

黄杜若, 王 刚, 盛志刚. 基于小波包和空间相关性分析的人工地震波仿真技术[J]. 华南地震, 2014, 34 (3): 82-90. [HUANG Duruo, WANG Gang, SHENG Zhigang. Simulation Technology of Artificial Seismic Waves Based on Wavelet Packets and Spatial Correlation Analysis[J]. South China Journal of Seismology, 2014, 34(3): 82-90.]

基于小波包和空间相关性分析的人工地震波仿真技术

黄杜若¹, 王 刚¹, 盛志刚²

(1. 香港科技大学土木及环境工程学系, 香港 九龙清水湾;

2. 防灾科技学院防灾工程系, 河北 三河 06520)

摘要: 考虑强震作用下地震动参数的空间相关性, 是生命线工程、道路、桥梁等呈空间分布的大型结构抗震设计的重点问题。由于强震观测历史和观测设备的限制, 符合设计标准的地震波较为匮乏。因而, 人工地震波成为结构抗震时程计算分析的一个重要技术。小波包技术将地震波进行时域和频域分解及合成并通过区域化的强震记录, 得出小波包参数在时域和频域的统计特征及其空间相关性。进一步采用克里格插值法对无观测记录场址的地震动小波包参数进行最优估计, 从而合成人工地震波。能较好地模拟人工地震波的区域空间相关特征, 将为重大工程结构的防灾抗震仿真计算和动力优化设计提供实用可靠的地震波输入。

关键词: 人工地震波; 空间相关性; 小波包分析

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 03-0082-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.03.014

Simulation Technology of Artificial Seismic Waves Based on Wavelet Packets and Spatial Correlation Analysis

HUANG Duruo¹, WANG Gang¹, SHENG Zhigang²

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong; 2. Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe City 065201, China)

Abstract: Considering spatial correlation of ground motions is important in seismic hazard analysis of spatially distributed infrastructure systems such as long-span bridges, lifelines, railways. Due to the limited observation history and instrumentation of strong motion, synthetic ground motions are often used. In this paper, wavelet packet analysis is used to decompose and synthesize ground motions in the time and frequency domain. The spatial correlation of wavelet parameters is determined through semivariogram analysis of regionalized strong motion data. Ordinary kriging technique is then used to estimate the wavelet parameters and synthesize ground

投稿日期: 2013-12-25

基金项目: 香港研究资助局集体合作研究项目 CityU8/CRF/13G

作者简介: 黄杜若 (1986-), 女, 在读博士研究生, 主要从事岩土地震工程。

通讯作者: 王刚 (1974-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程。

E-mail: gwang@ust.hk

motions at unmeasured sites. The proposed method can well capture the spatial distribution of ground motions, and it can be used for time history analysis of spatially distributed infrastructure systems.

Key words: Artificial seismic waves; Spatial correlation; Wavelet packet

0 引言

近年来,随着经济社会的快速发展,我国相继建设了大量大型基础设施,如大跨度桥梁、道路、生命线工程等。这些工程的一个重要特点是,结构物跨越几百米,几千米甚至几公里的空间范围。因而,整个结构系统的地震设计与地震波的空间分布特性密切相关。如何确定这些呈空间分布的重大工程的地震波输入,是当前防灾抗震研究中的热点、难点问题。由于强震记录观测历史短暂并受到设备的限制,符合设计标准的地震波数据较为匮乏。因此,人工地震波成为结构抗震设计时程分析的一个重要手段,并在工程实践中被广泛使用。

现有的人工地震波方法主要分为三类,即地震波选择与改造、物理模拟法和随机分析法。其中,地震波选择与改造法通过选择适当的实测地震波,对其幅值进行放大或缩小^[1-2],或对其频域特性进行改造^[3],从而构造与目标反应谱相匹配的地震波。物理模拟法对震源区域内的断层错动过程进行力学计算模拟,从而仿真人工地震波的产生与传播^[4-5]。这种方法依赖于区域化的断层物理模型作为输入参数,而在一些地震地质资料匮乏的地区,此种方法即受到限制。运用随机分析法构造人工地震波,可以保证其在时域和频域的分布特性。以往的研究指出,地震波在频域上的非平稳性对结构非线性共振响应影响较大^[6]。在众多随机分析法中,Yamamoto 和 Baker^[7]最近提出了一种运用离散小波包变换对实测地震波时程进行分解的方法,具有重要的创新意义。该方法通过对地震波进行小波包分解,归纳出 13 个参数用来描述地震波在时域-频域的联合统计特征。Yamamoto 和 Baker 通过对 PEER-NGA 强震数据库中 1 408 个地震波进行统计分析,建立了这些参数的衰减模型。该方法除了能描述传统的地震波三要素(幅值、频谱和持时)外,还能对地震波在时域和频域的协同分布特征进行定量的描述,合成时域-频域非平稳的人工地震波。然而,必须指出的是,该方法没有描述小波包参数间的空间相关性,因而所生成的人工地震波在空间上不具有相关性。而

这恰恰是大跨度结构抗震防灾设计中不可忽略的重要因素。

本文运用地质统计学中的半变异函数理论,研究 13 个小波包参数的空间相关性,并以 1994 年加州洛杉矶 Northridge(北岭)地震和 1999 年台湾 Chi-Chi(集集)地震为两个实例,构建小波包参数的空间相关性模型。基于克里格(Kriging)插值法,对研究区域内无观测记录的场址的地震动小波包参数进行最优估计,旨在实现符合区域空间相关性分布的人工地震波仿真。

1 小波包分解及合成人工地震波

Yamamoto 和 Baker^[12]提出运用 Meyer 正交小波对地震波进行层层分解,小波包的分解与合成如式(1)、(2)所示

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^{2^j} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \quad (2)$$

式中, $x(t)$ 为地震波时程, 2^N 为时程中的数据点数。在时-频域中,对应于时间 t_k 和频率 f_i , $c_{j,k}^i$ 和 $\psi_{j,k}^i(t)$ 分别为小波包系数与小波包母函数。

以能量分配为原则,Yamamoto 和 Baker^[7]将小波包系数 $c_{j,k}^i$ 进一步划分为主要能量组系数 $c_{j,k,major}^i$ 和次要能量组系数 $c_{j,k,minor}^i$ 。其中,主要能量组包含地震波总能量的 70%,而次要能量组包含余下 30%的能量。Yamamoto 和 Baker^[7]提出了 13 个统计参数来描述小波包系数 $c_{j,k}^i$ 在时-频域中的联合分布及其统计特征。其中, E_{acc} 表示全部小波包系数的总和即地震波的总能量,如式(3)所示,

$$E_{acc} = \sum_i \sum_k \left| c_{j,k}^i \right|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (3)$$

此外,用以下 6 个参数来描述主要能量组小波包系数在时域-频域的联合统计特征: $E(a)_{major}$ 为标准化的主要能量组能量; $E(t)_{major}$ 和 $S(t)_{major}$ 分别代表主要能量组系数分布在时间轴的形心坐标与其标准差; $E(f)_{major}$ 和 $S(f)_{major}$ 分别代表主要能量组系数分布在频率轴的形心坐标与其标准差; $\rho(t,f)_{major}$ 为

主要小波包系数在时域与频域分布的相关系数,代表了地震波的非平稳性。类似地,次要能量组系数在时域-频域的联合分布可以用 6 个统计参数描述: $E(t)_{minor}$, $S(t)_{minor}$ 和 $E(f)_{minor}$, $S(f)_{minor}$ 分别代表次要能量组小波包系数在时间轴的形心坐标与其标准差,及其在频率轴的形心坐标与其标准差; $\rho(t, f)_{minor}$ 为次要能量组小波包系数在时域与频域分

布的相关系数;次要能量组小波包系数分布的随机性由 $S(\xi)$ 表示。图 1 给出了小波包分解地震波的一个实例。1994 年 Northridge 地震中鲍德温山地震台的实测加速度时程被小波分解为时域-频域分布的小波包系数,其统计分布的形心坐标分别由图中所示的 $E(t)$ 和 $E(f)$ 表示,标准差分别由图中的 $S(t)$ 和 $S(f)$ 表示。

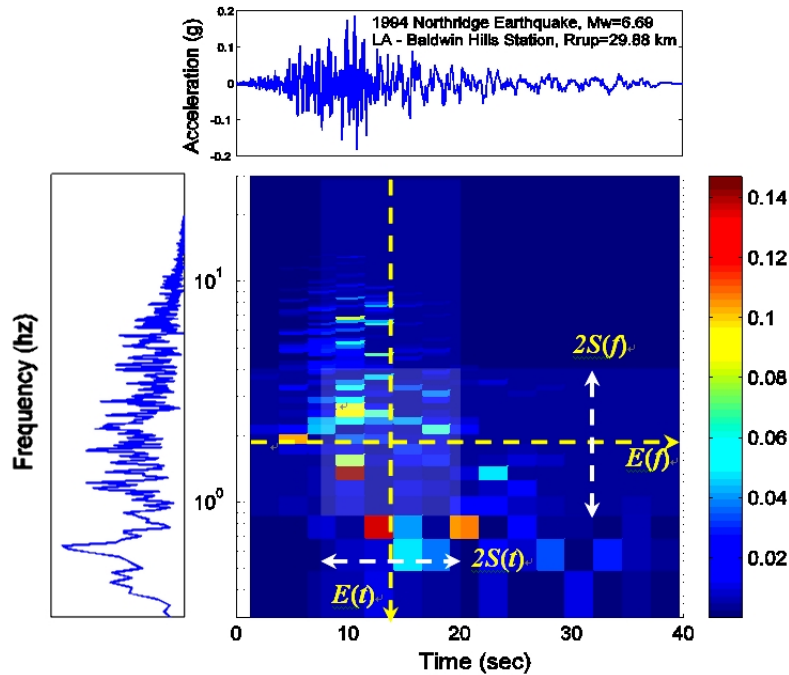


图 1 小波包分解实测地震波实例:鲍德温山地震台在 1994 年加州北岭地震中的记录

Fig.1 Example of wavelet packet decomposition of the recorded acceleration time history at the Los Angeles - Baldwin Hills site during the 1994 Northridge earthquake

2 小波包参数的空间相关性模型

2.1 空间相关性模型

基于 PEER-NGA 强震数据库, Yamamoto 和 Baker^[7]提出了上述 13 个小波包参数在特定地震场景和地质条件下(如震级、震中距、断层类型、场地状况等)的衰减模型。然而需要注意的是,该参数的衰减模型没有反映参数自身及不同参数间在空间分布上的相关程度。而这恰恰是呈空间分布的大型结构物在抗震防灾设计中不可忽略的因素。

本文运用地质统计学中的半变异函数,来衡量小波包参数空间分布的自相关程度。假设小波包系数的残差在地理空间中具有各向同性、二阶平稳的特点,其作为随机变量在空间中的相关性结构可以通过半变异函数 $\hat{\gamma}(h)$ 建立^[8]。

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(u_i+h) - z(u_i)]^2 \quad (4)$$

式(4)中, $z(u_i)$ 代表位于位置 u_i 的随机变量, $|N(h)|$ 为分离距离为 h 的成对数据的个数。在实际应用中,通常使用 Δh 作为分离距离的步长,因此, $|N(h)|$ 即代表了分离距离在 $[h-0.5\Delta h, h+0.5\Delta h]$ 范围内的成对观测资料的个数。常用的半变异函数拟合模型包括指数模型、高斯模型、球状模型以及倍率模型等等。通过以往地震动参数的空间相关性研究^[9-12],我们发现指数模型具有简单、准确等优点。因此,我们选用指数模型拟合小波包参数的半变异函数,如式(5)所示,

$$\hat{\gamma}(h) = a [1 - \exp(-3h/b)] \quad (5)$$

式(5)中, a 和 b 为半变异函数的两个特征参数,即基台值(无单位)和变程(公里)。需要特别指出

的是, 变程的大小反映了随机变量的空间自相关的范围。在指数模型中, 若数据的分离距离为一个变程, 它们之间只存在 5% 的空间的相关性。

2.2 加州北岭地震与台湾集集地震的空间相关性模型

美国太平洋地震中心 PEER-NGA 强震数据库完整收录了 1994 年北岭地震和 1999 年 Chi-Chi 地震中数百个地震台的地震波加速度时程。这些资料曾被广泛应用于地震波相关特性参数(如峰值加速度, 峰值速度, Arias 震度, 反应谱加速度)的区域空间相关性研究^[9-12]。以往研究充分表明, 上述两个地震地区代表了两种不同的场地分布类型。以深度 30 m 内平均剪力波速值(V_{s30})代表场地条件, 加州北岭地震地区 V_{s30} 的半变异函数的变程为 0 m, 表明该区域具有非均匀场地的分布特征; 而台湾集集地震地区对应的 V_{s30} 的半变异函数变程为

27 m, 具有均匀场地的特征^[10]。

本文采用 PEER-NGA 强震数据库的一个子数据库^[13]作为分析资料。其中收录了北岭地震中的 148 个台站及集集地震中的 381 个台站记录的水平地震波。这些记录已经由 PEER-NGA 强震数据库作正交转化为垂直于断层走向和平行于断层走向的地震波时程。其中, 本研究选取垂直于断层走向的记录, 与 Yamamoto 和 Baker^[7]的衰减模型所选用的数据库一致。图 2 显示了北岭地震地区以及集集地震地区的场地条件(V_{s30})及地震台站分布(黑色三角标识)。本文采用上述实测地震波与 Yamamoto 和 Baker^[7]衰减模型的残差作为空间相关性模型中的随机变量, 进而构建半变异函数以及 13 个小波包参数的空间相关性模型。

图 3 显示了表征地震波总能量的小波包参数 E_{acc} 的半变异函数, 并用指数模型进行加权最小方

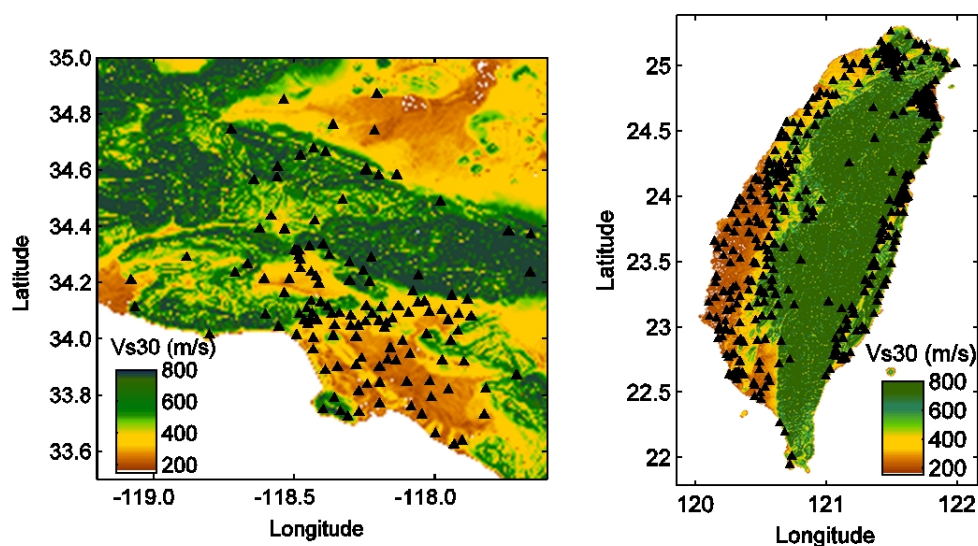


图 2 加州北岭地震(左图)和台湾集集地震(右图)的强震测站分布与区域场地条件分布

Fig.2 Distribution of regional site conditions and recording stations for the 1994 Northridge earthquake (left) and the 1999 Chi-Chi earthquake (right)

差拟合。分析表明, E_{acc} 的变程在北岭和 Chi-Chi 地震区域中分别估计为 9.7 km 和 41.6 km。这一结论与本文作者曾经研究的 Arias 强度的空间分布相一致^[10-11]。

图 4 进一步显示了其余 12 个小波包参数的半变异函数及其指数模型拟合曲线。其中, 加州北岭地震参数的变程范围在 7~20 km 之间, 而台湾集集地震的变程范围在 13~59 km 之间。通过比较, 可以归纳出不同区域场地对不同小波包参数的空间相关性的影响。表 1 给出了上述两个地震 13 个小波包

参数的半变异函数的变程值, 以及相对应的比值。根据变程比值的大小, 我们将小波包参数划分为四组, 以反映区域场地效应对不同小波包参数的影响程度。以组 I 为例, 这组中的四个参数分别为表征地震波能量的 E_{acc} 和 $E(a)_{major}$, 以及主要能量组小波包分布在时间轴的形心 $E(t)_{major}$ 和频率轴的形心 $E(f)_{major}$ 。两个地震所对应的变程比值高于 4, 反映出区域场地效应对这些小波包参数的地理空间相关性具有显著影响。而划分在组 II 和组 III 的小波包参数, 区域场地效应对其的影响有所减弱, 变程比值

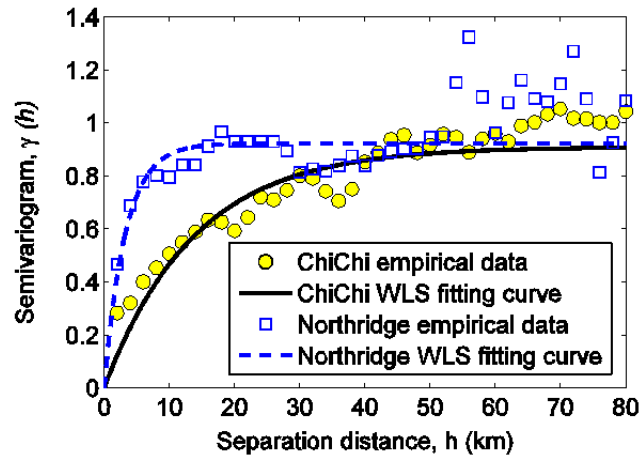


图3 1994年北岭地震和1999年台湾地震记录中小波包参数 E_{ac} 的半变异函数

Fig.3 Semivariograms of E_{ac} residuals for 1994 Northridge and 1999 Chi-Chi earthquake

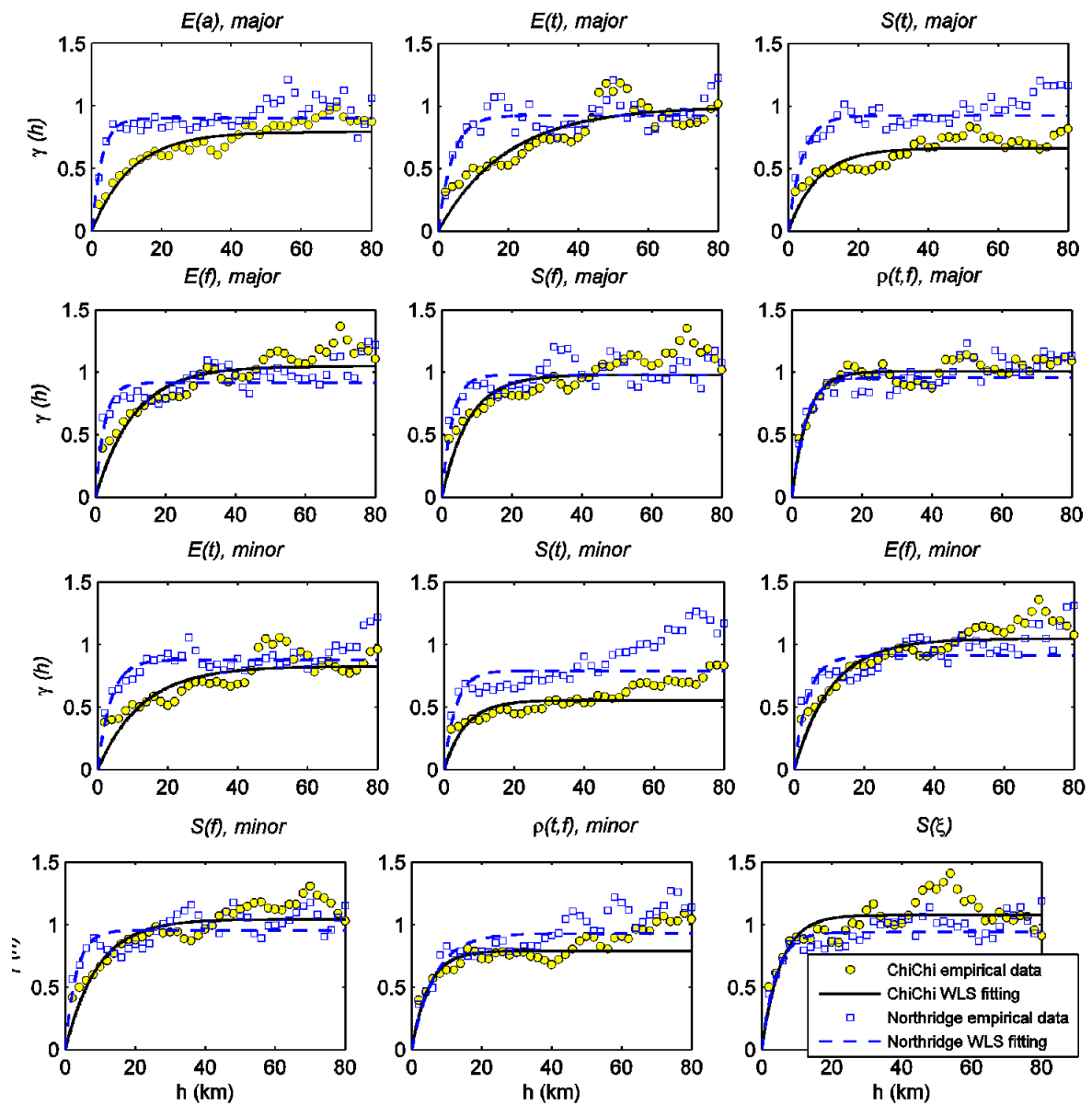


图4 1994年加州北岭地震和1999年台湾集集地震记录中12个小波包参数的半变异函数

Fig.4 Semivariograms of twelve wavelet parameter residuals for the Northridge and Chi-Chi earthquake

在 2 到 3 之间。需要特别指出的是,组 IV 中的小波包参数,即表征时-频分布相关性的 $\rho(t, f)_{major}$ 和 $\rho(t, f)_{minor}$ 以及随机参数 $S(\xi)$,其空间相关性几乎不受区域场地分布特性的影响。

表 1 北岭地震与集集地震中小波包参数的半变异函数变程归纳简表
Table 1 Correlation ranges of wavelet parameters and ratios between Chi-Chi and Northridge earthquakes

分组	小波包参数	北岭地震变程/km	Chi-Chi 地震变程/km	变程比值 (Chi-Chi/Northridge)	平均变程比值
I	E_{acc}	9.7	41.6	4.29	4.39
	$E(a)_{major}$	8.4	34.5	4.11	
	$E(t)_{major}$	12.1	58.8	4.86	
	$E(f)_{major}$	7.7	33.1	4.30	
II	$E(t)_{minor}$	11.3	38.1	3.37	3.07
	$E(f)_{minor}$	11.6	32.0	2.76	
III	$S(t)_{major}$	11.9	25.7	2.20	2.39
	$S(f)_{major}$	8.9	22.9	2.57	
	$S(t)_{minor}$	10.0	18.4	1.84	
	$S(f)_{minor}$	9.3	27.7	2.98	
IV	$\rho(t, f)_{major}$	11.5	13.2	1.15	1.08
	$\rho(t, f)_{minor}$	19.7	14.8	0.75	
	$S(\xi)$	12.3	16.4	1.33	

3 人工地震波的随机模拟与仿真

3.1 克里格插值法 (Kriging) 估计小波包参数

本节使用普通克里格插值 (Ordinary Kriging) 对加州北岭地震区域内空间分布的地震波小波包参数进行插值^[13]。该方法属于地质统计学内插估计的常规方法,其主要特点在于考虑了观测记录间的距离和样本团聚,从而在估值过程中体现出随机变量的空间分布与连续特性。对于未知地点的小波包参数的残差,其普通克里格估值为该研究区域内观测值的加权平均。

$$Z^e(u_0)=\sum_{i=1}^{N(u)}\lambda_i(u)\cdot Z(u_i),\sum_{i=1}^{N(u)}\lambda_i(u)=1 \tag{6}$$

式 (6) 中, $Z(u_i)$ 为研究区域内 u_i 位置的观测值, $N(u)$ 为观测地震台的总数, $\lambda_i(u)$ 为标准化权重,由随机变量在空间中的自相关程度即半变异函数确定,并引入了拉格朗日 (Lagrange) 乘子 μ 使克里格估值的标准差 $\sigma_e^2(u)$ 最小,如下式所示

$$L(\lambda_1(u), \cdots, \lambda_i(u), \mu(u)) = \sigma_e^2(u) + 2\mu(u) \left[\sum_{i=1}^{N(u)} \lambda_i(u) - 1 \right] \tag{7}$$

由此,北岭地区内任一地点的小波包参数都可以通过普通克里格法内插得到。图 5 为通过该方法得到的两个小波包参数 E_{acc} 和 $\rho(t, f)_{minor}$ 的残差分布图。由以上分析得出, E_{acc} 的残差变程为 9.7 km,而 $\rho(t, f)_{minor}$ 的残差变程为 19.7 km。从图 5 可以明显看出:分布具有较大的地理空间相关度。

3.2 加州北岭地震地区人工地震波仿真实例

为了验证该模拟人工地震波方法的可靠性,我们选取了位于美国加州洛杉矶市鲍德温山 (Los Angeles Baldwin Hills) 场址。PEER-NGA 强震数据库中收录了这一地震台在 1994 年加州北岭地震中记录的加速度时程,其数据库序列号为 985。本节通过盲测的方法,即在构造空间相关性模型以及人工地震波的过程中,从强震数据库中去除了鲍德温山地震台的实测记录。由此,鲍德温山场址模拟的人工地震波仅由空间相关性模型推求的小波包参数合成。图 6 给出了 1994 年加州北岭地震的震中位置,以及用于建立空间相关性模型的 147 个地震台站的分布。

通过克里格插值法推求的鲍德温山场址的 13 个小波包统计参数,并依据小波理论合成的人工地震波时程,如图 7 所示。可以看出,合成地震波与实测地震波在时域和频域中的特征(例如峰值加速度,加速度反应谱)高度一致。盲测结果表明:以小波包统计参数为代表的地震波空间变化特性,可以由本文构建的空间相关度模型充分表达,并通过时-频相关系数来体现地震波时程的非平稳性,最终仿真结果的时程与反应谱都与目标观测相吻合。

3.3 台湾集集地震地区人工地震波仿真实例

在本节中,我们采取与上节相同的盲测方法,对台湾地区车笼埔断层中段上盘与下盘的两个台站进行人工地震波仿真。图 8 给出了 1999 年台湾集集地震的震中位置,用于建立空间相关性模型

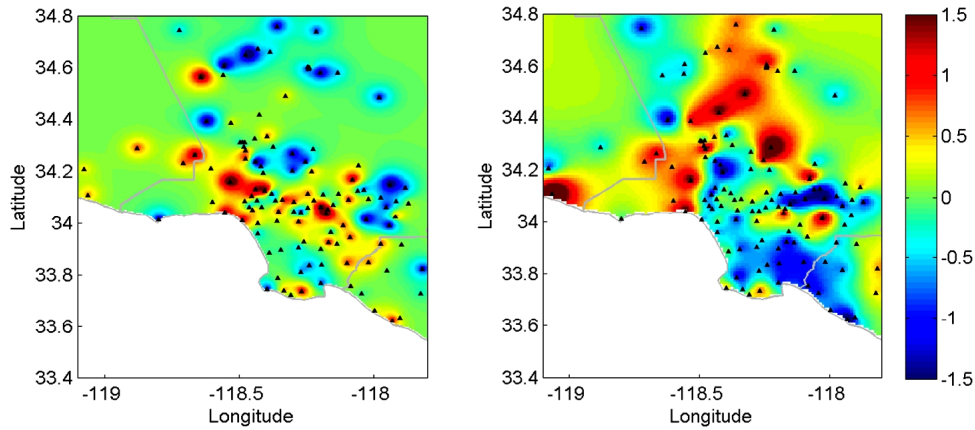


图5 1994年北岭地震中小波包参数的残差分布图: E_{acc} (左图)和 $\rho(t, f)_{minor}$ (右图)

Fig.5 Residual maps of wavelet parameters E_{acc} (left) and $\rho(t, f)_{minor}$ (right) for Northridge earthquake

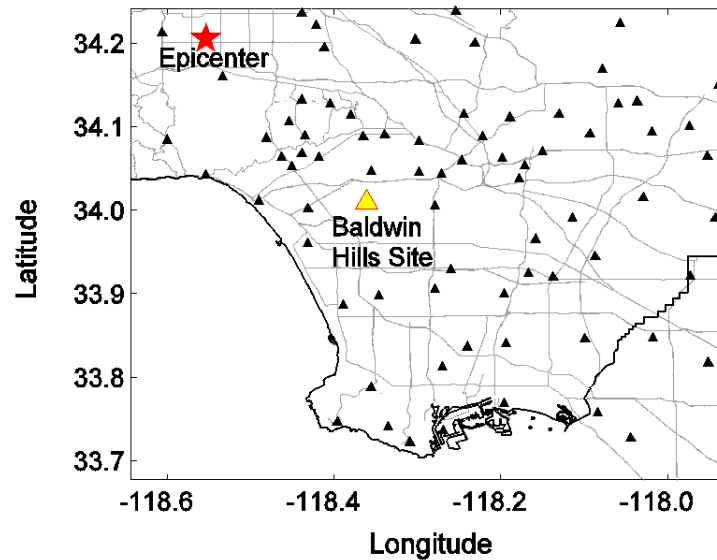


图6 1994年加州北岭地震震中(红色五角星)、鲍德温山地震台(黄色三角)以及该区域其他地震台站(黑色三角)

Fig.6 A map showing the epicenter of 1994 Northridge earthquake (red star), 147 recording stations (black triangles) and Los Angeles – Baldwin Hills site (yellow triangle).

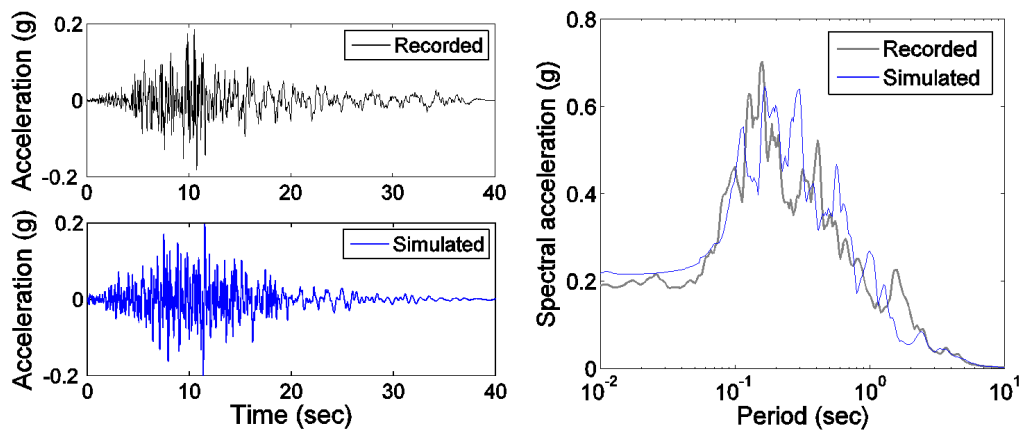


图7 模拟位于鲍德温山地震台的人工地震波时程, 以及其在1994年北岭地震中的实测地震时程(左图), 以及两者反应谱的对比(右图)

Fig.7 Simulated and recorded ground motion acceleration time histories at the Los Angeles – Baldwin Hills site during the 1994 Northridge earthquake, a comparison of their response spectra

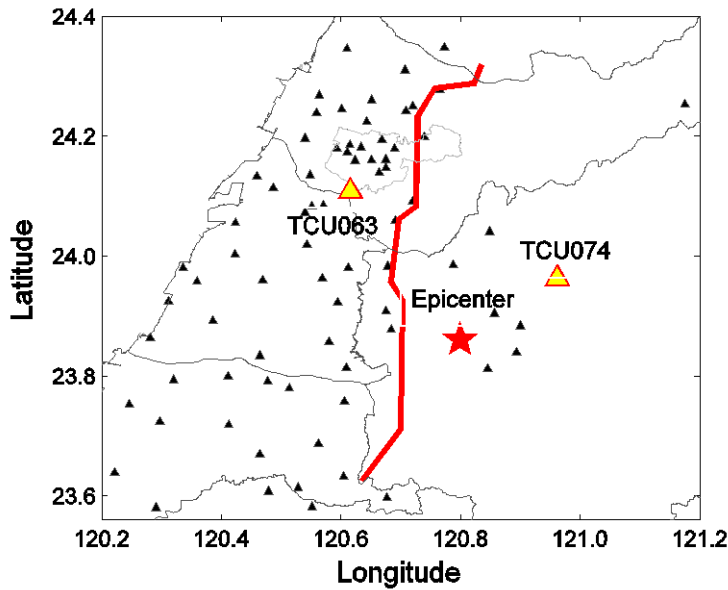


图 8 1999 年台湾集集地震震中 (红色五角星)、车笼埔断层 (红色粗线)、盲测仿真的 TCU063 地震台与 TCU074 地震台 (黄色三角), 以及该区域其他地震台站 (黑色三角)

Fig.8 A map showing the epicenter of 1999 Chi-Chi earthquake (red star), surface trace of the Chelungpu fault (red line), seismic recording stations (black triangles), the TCU063 and TCU074 site in the blind test (yellow triangles)

的 380 个地震台站的分布以及两个盲测台站的位置。其中, 位于车笼埔断层上盘的 TCU074 地震台在 1999 年集集地震中的断裂距离为 13.5 km, 位于位于车笼埔断层上盘的 TCU063 台站在 1999 年集集地震中的断裂距离为 9.8 km, 都属于近场范围。图 9 和图 10 分别给出了 TCU063 台站和 TCU074 台站在 1999 年集集地震中的实测地震波, 以及盲测实验中的仿真地震波。可以看出, 两个台站的仿真地震波与实测地震波在时域和频域中的特征, 以及峰值加速度和反应谱加速度都具备高度一致的特点。盲测结果表明, 以小波包统计

参数为代表的地震波空间变化特性, 可以由本文构建的空间相关度模型充分表达, 并通过时-频相关系数来体现地震波时程的非平稳性, 最终仿真结果的时程与反应谱都与目标观测相吻合。

4 结语

本文以小波包技术为基础, 对地震波时程进行分解和合成, 系统分析了 13 个反映地震波时频域统计特征的小波包参数的空间相关度, 并构建了以北岭地震地区为代表的非均匀场地, 和以台

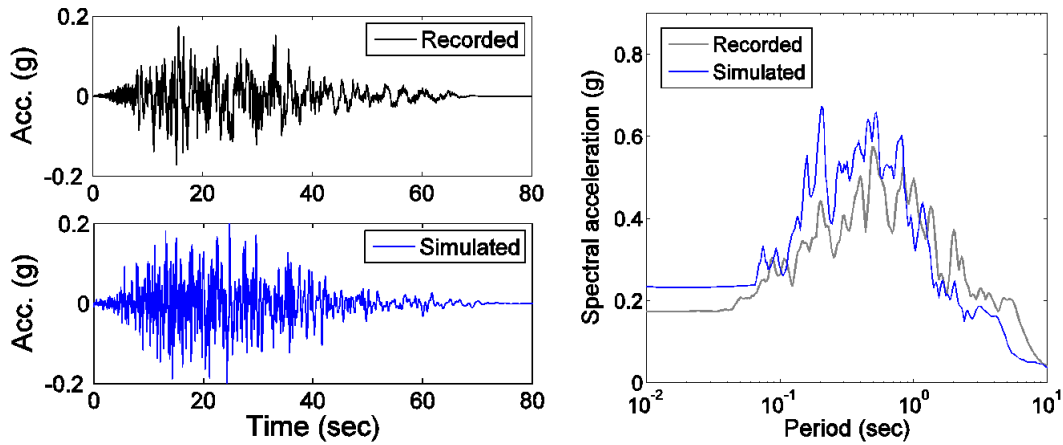


图 9 实测和模拟的 1994 年台湾集集地震震中 TCU063 地震波时程及反应谱的对比

Fig.9 Simulated and recorded ground motion acceleration time histories at the TCU063 site during the 1999 Chi-Chi earthquake, a comparison of their response spectra.

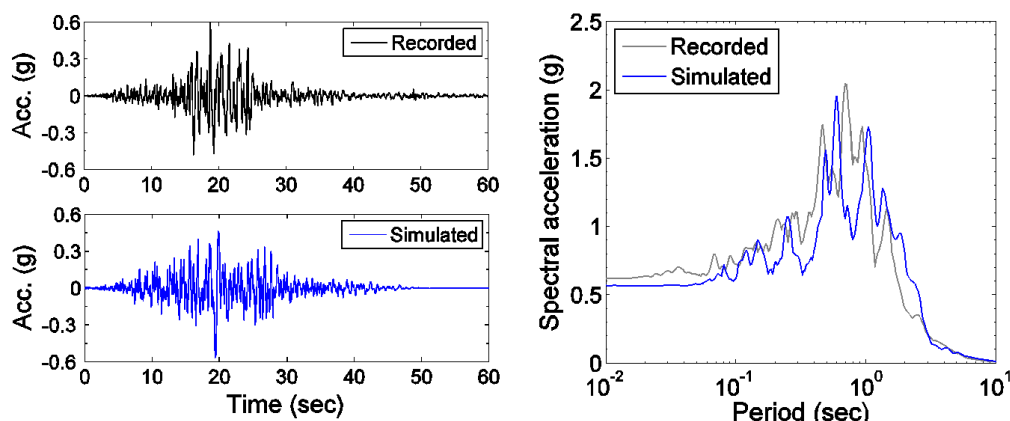


图 10 实测和模拟的 1999 年台湾集集地震中 TCU074 地震波时程及反应谱的对比

Fig.10 Simulated and recorded ground motion acceleration time histories at the TCU074 site during the 1999 Chi-Chi earthquake, a comparison of their response spectra.

湾集集地震地区为代表的均匀场地的空间相关性模型。研究表明,不同小波参数的空间相关性,在不同程度上受到区域场地分布特性的影响。定量的刻画这些因素,对生成空间分布的人工地震波十分重要。

在此基础上,本研究实现了对两个研究区域的盲测台站,即加州北岭地区的鲍德温山地震台和台湾集集地区的 TCU063 地震台的人工地震波仿真。算例结果在时程、峰值强度指标和反应谱等方面都与实际地震台站的记录数据显示出高度一致性。本文提出的方法充分考虑了区域场地的分布特性,对大跨度结构的地震波输入及抗震分析计算具有参考意义。

参考文献:

- [1] Wang G., Youngs R., Power M., et al. Design Ground Motion Library (DGML): An Interactive Tool for Selecting Earthquake Ground Motions [J]. *Earthquake Spectra*, 2015, 31(1):64-67.
- [2] 王刚, 地震波选择方法、工具、及其在基于性能的抗震设计中的应用 [C]//第四届粤港澳地震科技研讨会. 香港: 香港天文台, 2010.
- [3] Abrahamson N. Non-stationary spectral matching program [J]. *Seismological Research Letters* 1992, 63 (1) :30.
- [4] Zerva A. Seismic source mechanisms and ground motion models [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics* 1988 (3): 64-74.
- [5] Quek S.T., Teo Y.P., Balendra T. Non-stationary structural response with evolutionary spectra using seismological input model [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1990(19):275-88.
- [6] Naga P., Eatherton M.R. Analyzing the effect of moving resonance seismic response of structures using wavelet transforms [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2013, DOI: 10.1002/eqe.2370.
- [7] Yamamoto Y., Baker J.W. Stochastic model for earthquake ground motion using wavelet packets [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2013, 103 (6) : 3044-3056.
- [8] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* [M]. New York Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [9] Jayaram N., Baker J.W. Correlation model for spatially distributed ground -motion intensities [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2009, 38:1687 - 1708.
- [10] Du W., Wang G. Intra -Event spatial correlations for cumulative absolute velocity, Arias intensity, and spectral accelerations based on regional site conditions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2013, 103(2A):1117-1129.
- [11] Wang G., Du W. Spatial cross -correlation models for vector intensity measures (PGA, Ia, PGV and SAs) considering regional site conditions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2013, 103 (6):3189-3204.
- [12] Loth C., Baker JW. A spatial cross-correlation model of ground motion spectral accelerations at multiple periods [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2013, 42(3):397-417.
- [13] Boore DM, Atkinson GM. Ground -motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 99-138.