文章编号:1000-1301(2009)02-0013-06

用经验格林函数法和随机方法模拟卢龙地震的比较

李启成[1,2],景立平[1],李中宁[3]
(1. 中国地震局 工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080;2. 黑龙江科技学院,黑龙江 哈尔滨 150027;
3. 黑龙江大学,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:在介绍用经验格林函数方法和随机方法模拟地震动的基础上,分别用这两种方法模拟了卢龙5.7级地震。模拟结果表明,用经验格林函数方法模拟地震动的结果与地震记录符合得很好。用随机方法模拟地震动在高频部分与地震动记录符合得比较好,而在中、低频部分符合得不太好。两种方法比较,经验格林函数方法模拟的结果更符合实际记录。但随机方法具有计算简单、无需小震记录的优点,因此发展随机的方法是有意义的。随机方法中中、低频部分不太符合的原因是随机方法中的很多经验关系是在美国大陆得到的。因此建议加强对中国大陆经验关系的研究,并把中国大陆的经验关系加入到随机方法中,使随机的方法成为中国大陆普适的模拟地震动的方法。

关键词:经验格林函数;地震动;随机的方法
中图分类号:P315.963 **文献标志码**:A

The comparison of simulated ground motions of Lulong Earthquake between empirical Green function method and stochastic method

LI Qicheng[1,2], JING Liping[1], LI Zhongning[3]
(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China; 3. Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The ground motions of Lulong Earthquake ($M_L = 5.7$) are simulated with the empirical Green function method and stochastic method, respectively. The results show that the ground motion simulated by empirical Green function is consistent with the records very well and the ground motion stimulated by stochastic method is consistent with the records in high frequencies, and is not consistent with the records very well in middle and low frequencyies. To compare the two methods, the results calculated from empirical Green function are more suitable for China main land and the stochastic method has two advantages: simple computation and may be used without small earthquakes. Furthermore, the results simulated by stochastic method is not suitable to records in low and middle frequencies, because the used experiential relations were gotten from America continent. So, we suggest to study the experiential relations on Chinese continent and use the experiential relations to the stochastic method and make this method suitable for Chinese continent.

Key words: empirical Green function; ground motion; stochastic method

引言

Hartzell[1]提出了用主震的前震或余震作为经验格林函数来合成主震的半经验方法。其基本思想是:将

收稿日期:2008-10-20; **修订日期**:2008-11-21
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)"近场强地震动的破坏作用及其空间分布规律"(2007CB714201)
作者简介:李启成(1963-),男,讲师,博士研究生,主要从事岩土工程、地球物理、应用光学、物理学研究. E-mal: Liqichengmax@163.com

大震的震源看成是由一系列小震的震源构成的，选择适当的小震记录作为这些点源引起的地面反应即经验格林函数，然后按一定的破裂方式，将这些经验格林函数叠加，就能得到大震的地震动时程曲线。由于小震记录本身已经包含了震源的破裂过程、传播介质的复杂性影响，所以用小震记录合成的大震记录也考虑了震源、传播介质的复杂性，并能克服理论计算格林函数的困难，因此得到了广泛的应用。

Irikura[2]从理论上证明并结合实际震例验证了经验格林函数方法的有效性，以后有很多学者对经验格林函数方法进行了研究改进[3-13]。本文对他们的工作进行了回顾，并用经验格林函数方法模拟了中国卢龙地震。

工程界普遍认为地震动是随机过程，因此，地震工程学家常用随机方法合成地震动。随机方法的基础工作是由 Hanks 和 McGuire[14-15]完成的，他们把地震动幅值谱的地震学模型和高频地震动是随机的工程概念相结合，假定在弹性半空间的远场加速度是有限带宽、有限持时的高斯白噪声，其震源谱由单一的拐角频率描述，而这单一的拐角频率又取决于震源尺度[16,17]。上述地震工程学家推导出了非常简单的加速度峰值关系，用这个关系的计算结果与16个地震记录吻合得很好。Boore[18]总结并发展了他们的工作，使得用随机方法不仅可以在时间域内模拟地震动，还可以用反应谱的方法描述地震动，并且使随机方法可以应用到任意复杂的模型，但没有改变该方法简单易于操作的特点。本文把他的工作成果首次应用于中国卢龙，以检验随机方法在中国大陆的有效性。在此基础上，将比较经验格林函数方法和随机方法在模拟地震动中的作用。

1 人工合成地震动简介

1.1 经验格林函数方法简介

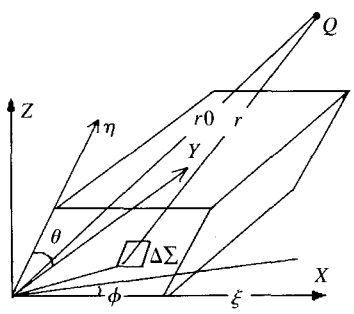

图1 Haskell 矩形断层模型中的断层平面和坐标

Fig. 1 Coordinate and fault plane geometry, The Haskell model of a rectangular fault is used

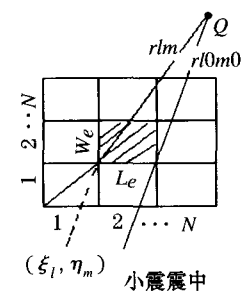

图2 根据小震的尺寸，把大地震的断层划分为 $N\times N$ 个单元

Fig. 2 Mainshock fault plane divided into $N\times N$ elements, an element corresponds to the dimension of a small event

Haskell[19]提出简化的矩形平面断层模型（如图1）。在该断层面上，破裂均匀发生。有了断层面的表示，我们可以用下面公式由小地震合成大地震[2]。

$$G(x,t)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}\frac{R_c(\theta_{lm},\varphi_{lm})\,r_{lomo}}{(\theta_{lomo},\varphi_{lomo})\,r_{lm}}\times G_{elomo}(x,t-t_{elm}-t_{dklm}) \tag{1}$$

以上公式中大地震的初始破裂点位于坐标原点。如果初始破裂点在任意一点(ζ_0,η_0)，公式(1)中的t_{dklm}为：

$$t_{dklm}=r_{lm}/v_c+\sqrt{(\zeta_l-\zeta_0)^2+(\eta_m-\eta_0)^2}/v_r+(k-1)\tau_{elm} \tag{2}$$

$$N=L/L_e=W/W_e=D/D_e=\tau/\tau_e=(M_0/M/_{0e})^{1/3} \tag{3}$$

如图2，把大震断层分成 $N\times N$ 个子断层。参照图1和图2，说明公式(1)，(2)和(3)中的各量的意义如下：

$G(x,t)$是合成的大震记录、G_{elomo}是已知的小震记录、R_c 是子震辐射系数、R_{ce}是小震的辐射系数、r_{lomo}是小震的震中到观测点的距离、r_{lm}是子震到观测点的距离、ζ_l,η_m 是断层面坐标系中，破裂前缘位置坐标、ζ_0,η_0是断层面坐标系中坐标原点、v_c 是波的传播速度、v_r 是断层破裂速度、$t_{elm}=(r_{lm}-r_{lomo})/v_c$、$\tau_{elm}$是小震的上升时间、$t_{dklm}$是由于破裂的传播和波的传播引起的时间延迟、$L,W,D$ 和 τ 分别为大震断层的长、宽、位错和上升时间、L_e,W_e,D_e 和 τ_e 分别是子震的长、宽、位错和上升时间、M_0 和 M_{0e}分别为大震和子震的地震矩。公式

(1) ~ (3)就是经验格林函数方法的基本公式。

罗奇峰[10]对经验格林函数方法中确定子事件的方法进行了改进,提出了如下公式:

$$N = \frac{L}{L_e} = \frac{\lambda}{\lambda_e}\left[\left(E\frac{M_0}{M_{0e}}\right)^{1/3}\right] \tag{4}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma} \tag{5}$$

公式中 $\lambda\ \sqrt{LW/\pi}$是等效半径,L 是正方形的边长,M_0 是地震矩,$\Delta\sigma$ 是应力降,[ ]是取整符号,含下标 e 的量为小震参数,大地震断层可以划分为 N^2 个子断层。

1.2　用随机方法描述地震

Boore[18]认为:方便地计算场地某点的地震动谱($Y(M_0,R,f)$)的方法是把地震动分解成震源(E),路径(P),场地(G)和地震动的类型转换函数(I)的乘积:

$$Y(M_0,R,f) = E(M_0,f)P(R,f)G(f)I(f) \tag{6}$$

公式中的 M_0 是地震矩。这就是随机点源模型的基本公式。

2　用人工方法合成卢龙地震

2.1　用经验格林函数法模拟卢龙地震

1982 年 10 月 19 日河北省卢龙发生了 $M_L = 5.7$ 的地震,震源位于 39.877N,118.923E,震源深度为 9.6km。在 12#台站(39.878N,118.87E)观测到了这次地震。卢龙地震断层面的走向为北 56°东,倾角 43°,倾向西北[10]。同日几乎位于相同的位置(39.878,118.923E)发生了 $M_L = 4.2$ 的余震,在 12#台站也记录到了这次余震。

表 1 是两次地震的相关参数。把上述参数代入公式(4)就可以计算出 $N = 3$,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)。卢龙地震断层面离散图如图 3,断层从中心开始同时向四周破裂。

表 1　两次地震的相关参数

Table 1　The relative parametes of two earthquakes

	主震	小震
震级	5.7	4.2
地震矩/(dyne - 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	1.4
上升时间/s	0.4	0.14
破裂速度/(km · s^{-1})	2.5	
剪切波速/(km · s^{-1})	3.3	

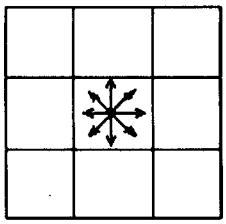

图 3　卢龙地震断层面划分子断层情况

Fig. 3　Dividing fault plane of Lulong earthquake into subfault

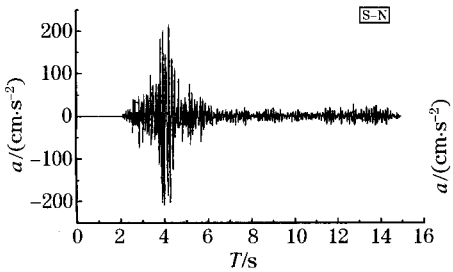

图 4　卢龙地震 S-N 方向加速度记录时程

Fig. 4　Lulong earthquake acceleration record time series in the direction of S-N

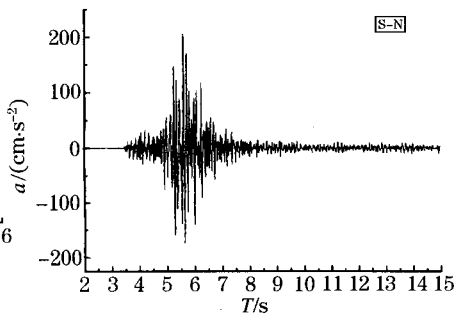

图 5　用格林函数法合成卢龙 S-N 方向加速度时程

Fig. 5　The synthetic acceleration time series with Green'sfunction at Lulong in the direction of S-N

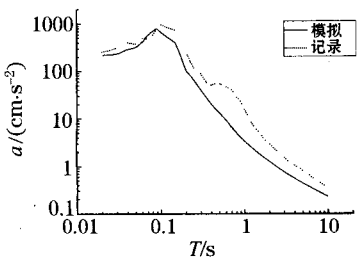

图 6　卢龙地震 S-N 方向记录反应谱和计算反应谱比较

Fig. 6　Comparison between recorded response accelerogram's spectrum and computed response spectrum of Lulong Earthquake in S-N direction

图4是卢龙地震S-N方向的地震记录,图5是用经验格林函数方法合成的S-N方向地震动,两者符合得比较好。图6是两种情况下的反应谱(虚线是记录反应谱,实线是计算反应谱)。可以看出,用经验格林函数方法合成的地震动反应谱与实际记录反应谱总体符合得比较好,特别是周期在1~10s的低频段和周期在0.01~0.1s的高频段,符合得非常好。但在周期为0.1~1s的中段符合得不够好。

图7是E-W方向地震记录,图8是用经验格林函数方法合成的E-W方向地震动,图9是两种情况下的反应谱,其中的虚线是记录反应谱,实线是计算反应谱。对两个地震图进行分析可以看出地震记录与地震动模拟结果符合得比较好,反应谱总体也符合得比较好,特别是低频段(周期在1~10s)和高频段(周期在0.1~0.01s),两者符合得很好,但在中频段(周期在0.1~1s)不太符合。

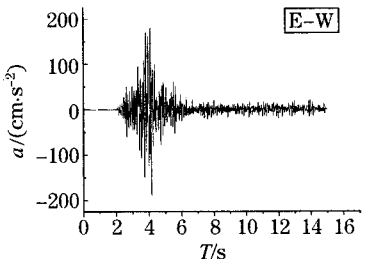

图7 卢龙地震记录E-W方向加速度时程

Fig. 7 The accelerogram of Lulong Earthguake in E-W direction

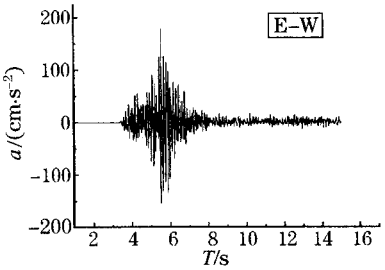

图8 用格林函数法合成卢龙E-W方向加速度时程

Fig. 8 The synthetic acceleration time series with Green's function at Lulong in the direction of E-W

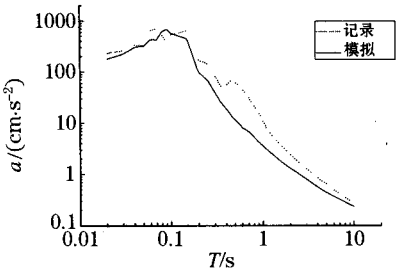

图9 卢龙地震E-W方向记录反应谱和用格林函数方法计算所得反应谱的比较

Fig. 9 Comparison between recorded accelerogram and computed response spectrum with Green' function for Lulong Earthquake in E-W direction

2.2 用随机方法模拟卢龙地震

随机方法是理论和实际地震动记录相结合模拟地震动的方法。尤其强调的是该方法是建立在对大量地震记录拟合基础上的,因此是一种实用且有效的模拟地震动的方法。以Boore为代表的地震工程学家用随机方法模拟地震动所用的经验关系大都是在美国地壳上得到的,比如:地震动持时与路程关系是在美国中部地壳得到的[18],几何扩散系数与路程的关系是在美国中部和东北部地壳得到的[20],震动的衰减随路程的变化关系是在美国东北部得到的[18],等等。因此用随机方法模拟美国的这些地区的地震动与实际记录符合得比较好[18]。

如果我们计划用随机方法比较准确地模拟中国大陆的地震动,那么随机方法中用到的经验关系必须按中国大陆的地震动经验关系修正。但是在缺少前面提到的中国大陆地震动经验关系的情况下,如果想把随机方法引进中国大陆,最有效的方法是把Boore的随机方法中的经验关系照搬过来,先用它来模拟中国大陆的地震动,再把模拟的结果与实际地震动记录比较。以后在地震记录丰富的基础上不断修正经验关系,使随机方法不断完善,以适合中国大陆。

我们对Boore提供的随机方法模拟地震动的程序按需要进行了修改,用来模拟中国卢龙地震。在模拟过程中,各种经验关系完全按照Boore[18]总结的结果。其它主要参数如表2。

表2 卢龙地震参数

Table 2 the parameters of Lulong Earthquake

矩震级:5.1 观测点与震源距离:10.5km
震源附近的岩石密度:2.75×10^3 kgm^{-3}
震源附近的剪切波速:3.5Kms^{-1}
辐射因子:0.05 自由表面因子:2
应力降:20bar 包线函数:指数函数
主震的子断层划分:4个

图10是用随机方法模拟地震动得到的卢龙地震的水平方向加速度时程(20个加速度时程之一)。与卢龙地震动记录水平方向加速度时程(图4和图7)相比较可以看出,两者地震动加速度的最大值和主要部分

的波形基本一致,而在地震动时程的后面部分两者差别比较大。

图 11 是随机方法模拟得到的水平方向加速度反应谱与水平方向加速度记录反应谱的比较。虚线表示卢龙地震记录的加速度反应谱,细实线表示用随机方法模拟得到的水平方向地震动加速度反应谱(共 20 条),粗实线表示 20 条用随机方法得到的加速度反应谱的平均值。可以看出,用随机方法得到的加速度反应谱与地震记录反应谱在高频部分符合得比较好,而在中频和低频部分符合得不太好,但差异并不太大。

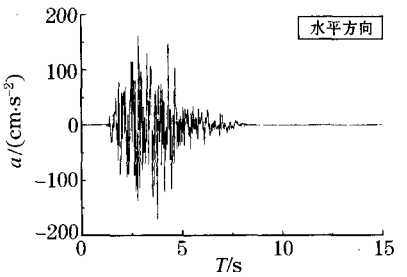

图 10　用随机方法模拟卢龙地震水平方向加速度时程

Fig. 10　Horizontal acceleration time series of Lulong Earthquake stimulated by stochastic method

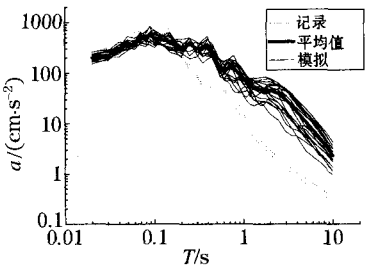

图 11　水平方向记录加速度反应谱与用随机方法模拟的加速度反应谱比较

Fig. 11　Comparison between horizontal acceleration records spectra and simulated response spectra with stochastic method

3　讨论

用经验格林函数方法模拟卢龙地震动时程与记录符合比较好。两者的反应谱总体上符合得比较好,其中在低频部分(周期在 1 ~ 10s)和高频部分(周期在 0.01 ~ 0.1s)符合得很好,在中频段(周期在 0.1 ~ 1s)符合得不太好。两者总体符合得好说明经验格林函数方法是人工合成地震动的有效方法。

用随机方法模拟地震动时程的主要部分与记录接近,特别是最大值非常接近。两者的反应谱在高频部分(周期在 0.01 ~ 0.1s)符合得很好,在中频(周期在 0.1 ~ 1s)和低频部分(周期在 1 ~ 10 s)符合得不太好,但差异并不太大,所以用随机方法模拟中国大陆的地震动是可以接受的。

用随机方法模拟地震动在中频和低频部分与实际记录符合不好的原因可能是随机方法中的经验关系是在美国大陆得到的,因此该方法能比较好地符合美国部分地区。如果我们能在我国大陆地壳上做一些实验或根据地震记录分析得到一些经验关系,特别是对中国汶川大地震记录分析得到经验关系(这些经验关系包括:地震动持时与路程关系、几何扩散系数与路程的关系、震动的衰减与路程的变化关系等),并把这些经验关系加进随机模拟地震动方法中,相信该方法一定会成为一种有效的适合中国大陆的随机模拟地震动的方法,并有效地推动汶川大地震的模拟研究。

4　结论

用经验格林函数方法模拟地震动的结果与记录相比,无论是加速度时程,还是反应谱,两者总体符合得很好。说明经验格林函数方法是有效的人工合成地震动的方法。

用随机方法模拟地震动时程的主要部分与记录接近,特别是最大值非常接近。两者的反应谱在高频部分符合得很好,在中频和低频部分符合得不太好,但差异并不太大,所以用随机方法模拟中国大陆的地震动也是可以接受的。

经验格林函数方法适用于有小震记录地区。对于没有小震记录的地区,随机的方法能显示出计算简单、无需小震记录的优点。

参考文献:

[1]　Harzell S H. Earthquake aftershock as Green's function[J]. Geophys. R E. let, 1978 ,5(1): 1 -4.

[2]　Irikura K. Semi - empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes[J]. Bull. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto

Univ., 1983, 33(2): 63 - 104.

[3] Kanamori H. A semi - empirical approach to prediction of long - period ground motions from great earthquake[J]. BSSA, 1979,69(6): 1654 - 1670.

[4] Hadley D M, Helmberger D V. Simulation of strong ground motions[J]. BSSA, 1980, 70(2):617 - 630.

[5] Hartzell S H. Simulation of ground accelerations for the May 1980 Mammoth Lakes, California, earthquakes[J]. BSSA, 1982, 72(6A): 2381 ~ 2387.

[6] Munguia L, Brune J. Simulation of strong ground motion for earthquakes in the Mexicali - Imperial Valley region[J]. Geophys. J. Royal Astro. Soc., 1984, 79(3): 747 - 771.

[7] 张敏政. 近场强地震动工程参数的估计[D]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所, 1986.

[8] Tanaka D K T, Wtanabe T. Simulation and prediction of strong ground motion in epicentral region of the 1979 Imperial Valley earthquake by semi - empirical method[J]. Journal of Structural and Construction Engineering(Transactions of AIJ), 1987, 52:373: 50 - 62.

[9] 廖振鹏 魏 颖. 设计地震加速度的合成[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1):12 - 31.

[10] 罗奇峰. 近场加速度的半经验合成[D]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所, 1989.

[11] 罗奇峰 胡聿贤. 改进的经验格林函数法和卢龙近场加速度合成[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(3):1 - 13.

[12] 金 星. 从震源非均匀性考虑合成设计加速度时程[D]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所, 1989.

[13] 金 星. 重大工程场地设计地震动与地震动场的研究[D]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所, 1992.

[14] Hanks T C. B value $\omega - r$ seismic source models: implication for tectonic stress variations along active crustal fault zones and the estimation of high frequency strong ground motion[J]. J. Geophys. Res., 1979, 84(B5):2235 - 2242.

[15] McGuire R K, Hanks T C. RMS accelerations and spectral amplitudes of strong ground motion during the San Fernando, California, earthquake [J]. BSSA, 1980, 70(5):1907 - 1919.

[16] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from Earthquakes[J]. J. Geophys. Res., 1970, 75:4997 - 5009.

[17] Brune J N. Correction[J]. J. Geophys. Res., 1971, 76(20):5002.

[18] Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. Pure appl. Geophys, 2003, 160(3 - 4): 635 - 676.

[19] Haskell N A. Radiation pattern of surface waves from point source in a multi - layered medium[J]. BSSA, 1964, 54(1): 377 - 393.

[20] Atkinson G M, Boore D M. Ground motion relations eastern for North America[J]. BSSA, 1995, 85(1): 17 - 30.