

卢龙地震动场的预测*

李启成, 池红岩, 宋志勇

(黑龙江科技学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 分别用经验格林函数方法和随机方法对卢龙 $M_L 5.7$ 地震的地震动进行模拟对比研究, 结果显示: 用经验格林函数方法模拟得到的波形和反应谱都与原始记录接近, 用该方法模拟的地震动, 无需掌握场地的具体情况; 对于无小震记录的地区, 如果知道了其场地情况与附近有小震记录地区相似, 可以用该小震记录作为经验格林函数模拟地震动。对于不能用经验格林函数方法模拟地震动的地区, 可以用随机方法模拟地震动。用随机方法模拟地震动具有简单、方便、无需小震记录的优点。根据卢龙场地具体条件, 尝试用两种方法结合预测了卢龙地震加速度场, 结果比较好地反映了断层周围加速度的峰值分布规律。

关键词: 地震动; 卢龙; 随机方法; 经验格林函数

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0240-06

0 引言

地震复发是指地震在一定的时间内在原地重复发生。20世纪70年代以来国内外地震学者对地震的复发模式进行了大量研究, 认为中国大陆内部的某些地区或构造带上地震具有重复发生特征(闻学泽, 1999)。美国科学家从20世纪60年代注意到, 在加州帕克菲尔德的圣安德烈斯断层, 大约平均每隔22年就会发生一次5~6级地震(张国民等, 2009)。虽然有个别地震的发生没有以22年为周期, 但其震级都在5~6级, 说明地震在原地重复发生, 且震级相似的规律是存在的。这个规律是我们用已发生地震的地震参数预测未来地震动的重要依据。

建筑物的破坏主要是由地震动造成的。如果能预测出未来地震的地震动场, 就能有针对性地对建筑物采取抗震设防措施, 制定未来地震的救援预案, 评估震害损失程度, 制定震后救援、恢复的相关措施, 保持社会稳定。

1 地震动的模拟方法

地震动的模拟主要有格林函数方法和随机的

方法。格林函数方法分为理论格林函数方法和经验格林函数方法, 这两种方法都是以表示定理为基础(Aki, Richards, 1980), 表示定理使得求解地震动的问题归结成求解震源位错时间函数和格林函数的问题。震源位错时间函数一般用斜坡函数或指数函数表示; 计算点源位错在真实地球介质中的响应即理论格林函数的前提是设定简单的介质模型, 一般是假定地球介质是均匀弹性半空间或均匀成层弹性半空间等, 这并没有反应复杂的地壳介质结构, 所以理论格林函数往往是在较为理想的假定条件下获得的。

Hartzell (1978) 提出了用大地震的前震或余震作为经验格林函数合成大地震的半经验方法(经验格林函数方法)。由于该方法要求大小地震具有相同的震源机制, 并且小震记录本身已经包含了传播介质的影响, 所以用这样的小震记录作为格林函数更能准确地反映震源和地震波传播路径影响, 并能克服计算理论格林函数的困难, 因此得到了广泛应用。大量研究结果表明, 用经验格林函数方法模拟的结果, 不论是波形还是反应谱都与原始记录较好吻合(刘启方, 2005)。同时, 由于格林函数已经反应了地表的地震反应, 用经验格林函数计算地震动无需掌握地表的具体情况。

* 收稿日期: 2011-09-08.

基金项目: 黑龙江省教育厅2011年科研项目(12513082)资助.

用随机方法模拟地震动的发展主要分两个阶段，最初是以 Boore (2003) 为代表的用静力学拐角频率模拟地震动，当震源尺度等物理量确定后，静力学拐角频率就确定了。王海云 (2004) 认为用静力学拐角频率模拟地震动辐射的能量与子断层划分有关，而地震动辐射的能量与子断层划分有关在物理上是不成立的。为解决这个问题，Motazedian 和 Atkinson (2005) 提出动力学拐角频率的概念，并用其模拟地震动，动力学拐角频率的数值随着破裂的发展而减小，每一时刻的拐角频率取决于积累起的破裂面积，破裂以较高的拐角频率开始，而以较低的拐角频率结束。动力学拐角频率的提出使得模拟地震动的结果与子断层的划分无关。

虽然用经验格林函数方法模拟地震动的结果无论是波形还是反应谱都与原始记录较好吻合，但存在小震记录匮乏的问题。随机方法模拟地震动无需小震记录，在没有小震记录的地点，如果掌握了场地介质情况，可以采用随机方法获得地震动时程；如果不掌握场地介质情况，但能判断出这些场地和路径介质都与小震记录的相似，也可以采用经验格林函数方法获得地震动时程。本文利用卢龙有限的小震记录作为经验格林函数，采用经验格林函数方法获得卢龙地震的地震动时程。

2 用经验格林函数方法模拟卢龙地震动

1982 年 10 月 19 日河北卢龙发生了 $M_L5.7$ 地震，震中位置 (39.877°N , 118.923°E)，震源深度为 9.6 km，中国地震局工程力学研究所 12# 台站观测到了这次地震。卢龙地震断层面走向为 $\text{N}56^\circ\text{E}$ ，倾角 43° ，倾向西北 (罗奇峰, 1989)。同日几乎在相同的位置 (39.878°N , 118.87°E) 发生了 $M_L4.2$ 余震，12# 台站也记录到了这次余震，笔者以 4.2 级余震作为经验格林函数合成主震。

2.1 卢龙地震动参数

表 1 是两次地震的相关参数，把上述参数代入有关公式 (罗奇峰, 1989) 可以计算出 $N=3$ ，也就是用 9 条子事件 (4.2 级小震) 合成卢龙地震 5.7 级主震。

表 1 两次地震的相关参数
Tab. 1 Related parameters of two earthquakes

参数	地震名称	
	主震	余震
震级	5.7	4.2
地震矩/ ($\text{dyne} \cdot \text{cm}$)	3×10^{23}	5.3×10^{21}
等效半径/km	1.9	0.6
应力降/bar	20	10
位错量/cm	8.5	2.7
上升时间/s	0.14	0.035
速度/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	破裂速度 = 2.5	剪切波速 = 3.3

2.2 模拟结果

图 1 是卢龙 $M_L4.2$ 余震在南北方向的加速度记录，用余震记录作为经验格林函数。图 2 是卢龙 $M_L5.7$ 地震在南北方向记录以及用经验格林函数方法模拟得到的加速度时程，图 3 是在上述两种情况下反应谱比较，可以看出用经验格林函数方法模拟得到的波形和反应谱都与原始地震记录比较接近。

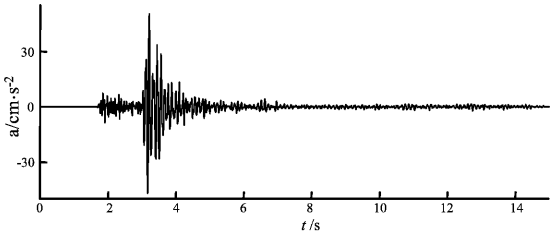


图 1 卢龙 $M_L4.2$ 余震南北方向加速度记录
Fig. 1 N-S component acceleration record of Lulong $M_L4.2$ aftershock

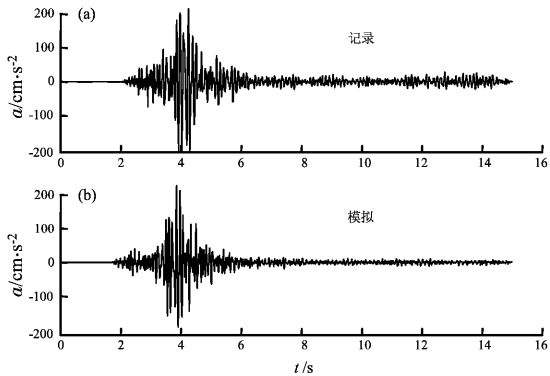


图 2 卢龙 $M_L5.7$ 地震南北方向记录及模拟的加速度时程

Fig. 2 N-S component waveform of the Lulong $M_L5.7$ earthquake and its acceleration time history simulated by Empirical Green's Function

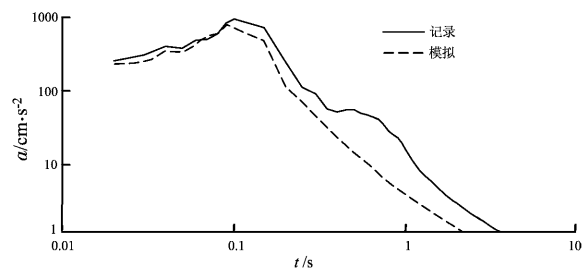


图3 卢龙 $M_L5.7$ 地震南北向记录
及模拟的加速度反应谱比较

Fig. 3 Comparison between the N-S component acceleration response spectrum and the simulated one of the Lulong $M_L5.7$ earthquake

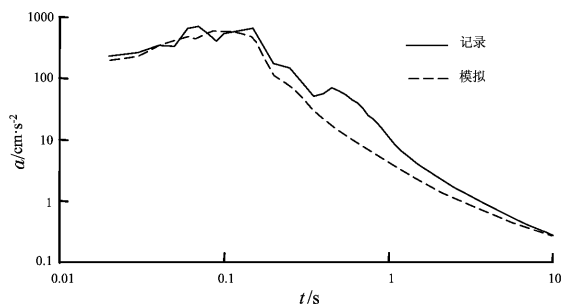


图6 卢龙 $M_L5.7$ 地震东西方向记录
及模拟加速度反应谱的比较

Fig. 6 Comparison between the E-W component acceleration response spectrum and the simulated one of the Lulong $M_L5.7$ earthquake

图4是卢龙 $M_L4.2$ 余震东西方向的加速度记录,图5是卢龙 $M_L5.7$ 地震东西方向记录以及用经验格林函数方法模拟得到的加速度时程,图6是在上述两种情况下反应谱的比较,可以看到用经验格林函数方法模拟得到的波形、反应谱都与原始地震记录符合。

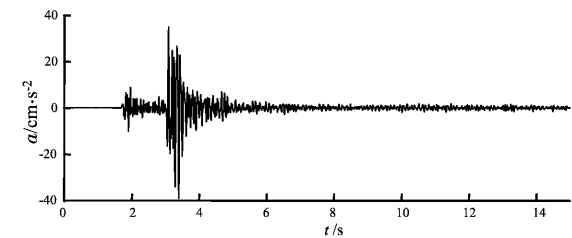


图4 卢龙 $M_L4.2$ 余震东西方向加速度记录
Fig. 4 E-W component acceleration record
of Lulong $M_L4.2$ aftershock

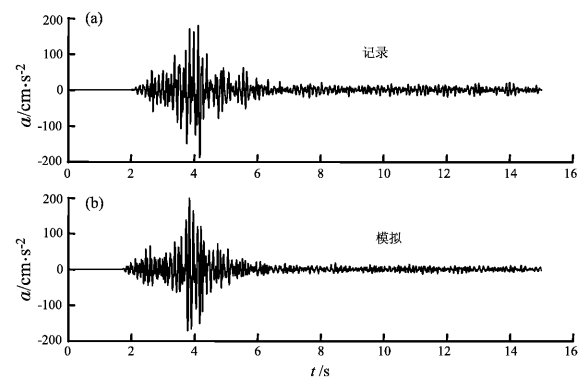


图5 卢龙 $M_L5.7$ 地震东西方向记录
及模拟的加速度时程

Fig. 5 E-W component waveform of the Lulong $M_L5.7$ earthquake and its acceleration time history simulated by Empirical Green's Function

3 用随机方法模拟卢龙地震动

3.1 卢龙及附近地区的地下介质分布及参数的确定

卢龙及附近地区地下界面及地壳介质分布见图7。G是花岗岩质层的上部界面,C是玄武岩质层的顶部截面,M是莫霍面。由于卢龙地震震源深度为9.6 km,从图中可以看出,地震震源附近为花岗岩,其密度取为 $2.75 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (薛志照,1986),其它主要参数见表2。

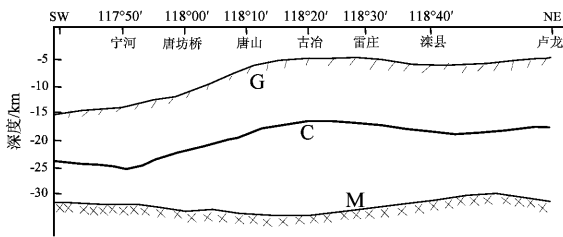


图7 卢龙及附近地区地壳介质分布 (薛志照,1986)
Fig. 7 Crustal media distribution in Lulong
and its surrounding area (Xue, 1986)

表2 卢龙地震参数					
Tab. 2 Parameters of Lulong earthquake					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
矩震级	5.1	观测点距震源距离/km	10.5	震源附近的岩石密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.75×10^3
震源附近的剪切波速/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	3.5	观测点自由表面因子	2.1	应力降/bar	20
辐射因子	0.55	包线函数	指数函数	脉冲子断层的百分比/(%)	50

3.2 模拟结果

图8是用随机方法中的动力学拐角频率（Motazedian, Atkinson, 2005）模拟得到的卢龙地震水平方向加速度时程（10个加速度时程之一）与东西向记录对比图。从图中可以看出，两者加速度的最大值基本一致，但用随机方法模拟的地震动时程的后半部分与东西向记录差别比较大。

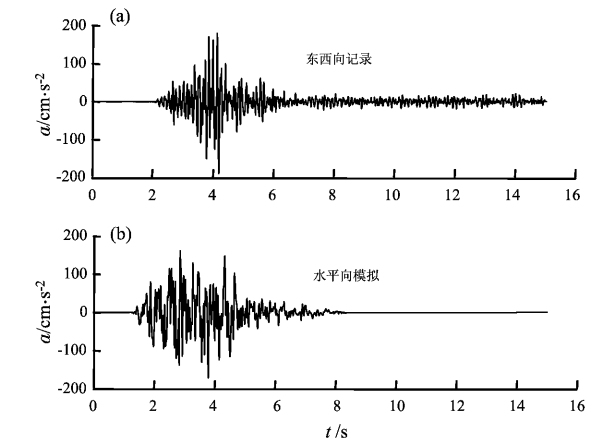


图8 用随机方法动力学拐角频率模拟卢龙地震水平向与东西向记录的加速度时程对比
Fig.8 Acceleration time history comparison between the E-W component and the horizontal simulation by dynamic corner frequency in stochastic method of Lulong M_L 5.7 earthquake

图9是用动力学拐角频率模拟卢龙地震得到的水平向加速度反应谱与加速度记录反应谱的比较。图中的2条虚线分别表示东西和南北向加速度记录，10条黑实线是用动力学拐角频率计算得到的水平向加速度反应谱，粗实线为平均加速度反应谱曲线。从反应谱曲线可以看出用随机方法计算得到的反应谱在高频部分和低频部分都与原始的东西和南北向加速度记录符合得比较好。

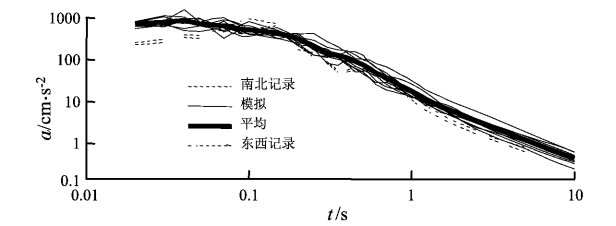


图9 用随机方法动力学拐角频率模拟卢龙地震水平向加速度反应谱与记录反应谱对比
Fig.9 Response spectrum comparison between the E-W component and the horizontal simulation by dynamic corner frequency in stochastic method of Lulong M_L 5.7 earthquake

4 卢龙地区地震动场的模拟

4.1 卢龙地区的地质构造

卢龙地处（39.89°N，118.89°E）附近，面积为961 km²。地形南北长、东西窄。在北部，燕山山脉列屏横亘；在东部，燕山支脉南北纵贯；在中部，又有燕山余脉东西绵延。全域主要分低山、丘陵、平原和盆地四种地貌类型，低山、丘陵主要分布在县境中、北部，占全县总面积的81.1%；平原主要分布于县境南部，盆地主要分布在西洋河扇形盆地。

卢龙境内太古界地层分布最广，卢龙东部主要分布着太古界片麻岩层，西部广泛分布着矽质灰岩层（李文军，2004）。图10中，观测点1~27的地表是太古界片麻岩层（李文军，2004），由于片麻岩强度低，其自由表面因子取为2.3，其余的参数同表2；观测点55~81的地表是矽质灰岩层，由于矽质灰岩很坚硬，所以其自由表面因子取为2.2，其余的参数同表2；观测点28~54的地表情况不是很清楚，但是由于这些点距离比较近，假定这些点的场地介质相似，笔者用观测点41附近小震记录作为经验格林函数模拟这些观测点的地震动。

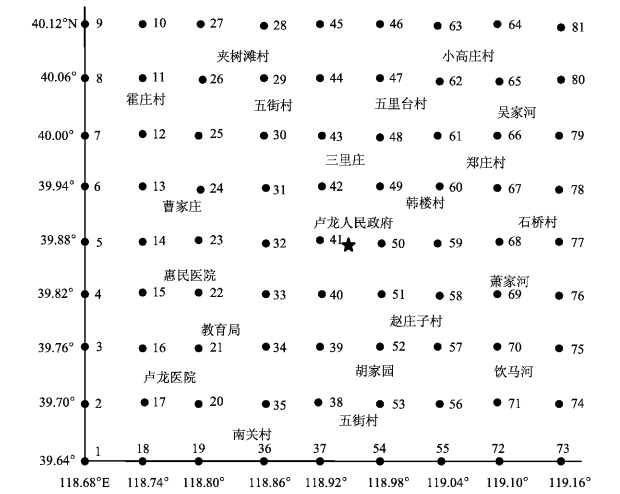


图10 卢龙行政区和观测点位置
Fig.10 Administrative region of Lulong and the position of observational points

4.2 卢龙地区的地震动场的模拟

图11是用经验格林函数方法分别模拟观测点37、38和39的地震动时程，其地震动峰值分别为

67 cm/s²、122 cm/s² 和 180 cm/s²，说明随着震中距的减小，地震动幅值逐渐增大。图 12 是用随机方法分别模拟得到的观测点 21、17 和 1 的地震动时程，其地震动峰值分别为 128 cm/s²、77 cm/s² 和 56 cm/s²，随着震中距的增大，地震动幅值逐渐减小。以上模拟结果表明，无论是经验格林函数方法，还是随机方法都能比较好地反映地震动的基本特点。

在此基础上，笔者模拟了卢龙共 81 个观测点（图 10）的地震动时程，进一步得到了各点的峰值加速度的空间分布（图 13）。从图中可以看出，地震动峰值加速度随震源距的增加而减小，反映了断层周围地震动场的分布特征。

5 结论

经验格林函数和随机方法都是模拟地震动的常用方法。我们用以上两种方法分别模拟了卢龙地震动，用经验格林函数方法模拟的地震波波形

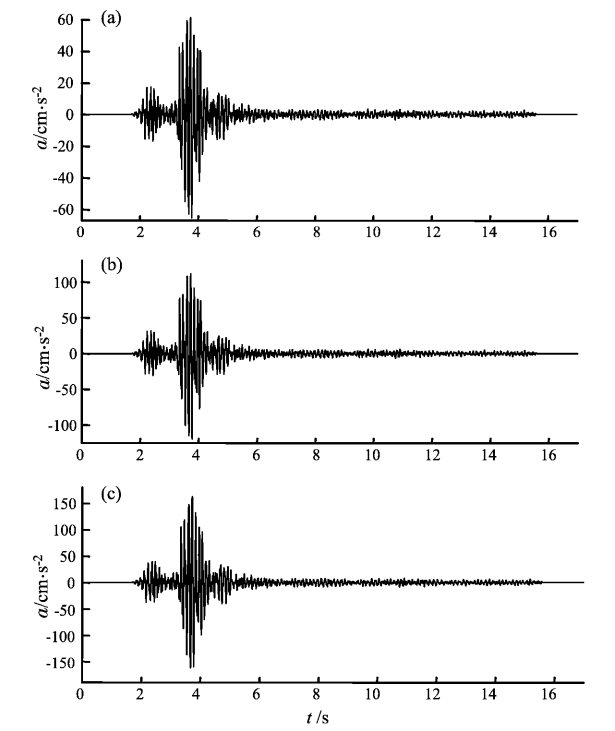


图 11 用经验格林函数法模拟观测点东西向地震动时程
(a) 测点 37；(b) 测点 38；(c) 测点 39
Fig. 11 E-W component ground motion time history records simulated by Empirical Green's Function at observational points

和反应谱都与记录符合得比较好，并且无需掌握场地的具体参数。对于无小震记录的地区，如果知道了其场地情况与附近有小震记录地区相似，

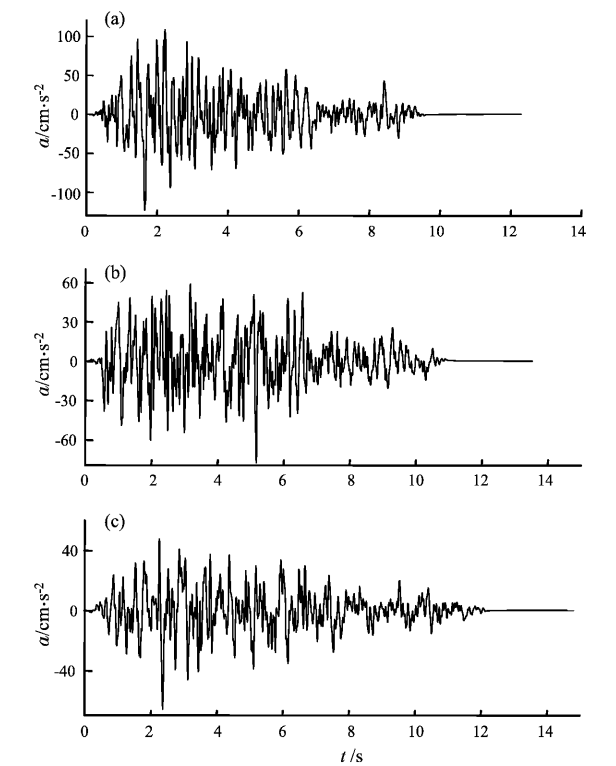


图 12 用随机方法模拟观测点水平向地震动时程
(a) 测点 21；(b) 测点 17；(c) 测点 1
Fig. 14 Horizontal ground motion time history records simulated by stochastic method recorded at observational points

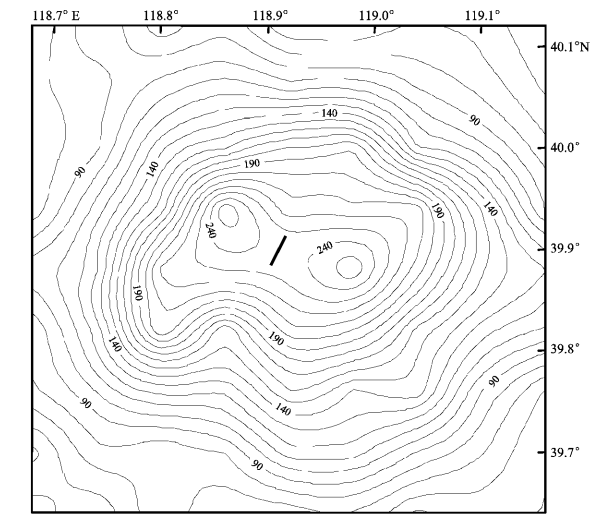


图 13 卢龙 M_L5.7 地震地震动峰值加速度分布
Fig. 13 Peak acceleration distribution of Lulong M_L5.7 earthquake

可以用该小震记录作为经验格林函数模拟地震动。用随机方法模拟地震动无需小震记录,但必须掌握场地介质情况,其模拟的地震动峰值和反应谱都与记录相符,但模拟的波形往往与原始记录拟合得不够理想。

为模拟卢龙地震动场,我们充分利用卢龙地区小震记录,采用经验格林函数方法模拟了卢龙部分场地的地震动;对于没有条件用经验格林函数方法模拟地震动的场地,用随机方法模拟地震动。两种方法互相补充,可以称之为用混合方法模拟地震动。我们用混合方法模拟了卢龙地震峰值加速度场,模拟的结果符合断层周围峰值加速度衰减规律,说明用混合方法模拟地震动可以用来估计场地地震动过程。

参考文献:

李文军. 2004. 用余震序列的数字地震资料对卢龙地区活动构造的研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.

- 刘启方. 2005. 基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 罗奇峰. 1989. 近场加速度的半经验合成[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 王海云. 2004. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 闻学泽. 1999. 中国大陆活动断裂的段破裂地震复发间隔的经验分布[J]. 地震学报, 21(6): 616-622.
- 薛志照. 1986. 唐山地震震源深度分布与地壳结构的关系[J]. 地震地质, 8(3): 69-78.
- 张国民, 钮凤林, 召志刚. 2009. 帕克菲尔地地震预报实验场: 2004年6级地震及其对地震物理和地震预测研究的影响[J]. 中国地震, 25(4): 345-355.
- Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods [M]. New York: W H Freeman & Co Ltd.
- Boore D M. 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method [J]. Pure Appl Geophys, 160(3-4): 635-676.
- Hartzell S H. 1978. Earthquake aftershock as Green's function [J]. Geophys Res Lett, 5(1): 1-4.
- Motazedian, Atkinson. 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency [J]. BSSA, 95(3): 995-1010.

Prediction of Ground Motion Field in Lulong

LI Qi-cheng, CHI Hong-yan, Song Zhi-yong

(Heilongjiang Institute of Science and Technology, Heilongjiang 150027, Harbin, China)

Abstract

We respectively use Empirical Green's Function and stochastic methods to simulate the ground motion of Lulong $M_L 5.7$ earthquake. The results show that the waveform and response spectrum simulated by Empirical Green's Function method are consistent with the original recordings, and it needn't master actual conditions of site. If the site condition of study area without the recordings of small earthquakes are similar with its vicinity with the recordings of small earthquakes, we can use the small earthquake recordings as the Empirical Green's Function to simulate the ground motion. In addition, we can use stochastic method to simulate ground motion in the areas that the Empirical Green's Function method can not be used. The stochastic method has advantages of simplicity, convenience and do not need small earthquake recordings. On the basis of actual conditions of Lulong field, we combine the two method to predict the acceleration field of Lulong earthquake. The results reflect the distribution of peak acceleration around the fault.

Key words: ground motion; Lulong; stochastic method; Empirical Green's Function