

吴迪, 罗奇峰, 熊焱. 2009. 考虑凹凸体理论的经验格林函数方法. 地震学报, 31(5): 555-563.
Wu Di, Luo Qifeng, Xiong Yan. 2009. An empirical Green function approach with asperity model considered. *Acta Seismologica Sinica*, 31(5): 555-563.

考虑凹凸体理论的经验格林函数方法^{*}

吴 迪^{1),*} 罗奇峰²⁾ 熊 焱³⁾

1) 中国广州 510405 广州大学广东省地震工程与应用技术重点实验室

2) 中国上海 200092 同济大学上海防灾救灾研究所

3) 中国广州 510405 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室

摘要 以 15 次地震资料为基础, 回归得到断层上所有凹凸体地震矩与凹凸体面积的关系; 研究经验格林函数方法中凹凸体子源的应力降, 提出基于断层凹凸体理论的经验格林函数方法; 以唐山地震余震 ($M_s=6.9$) 作为经验格林函数, 合成 1976 年唐山地震 ($M_s=7.8$) 的地震动, 比较合成结果与观测记录表明, 该方法符合断层破裂过程, 计算结果可靠.

关键词 凹凸体 震源模型 反应谱 经验格林函数 唐山地震

文章编号: 0253-3782(2009)05-0555-09 中图分类号: P315.3 文献标识码: A

An empirical Green function approach with asperity model considered

Wu Di^{1),*} Luo Qifeng²⁾ Xiong Yan³⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technique of Guangdong Province; Guangzhou University, Guangzhou 510405, China

2) Research Institute of Structure Engineer and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China

3) State Key Laboratory of Subtropical Building Science; South China University of Tech., Guangzhou 510405, China

Abstract: On the basis of the research on 15 earthquake, a relation between the seismic moments and the area of all asperities on seismic faults is worked out. The average stress drop of the asperities used for the empirical Green function (EGF) approach is generally obtained by linear regression analysis. A simplified EGF method based on the asperity model is proposed. A computer program based on this proposed method is developed to numerically synthesize the far-field seismic records of the 1976 $M_s7.8$ Tangshan earthquake. The accelerograms of the Tangshan earthquake at Guanting station are synthesized by using an $M_s6.9$ aftershock record as the Green function. Comparison of the computed accelerogram with the observation shows that the numerical result obtained in this paper is accurate and reliable.

* 基金项目 国家自然科学基金(50578125, 90815027)和减震控制与结构安全开放实验室资助项目.

收稿日期 2008-06-28 收到初稿, 2009-04-07 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: wdzooo@sohu.com

Key words: asperity; seismic source model; response spectrum; empirical Green function; Tangshan earthquake

引言

Hartzell(1978)提出了合成地震动的半经验方法, 将前震或余震记录作为经验格林函数合成主震的地震动。随后该方法在地震工程领域得到广泛的应用, 但该方法未考虑大、小震之间震源参数的关系。在假设大、小震之间存在相似性关系的基础上, Irikura(1983)考虑大、小震地震矩之间的关系, 将断层大小、平均位错量、上升时间等震源参数联系起来, 并提出改进的经验格林函数方法。Dan 等(1989)通过考虑大、小地震之间应力降与平均位错量的差异, 采用 Brune 模型的小震远场傅里叶谱对大震子源修正。罗奇峰和胡聿贤(1990)考虑大、小震之间应力降的差异, 将经验格林函数方法应用范围进一步推广, 使经验格林函数方法可以考虑大、小震断层形状不相似的情况。经验格林函数方法被地震工程领域广泛应用, 但目前仍难以采用经验格林函数方法考虑地震断层位错的非均匀。如何得到非均匀断层中子源的幅值谱仍是经验格林函数方法有待研究的问题。

目前研究非均匀断层的一个重要手段是采用凹凸体模型。Das 和 Boatwright(1985)假设单凹凸体位于断层中心位置, 并对 1975 的 Oroville 地震建立单凹凸体模型进行研究。Somerville 等(1999)将凹凸体定义为滑动量大于断层上平均滑动量 1.5 倍或以上的区域, 以此确定断层上凹凸体的有效长度、宽度和面积。Asano 等(2003)对 Somerville 等(1999)研究结果重新进行分析, 认为凹凸体的面积与整个断层的地震矩有关, 其将点源强震的发震区域看成单凹凸体, 并得到凹凸体应力降与整个断层地震矩的关系式:

$$\Delta\sigma_a = C \frac{M_0}{S_a^{3/2}} \quad (1)$$

式中, M_0 为断层地震矩, $\Delta\sigma_a$ 为凹凸体的应力降, S_a 为所有凹凸体的面积, C 为常系数。

王海云和陶夏新(2004)根据 29 次浅源地震的滑动分布对凹凸体特性进行分析, 其将 29 次地震划分为 3 种断层模型和 3 种凹凸体模型, 并给出较为复杂的经验统计公式。Arthur(1995)采用单凹凸体的 ω^{-2} 震源模型模拟 Loma Prieta 地震, 取得了较好的结果。

本文通过统计断层中凹凸体产生的地震矩与凹凸体面积的关系, 确定凹凸体子源的平均应力降, 并将该平均应力降引入经验格林函数方法。

1 经验格林函数方法采用的凹凸体子源平均应力降

本文根据 Somerville 等(1999)提出的方法确定凹凸体尺寸, 根据 Dan 等(1989)提出的方法确定断层中凹凸体和非凹凸体所含子源个数。

当断层面上发生单侧均匀错动时, 断层产生的地震矩为(Aki, 1966)

$$M_0 = \mu D A \quad (2)$$

式中, μ 为断层的剪切刚度, A 为断层面积, D 为断层平均位错。

在经验格林函数方法中, 大震被看成由一系列地震子事件组成。对于断层凹凸体模型而言, 大震包含凹凸体和非凹凸体子事件。本文假设在大震非均匀断层中, 凹凸体子事件(以下简称凹凸体)近似发生单侧均匀错动, 即凹凸体符合 Aki(1966)提出的断层地震矩的关系式。本文将断层中第 i 个凹凸体的面积 A_{ai} 代替式(2)中 A , 将第 i 个凹凸体的位错 D_{ai}

代替式(2)中 D , 将第 i 个凹凸体的地震矩 M_{ai} 代替式(2)中 M_0 , 得到第 i 个凹凸体产生的地震矩 M_{ai} 为

$$M_{ai} = \mu D_{ai} A_{ai} \quad (3)$$

当断层包含 n 个凹凸体时, 所有凹凸体产生的地震矩 M_a 可表示为

$$M_a = \sum_{i=1}^n M_{ai} = \sum_{i=1}^n \mu D_{ai} A_{ai} \quad (4)$$

对圆形断裂面而言, 断层破裂面的半径 r 、平均应力降 $\Delta\sigma$ 、地震矩 M_0 之间的关系为 (Kanamori, Anderson, 1975)

$$M_0 = \frac{16}{7} \Delta\sigma r^3 \quad (5)$$

假设断层上凹凸体近似为圆形断裂面, 且凹凸体的平均应力降为 $\Delta\sigma_a$. 将凹凸体平均应力降 $\Delta\sigma_a$ 代替式(5)中 $\Delta\sigma$, 将第 i 个凹凸体的等效半径 r_{ai} 代替 r , 则可推得第 i 个凹凸体的地震矩 M_{ai} 为

$$M_{ai} = \frac{16}{7} \Delta\sigma_a r_{ai}^3 \quad (6)$$

当断层包含 n 个凹凸体时, 所有凹凸体的地震矩 M_a 可表示为

$$M_a = \frac{16}{7} \Delta\sigma_a \sum_{i=1}^n r_{ai}^3 \quad (7)$$

对式(6)两边同时取指数 $2/3$, 并对断层上所有 n 个凹凸体求和可推得

$$\sum_{i=1}^n M_{ai}^{2/3} = 1.74 \Delta\sigma_a^{2/3} \sum_{i=1}^n r_{ai}^2 \quad (8)$$

取 $M' = \sum_{i=1}^n M_{ai}^{2/3}$, 由断层上凹凸体的总面积 $A_a = \pi \sum_{i=1}^n r_{ai}^2$ 和式(8)可推得

$$M' = 0.55 \Delta\sigma_a^{2/3} A_a \quad (9)$$

本文采用的部分地震震源参数如表 1 所示.

表 1 地震震源参数(Somerville 等, 1999)

Table 1 Seismic source parameters (Somerville *et al*, 1999)

地震名称	滑动类型	$M_0/10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$	M_w	L/km	W/km	数据来源
Landers	SS	75.0	7.22	69.00	15.00	Wald 和 Heaton(1994)
Tabas	RV	58.0	7.14	95.00	45.00	Hartzell 和 Mendoza(1991)
Loma Prieta	OB	30.0	6.95	40.00	18.00	Wald 等(1991)
Kobe	SS	24.0	6.90	60.00	20.00	Wald(1996)
Borah Peak	NO	23.0	6.87	48.75	26.40	Mendoza 和 Hartzell(1988)
Nahanni	RV	15.0	6.75	34.67	16.49	Hartzell 等(1994)
Northridge	RV	11.0	6.66	18.00	21.00	Wald 和 Heaton(1994)
Nahanni	RV	10.0	6.68	29.33	13.92	Hartzell 等(1994)
San Fernando	RV	7.0	6.53	13.36	12.03	Heaton(1982)
Imperial Valley	SS	5.0	6.43	36.00	10.00	Hartzell 和 Heaton(1983)
Superstition Hills	SS	3.5	6.33	20.00	8.05	Wald 等(1990)
Morgan Hill	SS	2.1	6.18	26.00	11.50	Hartzell 和 Heaton(1986)
North Palm Springs	OB	1.8	6.14	20.00	13.30	Hartzell(1989)
Whittler Narrows	RV	1.0	5.97	10.00	10.00	Hartzell 和 Iida(1990)
Coyote Lake	SS	0.4	5.66	5.50	4.57	Liu 和 Helmberger(1983)

注: M_w 为矩震级, M_0 为地震矩, L 为断层长度, W 为断层宽度, SS 为走滑断层, RV 为逆断层, OB 为斜滑断层, NO 为正断层.

根据表 1 和凹凸体震源参数(Somerville *et al*, 1999), 并由式(7)、式(8)和式(9)可推

得地震断层凹凸体的震源参数(表 2).

表 2 地震断层凹凸体的震源参数(Somerville *et al*, 1999)

Table 2 Seismic source parameters of fault asperities (Somerville *et al*, 1999)

地震名称	剪切刚度 μ $/10^{10} (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_a/\text{N} \cdot \text{m}$	A_a/km^2	M'
Landers	2.69	3.89759×10^{19}	293	1.59327×10^{13}
Tabas	2.71	3.52896×10^{19}	1120	1.54378×10^{13}
Loma Prieta	2.51	1.1046×10^{19}	152	6.23963×10^{12}
Kobe	2.99	1.12272×10^{19}	300	5.78306×10^{12}
Borah Peak	3.80	1.48022×10^{19}	515	6.02862×10^{12}
Nahanni	3.28	1.03958×10^{19}	157	5.74744×10^{12}
Northridge	3.93	4.56544×10^{18}	75	4.5145×10^{12}
Nahanni	2.85	5.97132×10^{18}	93	4.60236×10^{12}
San Fernando	2.90	2.98674×10^{18}	43	2.07395×10^{12}
Imperial Valley	2.01	2.30072×10^{18}	90	1.74278×10^{12}
Superstition Hills	2.79	1.31673×10^{18}	35	1.435×10^{10}
Morgan Hill	4.13	1.00212×10^{18}	42	1.68381×10^{12}
North Palm Springs	3.98	4.98252×10^{17}	34	6.28492×10^{11}
Whittler Narrows	3.85	3.43885×10^{17}	17	7.46444×10^{11}
Coyote Lake	1.83	1.6827×10^{17}	8	3.04793×10^{11}

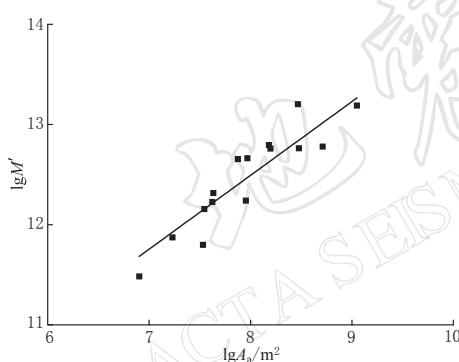


图 1 15 次地震中的 M' 与所有凹凸体面积 A_a 的关系

Fig. 1 Relation between M' and combined area A_a of all asperities

根据表 2 所列 15 次地震中 M' 与所有凹凸体面积 A_a 的关系如图 1 所示.

根据图 1 回归得出 15 次地震中 M' 与所有凹凸体面积 A_a 的关系式为

$$M' = 3.19 \times 10^4 \times A_a \quad (10)$$

由式(9)可得

$$\Delta\sigma_a = 2.46(M'/A_a)^{3/2} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)可得所有凹凸体的平均应力降 $\Delta\sigma_a \approx 140 \times 10^5 \text{ Pa}$.

非凹凸体所产生的地震矩 M_n 可表示为

$$M_n = M_0 - \sum_{i=1}^n M_{ai} \quad (12)$$

对于走滑断层和倾滑断层模式, 断层的

地震矩 M_0 可表示为(Kanamori, Anderson, 1975)

$$M_0 = \frac{\pi}{2} a \Delta\sigma W^2 L \quad (13)$$

式中, W 为断层的宽度, L 为断层的长度, a 为系数. 当为走滑断层时, $a=1$; 当为倾滑断层时, $a=(\lambda+2\mu)/2(\lambda+\mu)$, 其中 λ 为拉梅常数.

由于断层上非凹凸体形状不规则, 且非凹凸体面积远大于所有凹凸体面积. 因此, 本文将非凹凸体面积近似看成断层面积. 将非凹凸体长度 L_n 、宽度 W_n 、平均应力降 $\Delta\sigma_n$ 和地震矩 M_n 分别代替式(13)中断层的长度 L 、断层的宽度 W 、平均应力降 $\Delta\sigma$ 和地震矩 M_0 , 并根据式(12)可得非凹凸体的平均应力降 $\Delta\sigma_n$ 为

$$\Delta\sigma_n = \frac{2(M_0 - \sum_{i=1}^n M_{ni})}{\pi a W^2 L} \quad (14)$$

2 将凹凸体引入经验格林函数方法

根据本文提出的计算方法, 将小震记录的傅氏谱分别修正为大震断层上凹凸体和非凹凸体子源的傅氏谱, 采用辐射图型因子对大小震辐射图型加以校正, 并对傅氏谱做傅里叶逆变换, 得到大震凹凸体第(k, m)子断层的子源的地震动时程 $u_{akm}(t)$ 和非凹凸体第(i, j)子断层的子源的地震动时程 $u_{nij}(t)$ (吴迪, 2008). 然后按下式叠加合成大震的加速度时程 $u(t)$:

$$u(t) = \sum_{m=1}^{N_{al}} \sum_{n=1}^{N_{aw}} \sum_{o=1}^{N_{aD}} u_{akm}(t - t_{arkm} - t_{ackm} - t_{aDkm}) + \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{N_w} \sum_{k=1}^{N_{nD}} u_{nij}(t - t_{nrij} - t_{ncij} - t_{nDij}) \quad (15)$$

式中, $t_{arkm} = |\xi_0 - \xi_{akm}| / v_r$, $t_{ackm} = |R_s - R_{akm}| / v_c$, $t_{aDkm} = (k-1)\tau_{se}$ 分别为凹凸体上第(k, m)子断层的子源的破裂传播、波的传播、位错过程引起的滞后时间; $t_{nrij} = |\xi_0 - \xi_{nij}| / v_r$, $t_{ncij} = |R_s - R_{nij}| / v_c$ 和 $t_{nDij} = (k-1)\tau_{ne}$ 分别为非凹凸体第(i, j)子断层子源的破裂传播、波的传播和位错过程引起的滞后时间. ξ_0 , ξ_{akm} 和 ξ_{nij} 分别为大震断层破裂的起始坐标、凹凸体第(k, m)子断层的坐标和非凹凸体第(i, j)子断层的坐标; v_r 和 v_c 分别为断层破裂速度和波的传播速度; τ_{se} 和 τ_{ne} 分别为凹凸体和非凹凸体子源的上升时间; R_s , R_{akm} 和 R_{nij} 分别为小震、凹凸体第(k, m)子断层和非凹凸体第(i, j)子断层的震源距. N_l 和 N_w 分别为非凹凸体长度方向、宽度方向分布的与小震有相同尺寸的子断层个数; N_{al} 和 N_{aw} 分别为凹凸体长度方向、宽度方向分布的与小震有相同尺寸的子断层个数; N_{aD} 和 N_{nD} 分别为凹凸体和非凹凸体子断层与小震断层应力降不同引起的子源数.

3 计算实例

3.1 远场唐山地震动的计算

本文根据谢小碧(1988)和周蕙兰(1985)对1976年7月28日唐山地震的反演和已有小震记录等资料情况, 将唐山主震断层看成由南段的北东30°和北段的北东50°两个右旋走滑断层组成. 唐山主震总地震矩为 1.47×10^{20} N·m, 平均应力降为 20×10^5 Pa, P波波速为5.6 km/s, S波波速为3.3 km/s, 断层破裂速度为2.5 km/s(谢小碧, 1988; 周蕙兰, 1985). 具体子断层的参数如表3所示.

表3 唐山主震子断层参数

Table 3 Sub-fault parameters of the Tangshan earthquake

断层编号	震源深度/km	走向/°	倾角/°	地震矩/N·m	震源尺寸/km	平均位错/m	应力降/ 10^5 Pa
1	15	30	80	7.0×10^{19}	57×20	1.86	20
2	15	50	80	7.0×10^{19}	57×20	1.86	20

我国华北地区固定台网记录到58条唐山主震和强余震(宁河地震)远场加速度记录. 根据对宁河地震的反演资料(朱传镇, 1985)和震源机制(张之立等, 1980), 确定宁河地震

的震源参数(表 4).

表 4 宁河地震($M_s = 6.9$)的震源参数

Table 4 Source parameters of the Ninghe earthquake ($M_s = 6.9$)

震源深度/km	走向/°	倾向/°	地震矩/N·m	震源尺寸/km	应力降/10 ⁵ Pa	平均位错/m
17	330	39°	8.0×10^{18}	18×9	35	1.50

唐山主震官厅台站的震中距为 228 km, 宁河地震官厅台站的震中距为 216 km. 由于地震记录中缺少官厅台站东西方向的记录, 本文只对南北方向和垂直方向地震动进行合成. 图 2 为宁河地震南北方向和垂直方向的地震记录.

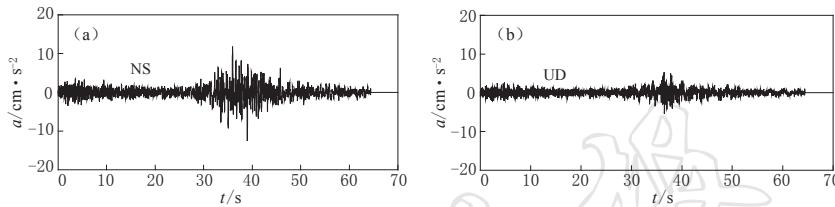


图 2 官厅台观测的宁河地震南北方向(a)和垂直方向(b)的地震加速度记录

Fig. 2 Observed Ninghe earthquake acceleration in NS(a) and UD(b) component

根据唐山断层位错分布(图 3)和 Somerville 等(1999)方法确定唐山地震断层第一凹凸体的面积尺寸为 24 km×8 km, 第二凹凸体的面积尺寸为 9 km×5 km. 图 4 为凹凸体和非凹凸体的位置示意图.

采用前述方法分别确定了大震中凹凸体和非凹凸体子源个数(表 5、表 6).

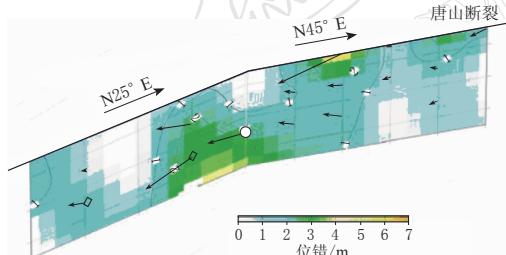


图 3 唐山主震断层位错分布(James, 2002)

Fig. 3 Slip distribution on main fault of Tangshan earthquake (James, 2002)

表 5 凹凸体子事件个数

Table 5 Number of small events in asperity area

编号	长度方向个数	宽度方向个数
1	1	1
2	1	1

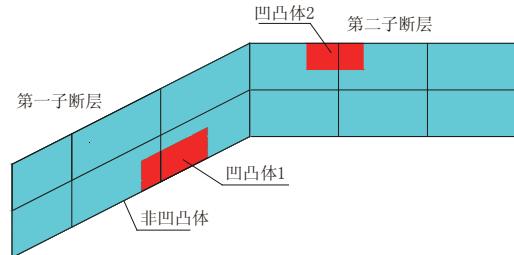


图 4 唐山主震断层及凹凸体位置图

Fig. 4 Location of asperities on main fault of Tangshan earthquake

表 6 非凹凸体子事件个数

Table 6 Number of small events in non-asperity area

编号	长度方向个数	宽度方向个数
1	3	2
2	3	2

3.2 唐山地震远场地震动的合成结果与讨论

以宁河地震($M_s = 6.9$)官厅水库台站记录作为经验格林函数, 将小震记录傅氏谱分别修正为断层上凹凸体和非凹凸体子源的傅氏谱, 根据式(15)叠加合成唐山地震($M_s = 7.8$)官厅

水库台站的地震动时程. 唐山地震南北方向加速度记录和合成结果见图 5, 垂直方向加速度记录和合成结果见图 6.

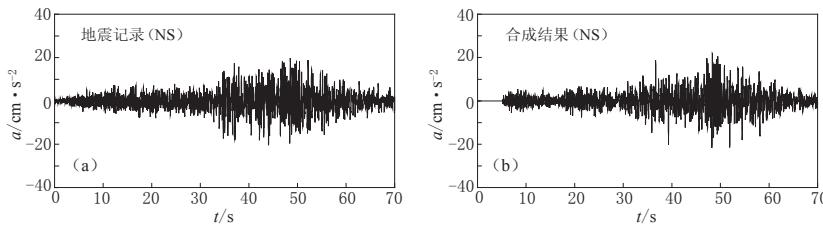


图 5 官厅台观测的唐山主震南北方向的加速度记录(a)与合成的加速度时程(b)

Fig. 5 Observed Tangshan earthquake acceleration (a) and synthesized result (b) of the main shock in NS component at Guanting station

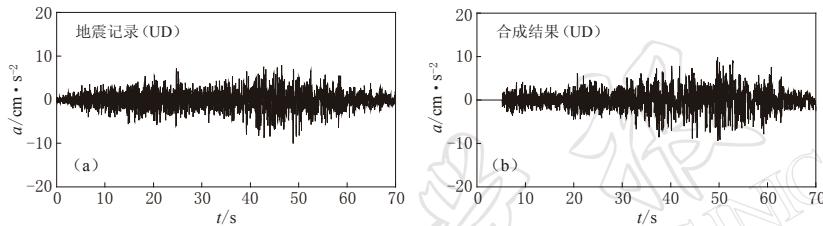


图 6 官厅台观测的唐山主震垂直方向的加速度记录(a)与合成的加速度时程(b)

Fig. 6 Observed Tangshan earthquake acceleration (a) and synthesized result (b) of the main shock in UD component at Guanting station

由图 5 和图 6 可知, 合成加速度与观测加速度的峰值、包线等都符合较好. 唐山主震南北方向和垂直方向观测与合成的加速度反应谱对比见图 7. 图中的“合成结果 1”为计算合成结果.

由图 7 可知, 合成结果在 1—3 s 的频带范围内与实际记录反应谱有一定差别. 其主要原因是采用地震矩较大的小震作为经验格林函数势必造成凹凸体子源数量划分较少, 且由于小震与凹凸体和非凹凸体之间存在差异, 震源参数的估计值与实际参数间存在差异. 针对这些问题, 本文采用经验标定因子 $K(\omega)$ (罗奇峰, 胡聿贤, 1997) 对小震的傅里叶谱进行修正, 标定因子中的比例因子 $N=0.7$. 修正后的结果见图 7 的“合成结果 2”. 结果表明,

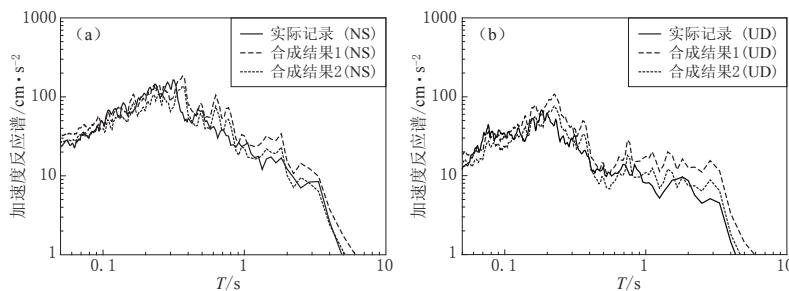


图 7 唐山地震南北方向(a)与垂直方向(b)的加速度反应谱对比

Fig. 7 Comparison between the response spectrum of observed Tangshan earthquake accelerations and synthesized results of the main shock in NS component (a) and UD component (b) at Guanting station

调整经验标定因子 $K(\omega)$ 后, 合成结果与实际记录在整个频带范围符合较好.

4 结论

1) 在本文的改进经验格林函数法中引入了凹凸体和非凹凸体的应力降, 使该方法能够应用于非均匀断层的大震合成. 该方法计算简单, 可以反映复杂的震源位错分布、震源破裂过程、介质传播过程和场地影响等一些主要特征, 适合在工程地震中用来估计场地地震动时程.

2) 唐山地震远场加速度合成结果说明, 采用本文改进的经验格林函数方法模拟、合成远场加速度是可行的, 且建立的唐山地震非均匀位错断层模型、震源参数是合适的.

3) 当小震地震矩较大时, 本文采用经验标定因子 $K(\omega)$ 对合成结果进行修正, 使合成结果较好地拟合观测地震记录的反应谱. 但是, 该修正因子的物理意义和如何根据震源参数采取不同的修正比例因子还值得深入探讨.

作者对日本构造计划研究所司宏俊博士的支持与帮助表示由衷的谢意.

参 考 文 献

- 罗奇峰, 胡聿贤. 1990. 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, **10**(3): 1-13.
- 罗奇峰, 胡聿贤. 1997. 1976 年唐山地震近、远场加速度的半经验合成[J]. 地震学报, **19**(3): 275-282.
- 王海云, 陶夏新. 2004. 近场强地震动预测中浅源地震的 Asperity 模型特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, **3**(11): 1533-1539.
- 吴迪. 2008. 远场地震动的经验合成、分析及地壳滑移特性研究[D]. 上海: 同济大学: 33-43.
- 谢小碧. 1988. 理论地震图方法及其在研究震源过程方面的应用[D]. 北京: 中国科学院地球物理研究所: 94-105.
- 张之立, 李钦祖, 谷继成, 靳雅敏, 杨懋源, 刘万琴. 1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析[J]. 地震学报, **2**(2): 111-129.
- 周蕙兰. 1985. 浅源走滑大震震源过程的某些特征[J]. 地球物理学报, **28**(6): 579-587.
- 朱传镇. 1985. 唐山及其邻区的地震活动[M]//刘恢先主编. 唐山大地震震害(第一卷). 北京: 地震出版社: 1-16.
- Aki K. 1966. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **44**(2): 23-88.
- Arthur Frankel. 1995. Simulating strong motions of large earthquakes using recordings of small earthquakes: The Loma Prieta mainshock as a test case[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(4): 1144-1160.
- Asano K, Iwata T, Irikura K. 2003. Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations[J]. *Earth Planets Space*, **55**(12): 5-8.
- Dan K, Watanabe T, Tanaka T. 1989. A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear wave displacement[J]. *J Struct Constr Eng*, **396**(1): 27-36.
- Das S, Boatwright J. 1985. The breaking of a single asperity: Analysis of an aftershock of the 1975 Oroville, California, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **75**(3): 677-687.
- Hartzell S H. 1978. Earthquake aftershocks as Green's functions[J]. *Geophys Res Lett*, **5**(1): 1-4.
- Hartzell S H, Heaton T H. 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **73**(1): 1553-1583.
- Hartzell S H, Heaton T H. 1986. Rupture history of the 1984 Morgan Hill, California, earthquake from the inversion of strong motion records[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **76**(1): 649-674.
- Hartzell S H, Iida M. 1990. Source complexity of the 1987 Whittier Narrows, California, earthquake from inversion of strong motion records[J]. *J Geophys Res*, **95**(1): 12475-12485.

- Hartzell S H, Langer C, Mendoza C. 1994. Rupture histories of eastern North American earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**(1): 1703–1724.
- Hartzell S H, Mendoza C. 1991. Application of an iterative least-squares waveform inversion of strong motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**(1): 305–331.
- Hartzell S H. 1989. Comparison of seismic waveform inversion techniques for the rupture history of a finite fault: Application to the 1989 North Palm Springs, California, earthquake[J]. *J Geophys Res*, **94**(1): 7515–7534.
- Heaton T H. 1982. The 1971 San Fernando earthquake: A double event? [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **72**(1): 2037–2062.
- Irikura K. 1983. Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquakes[J]. *Bull Disas Prev Inst*, **33**(1): 63–104.
- James M. 2002. Earthquake source studies related to strong ground motion estimates[G]//「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」成果報告書. 日本东京: 文部科学省: 664–670.
- Kanamori H, Anderson D L. 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **65**(5): 1073–1095.
- Liu H L, Helmberger D V. 1983. The near-source ground motion of the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **73**(1): 201–218.
- Mendoza C, Hartzell S H. 1988. Inversion for slip distribution using GDSN P wave: North Palm Springs, Borah Peak, and Michocan earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **78**(1): 1092–1111.
- Somerville P G, Irikura K, Graves R, Sawada S, Wald D, Abrahamson N, Iwasaki Y, Kagawa T, Smith N, Kowada A. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. *Seism Res Lett*, **70**(1): 59–80.
- Wald D J. 1996. Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic and geodetic data[J]. *J Geophys Res*, **44**(1): 489–503.
- Wald D J, Heaton T H. 1994. Spatial and temporal distribution of slip of 1992 Landers, California earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**(1): 668–691.
- Wald D J, Helmberger D V, Hartzell S H. 1990. Rupture process of the 1987 Superstition Hills earthquake from the inversion of strong motion data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **80**(1): 1079–1098.
- Wald D J, Helmberger D V, Heaton T H. 1991. Rupture model of the 1989 Loma Prieta earthquake from the inversion of strong motion and broadband teleseismic data [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**(1): 1540–1572.