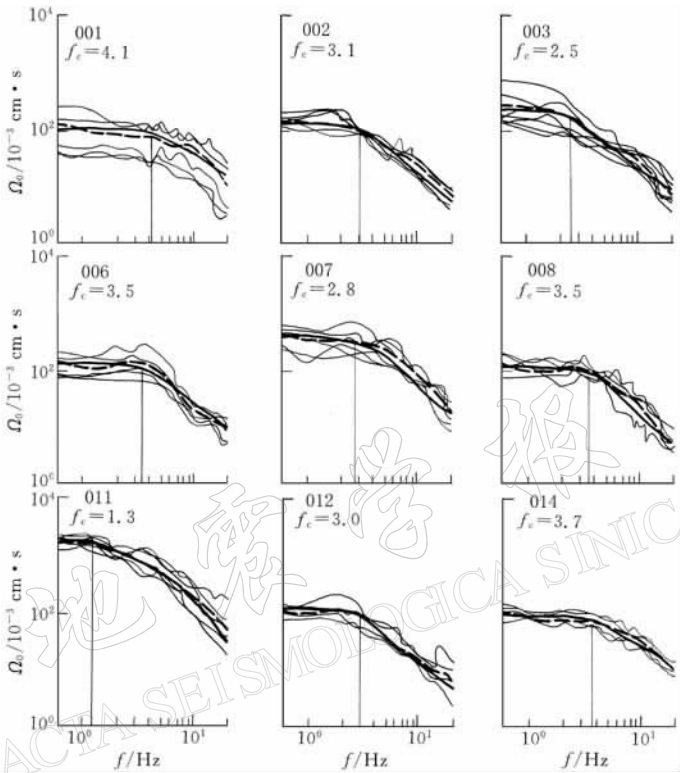


图 2 研究区 9 次 2.5~5.1 级地震的震源谱与 ω^2 理论震源谱的比较
粗虚线为 ω^2 Brune 理论谱，粗实线为各平均谱，细线为对应各台站的震源谱

假定研究区硬基岩的剪切波速 $\beta=3.5$ km/s，密度 $\rho=2.9$ g/cm³， M_0 与 M_L 的经验关系为： $\lg M_0=1.5M_L+15.7$ (陈培善，陈海通，1990)。拐角频率 f_c 随震级 M_L 的变化规律见图 3 (依据联合反演结果)，在震级 M_L 为 2.5~5.0 范围内，近似服从 $M_0 f_c^4$ 为常数的经验统计关系： $f_c=0.28+e^{-0.904M_L+4.35}$ 。根据以上参数和经验、统计关系， ω^2 模型 Brune 震源位移谱就可以标定出来。

在研究区的几何衰减因子 $G(R)$ 、全路径非弹性衰减因子 $A_n(R, f)$ 和震源位移谱 $S(M_0, f)$ 都确定出来后，依据式(3)、(4)就可

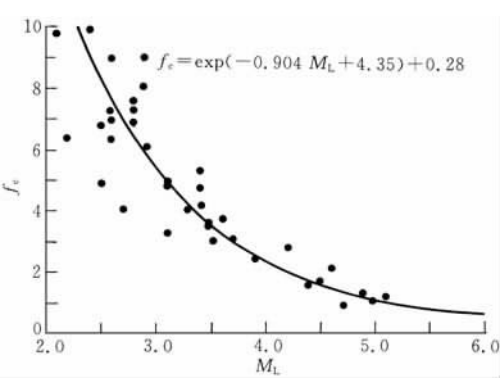


图 3 拐角频率随震级变化分布图

以分别确定各个台站的场地联合效应和研究区的场地联合效应(图 4). 值得注意的是, 由于个别台站仪器响应曲线平台起始频率较高(如 2, 3 号台, 在 1.5 Hz 左右), 这些台站的观测谱, 在小于 1 Hz 的频段会有异常. 对这些台站的场地联合效应, 依据其它台站观测谱计算出的场地联合效应曲线或 Boore 等用场地剪切波速度结构确定的场地响应曲线(Boore, Joyner, 1997), 进行了适当的修正. 在大于 10 ~ 15 Hz 的频段, 各台站的联合效应结果比

较离散, 但平均结果还是令人满意的.

从图 4 可以看出, 各台站的场地联合效应有一定差异, 但随频率的变化趋势是相同的, 都对 2~6 Hz 的地震动幅值放大效应较大; 8 号呼图壁台站(HTB)的场地联合效应有些偏离, 它对 1~4 Hz 的地震动幅值放大效应较大. 这可能是该台站的场地(第四纪卵石)与其它台站场地的岩性差异相对较大造成的.

总之, 上述结果与工程上用场地剪切波速度结构确定的场地响

应有较好的一致性. 各台站的场地联合效应, 可以用来随机模拟台站周围相似的软基岩场地的地震动; 平均场地联合效应, 可以用来随机模拟研究区任何软基岩场地的地震动.

4 讨论和结论

场地联合效应因子 $V(f) \cdot P(f)$ 是强地面运动随机模拟中的与场地影响有关的因子, 与本地区的软基岩的厚度和岩石物理性质有关. 它对场地的地震动峰值和反应谱的估计结果有很大影响, 是一个与场地地震动特性密切相关的参数. 本研究从强地面运动随机模拟方法应用出发, 提出一种用中小地震的数字观测资料确定场地联合效应的方法, 并用该方法确定了天山地震带中的一个研究区的软基岩场地联合效应. 该方法适合于地壳结构研究程度较低的地区, 但前提是该地区的几何衰减、品质因子要先确定出来. 随着我国数字地震台网的大量架设和资料的不断获取, 该方法的应用前景是乐观的.

本研究讨论的场地是软基岩, 相对于土层场地非线性较小. 本研究方法确定的各台站的场地联合效应, 与工程上用场地剪切波速度结构确定的场地响应有较好的一致性, 可以用来随机模拟台站周围相似的软基岩场地的地震动, 也可对一些地震学参数的反演提供参考依据. 本研究方法确定的平均场地联合效应, 适用于本地区基岩场地的强地面运动随机模拟, 也可作为估计本地区的地震动反应谱特征周期的依据.

参 考 文 献

- 陈培善, 陈海通. 1989. 由二维破裂模式导出的地震定标律[J]. 地球物理学报, 11(4): 337~350
黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 46(1): 51~61

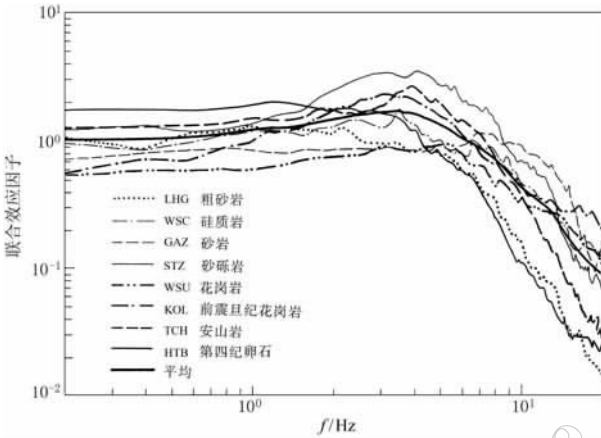


图 4 研究区软基岩场地联合效应随频率变化曲线
细线为 8 个台站的联合效应; 粗线为研究区的联合效应

- Moya A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **90**(4): 977~992
- Atkinson G M. 1984. Attenuation of strong ground motion in Canada from a random vibration approach[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **74**(6): 2 629~2 653
- Boore D M, Joyner W B. 1991. Estimation of ground motion at deep-soil sites in eastern North America[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**(6): 2 167~2 185
- Boore D M, Joyner W B. 1997. Site amplifications for generic rock sites[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(2): 327~341
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **75**: 4 997~5 009
- Brune J N. 1971. Correction[J]. *J Geophys Res*, **76**: 5 002
- Bonilla L F, Steidl J H, Gariel Jean-Christophe, et al. 2002. Borehole response studies at Garner Valley Downhole array, Southern California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**(8): 3 165~3 179
- Abercrombie R E. 1997. Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep bore recordings[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(3): 731~744
- Sato T, Kawase H, Sato T. 1997. Statistical spectral model of earthquake in the Eastern Tohoku District, Japan, Based on the surface and borehole records observed in Sendai[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(2): 446~462

DETERMINATION OF COMBINED EFFECT OF AMPLIFICATION AND ATTENUATION OF SOFT ROCK SITE USING DIGITAL SEISMIC DATA

Jiang Hui^{1,2)} Gao Mengtan¹⁾ Yu Yanxiang¹⁾ Zhao Cuiping²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Xinjiang Autonomous Region, Ürümqi 830011, China

Abstract: In the paper, for the application of stochastic simulation of ground motion, we put forward a method to determine “the combined effect of amplification and attenuation” (combined effect for short) of soft rock site by using digital seismic data of moderate and small earthquakes. Our approach aims at solving the problem of the combined effect of soft rock site, which is difficult to determine in most regions of China because fewer studies were made on S-wave velocity structure. The combined effect of soft rock site can be determined by using the approach recommended by us. An example is given to discuss the practical application of the method.

Key words: digital seismic data; soft rock; combined effect