

1976 年唐山地震近、远场 加速度的半经验合成^{*}

罗奇峰¹⁾ 胡聿贤²⁾

1) 中国上海 200092 同济大学结构理论研究所

2) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

摘要 本文建立一非均匀唐山地震断层模型, 它由北东 30° 的南段和北东 50° 的北段两个大的走滑断层组成, 总长 114 km、总地震矩为 1.4×10^{20} N·m; 而每一走滑断层又分别由长为 37 km 和 20 km 的两个子断层组成. 震中定在南段和靠近南、北两段走滑断层的交汇处. 用 $M_L 5.7$ 、 $M_S 6.9$ 的余震记录作经验格林函数, 用考虑大小地震不相似的改进的经验格林函数法分别合成唐山地震主震($M_S 7.8$)的近、远场加速度时程. 远场合成加速度时程的峰值、持时、反应谱与真实记录符合较好; 近场合成结果与唐山地震烈度分布符合较好. 合成的唐山地震的近场最大加速度峰值达 1.1 g, 这与近年发生的一些大震中记录到的近场最大加速度峰值接近.

主题词 唐山地震 经验格林函数 近场加速度 合成

引言

在 1976 年 7 月 28 日发生的唐山地震($M_S = 7.8$)中, 虽然我们未能获得近场加速度记录, 但国家地震局工程力学研究所和中国建筑科学研究院抗震所在震后架设的流动台网记录到了一批珍贵的余震记录. 国家地震局工程力学研究所华北地区固定台网和其它一些单位的台站还取得了一批震中距在 140~400 km 之间的唐山地震加速度记录(国家地震局工程力学研究所, 1987).

我国地震工程学界综合利用这些资料和美国西部强震记录资料, 采用多种方法确定华北地区地震动参数的衰减规律(胡聿贤等, 1986), 为抗震设计提供地震动参数. Dan 等(1989, 1993)也利用余震记录、用一均匀断层模型合成过唐山地震($M_S = 7.8$)的加速度时程.

本文根据各种反演资料建立一非均匀的唐山地震断层模型, 用改进的经验格林函数法(罗奇峰, 1989; 罗奇峰, 胡聿贤, 1990), 合成近场 5 个台、远场 4 个台唐山地震时的加速度时程, 并用远场台的大震记录对合成结果进行了对比.

利用已有余震记录, 合成唐山地震的近、远场加速度时程曲线, 对研究唐山地震近场

* 国家自然科学基金资助项目.

1996-01-12 收到初稿, 1996-07-01 收到修改稿并决定采用.

地面运动特征,考察经验格林函数法在近场地震动估计中的应用价值,都是非常有益的.

1 唐山地震断层模型的选择

唐山地震震源位于活动性明显的阴山—燕山南缘构造带与冀渤断拗构造带的交汇部位.在这一部位存在一个北东东向的唐山菱形块体,它的四周被深断裂所围限,块体中央存在一条北东向的断裂带,唐山地震就发生在这个块体内部的断裂带上(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组,1982).唐山地震的余震多而强、空间展布范围较广、延续时间长. Shedlock 等(1987)对唐山地震的余震进行了重新定位,定位结果表明唐山余震分布与局部地质构造关系密切.余震区大体集中在两段,南面一段断层走向为北东 30°,北段走向约为北东 50°~60°(见图 1),余震分布在中间有方向变化.余震震中沿深度大都分布在 5~20 km.

国内外许多学者利用多种资料反演唐山地震断层模型.最简单的是单一断层模型,最复杂的是用 6 段走滑性子断层和 1 段逆断层组成的复杂断层模型(谢小碧,1988).不少作者认为,唐山地震断层大致分为 2 段:南段走向约为北东 30°,北段走向约为北东 50°~60°;有的作者还认为南端有一走向约为北东 110°的逆断层子事件(周惠兰,1985).

本文根据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.每一断层又分别由长为 37, 20 km 的两个子断层组成(图 1,子断层分别标有 1,2,3,4 字样),每个子断层的应力降都不相同.唐山地震震中位置定在南段的走滑断层与靠近南、北两段走滑断层的交汇处.此即本文选取的唐山地震非均匀主震断层模型,具体参数见表 1 μ 取 3.3×10^{10} N/m².唐山地震断层的总长为 114 km,宽约 20 km,总地震矩为 1.4×10^{20} N·m,平均应力降约为 20×10^5 Pa,平均位错为 1.86 m.

表 1 唐山主震子断层参数

断层编号	走向 $\varphi/(^\circ)$	倾角 $\delta/(^\circ)$	倾伏角 $\lambda/(^\circ)$	$M_0/\text{N} \cdot \text{m}$	$L \times W/\text{km}^2$	$\Delta\sigma/10^5 \text{ Pa}$	\bar{D}/m	τ/s
1	30	80	180	4.0×10^{19}	37×19	20	1.72	8.6
2	30	80	180	3.1×10^{19}	20×20	25	2.35	9.4
3	50	80	180	3.8×10^{19}	20×20	30	2.88	9.6
4	50	80	180	3.1×10^{19}	37×19	15	1.34	8.9

2 小震记录的选择与参数的确定

2.1 小震记录的选择

流动台网的 5 个台站和华北地区固定台网中的 3 个台站分布情况见图 2.华北地区固定台网记录到 58 条唐山主震和强余震的远场加速度记录;流动台网记录到 163 条较好的唐山余震的加速度记录.

流动台网记录的余震中,5 个台同时记到的有 2 次($M_L=5.5$ 、 $M_L=5.7$),为增加对近场地震图合成的约束条件和考察合成方法与结果的可靠性,本文选取 5 个台同时记到的 $M_L=5.7$ 的余震记录,作为合成唐山主震近场加速度时程的经验格林函数.

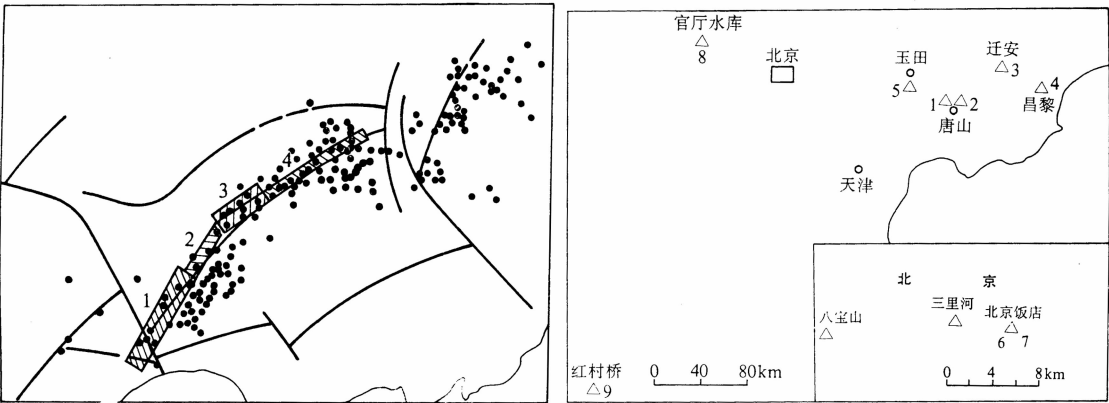


图 1 唐山地震的地质背景、余震震中分布和本文采用的非均匀断层模型

图 2 强震观测台网分布情况

华北固定台网同时记录到主震($M_s=7.8$)和强余震($M_s=6.9$)的台站只有北京饭店、官厅水库和红村桥等。本文选取该三个远场场地的 4 个台站观测的 $M_s=6.9$ 的 7 条余震加速度记录,合成此 4 个台的主震加速度时程,并与主震记录对比,以检验唐山地震震源模型选取的合理性和方法的可行性。

2.2 合成近场地震动时小震参数的确定

根据经验关系式(陈培善,陈海通,1989)

$$\begin{cases} \lg M_0 = 1.5M_L + 15.7 & 3.6 < M_L \leq 5.0 \\ \lg M_0 = 3M_L + 8.2 & 5.0 < M_L \leq 6.3 \end{cases} \quad (1)$$

和唐山地震余震的震源机制解(张之立等,1980)以及有关研究资料(朱传镇,1985)和及 Brune 模型的理论谱(Brune,1970)与实际观测记录的傅氏谱拟合情况(罗奇峰,胡聿贤,1990),确定 $M_L=5.7$ 余震的有关参数(表 2)。

表 2 余震 $M_L=5.7$ 的参数

震中位置	震源深度/km	发震时刻	走向	倾向	倾角	$M_0/N \cdot m$	$L \times W/km^2$	$\Delta\sigma/10^5 Pa$	\bar{D}/m
39°57'N 118°49'E	14	1976-08-09 6:41	30°	120°	75°	1.9×10^{18}	10×10	12	0.58

如大小震都是矩形走滑型断层,大震断层的长宽比为 k ,小震断层的长宽比为 k_s ,则主震断层所含子事件个数,可根据下式(罗奇峰,胡聿贤,1988;罗奇峰,1989)计算:

$$\begin{cases} N_L = \frac{L}{L_s} = \left[(E \frac{M_0}{M_{0s}}) \right]^{\frac{1}{3}} \\ N_w = \left(\frac{k_s}{k} N_L \right) \\ E = \frac{k^2}{k_s^2} \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta\sigma} \\ N_D = \bar{D}/\bar{D}_e = N_w \end{cases} \quad (2)$$

式中, N_L , N_w 分别为沿大震断层的长度方向和宽度方向分布的、与小震有相同几何尺寸的子事件个数. 由式(2)算得的主震各子断层所含子事件个数见表 3.

2.3 合成远场地震动时小震参数的确定

根据宁河地震 ($M_s = 6.9$) 的震源机制解 (张之立等, 1980) 和有关研究资料 (朱传镇, 1985), 以及 Brune 模型的理论谱与实际观测记录的傅氏谱拟合试算结果, 选择的宁河地震参数如表 4 所示. 同样, 根据式(2)可算得主震各子断层所含子事件个数(表 5).

表 3 主震各子断层所含子事件个数

子断层编号	N_L	N_w	N_D
1	4	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2
4	4	2	2

表 4 宁河地震 ($M_s = 6.9$) 的参数

震中位置	震源深度/km	发震时刻	走向	倾向	倾角	$M_0/N \cdot m$	$L \times W/km^2$	$\Delta\sigma/10^5 Pa$	\bar{D}/m
39°17'N 117°50'E	17	1976-11-15 21:53	330°	60°	60°	8.0×10^{18}	18×9	35	1.50

表 5 主震各子断层所含子事件个数

子断层编号	N_L	N_w	N_D	子断层编号	N_L	N_w	N_D
1	2	2	2	3	1	2	2
2	1	2	2	4	2	2	2

3 合成方法与计算结果

3.1 合成方法

用来合成大震地震动时程的改进的经验格林函数法(罗奇峰, 胡聿贤, 1990)包括确定合成大震记录所需子事件个数、小震记录傅氏谱修正和叠加合成三部分.

3.1.1 对小震记录的傅氏谱的修正

考虑大小震的应力降等参数存在差异, 不满足相似性关系, 因而需要对小震记录进行修正, 使之能等同于大震的子事件记录. 本文采用 Brune 模型的远场 S 波谱(Brune, 1970)对小震记录的水平分量进行修正.

$$A_{pqk}(\omega) = \frac{R_{pqk}(\theta, \varphi)}{R_s(\theta, \varphi)} \frac{r_s}{r_{pqk}} \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_s} \frac{(\omega_{cpqk} + i\omega)^2}{(\omega_{cs} + i\omega)^2} \times (1 - \frac{2\pi}{Q})^{\omega(r_{pqk}-r_s)/4\pi\beta} \times A_s(\omega) \tag{3}$$

式中, $\lambda = (LW/\pi)^{1/2}$ 为震源的等效半径、 ω 为圆频率、 r 为震源距、 $\Delta\sigma$ 为应力降、 β 为剪切波速(本文取 3.3 km/s)、 $\omega_c = 2\beta(\pi\lambda\Delta\sigma/M_0)^{1/2}$ 为拐角圆频率、 Q 为介质品质因子(本文取 500)、 $R(\theta, \varphi)$ 为辐射图型因子, 带下标 s 的量为小震的参数, 带下标 $p q k$ 的量为大震子事件的参数. 另外, 假定大震子事件的应力降 $\Delta\sigma$ 和大震的应力降相同. $A_s(\omega)$ 为小震记录的傅里叶幅值谱, $A_{pqk}(\omega)$ 为修正后大震子事件产生的加速度时程的傅里叶幅值谱.

需要指出的是, 改进的经验格林函数法在对小震记录的傅氏谱进行修正时引入了一经验标定因子 $K(\omega)$ (罗奇峰, 1989; 罗奇峰, 胡聿贤, 1990), 由于该标定因子通常主要对谱的长周期部分有一定影响, 而对整个合成结果及加速度反应谱的影响不敏感(罗奇峰, 1989; 罗奇峰, 1992), 为避免引起误解, 将改进的经验格林函数法看成是一种谱拟合方

法, 本文在式(3)中删除了这一经验标定因子.

3.1.2 叠加合成方法

对修正后的傅里叶幅值谱作 Fourier 逆变换, 可得到大震第 $p q$ 个子断层的第 k 个子事件的时程曲线 $a_{pqk}(t)$, 然后按下式:

$$a(t) = \sum_{p=1}^{N_L} \sum_{q=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_D} a_{pqk}(t - t_{pqr} - t_{pqc} - t_{pqD})$$

(4)

叠加合成大震的时程曲线 $a(t)$, 式中的 t_{pqr} , t_{pqc} , t_{pqD} 分别表示破裂传播、波的传播和位错过程引起的滞后时间, 本文取破裂速度为 2.5 km/s.

3.2 远场地震动的合成结果与讨论

6, 7, 8, 9 号等 4 个远场台记录到唐山地震主震和强余震宁河地震的加速度时程. 如表 6 所示, 4 个台相对宁河地震的震中距记作 Δ_s 、相对主震的震中距记作 Δ 、记录到的宁河地震加速度峰值为 A_{smax} 、唐山地震加速度峰值为 A_{omax} 、本文合成的唐山地震加速度时程的峰值为 A_{max} .

6 号台观测的宁河地震($M_s = 6.9$)记录、唐山主震记录、合成的加速度时程分别见图 3a, b, c 图, 观测的主震加速度东西(EW)分量的反应谱(图中实线)与相应的合成结果反应谱(图中虚线)的对比见图 4. 对比结果说明, 合成加速度的峰值、持时、波形和在 0.3~15 Hz 较宽频带范围内的反应谱都与观测记录符合得比较好. 除 8 号台外, 其它台的合成结果也与真实记录符合较好. 个别台合成加速度峰值与观测值相差接近 1.5 倍, 但其两者的反应谱差别却较小. 8 号台合成加速度峰值与反应谱是观测值的 2

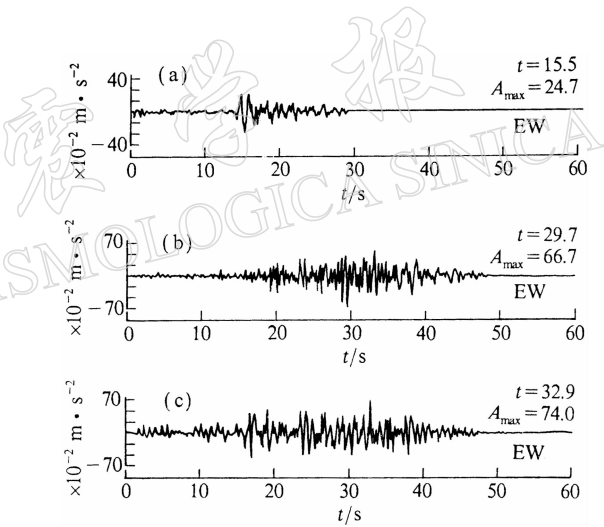


图 3 远场 6 号台观测的余震加速度记录(a)、观测的唐山主震记录(b)和合成的加速度时程(c)

倍, 这可能与断层模型和震源参数选择有关, 值得进一步研究. 但这一台站合成结果与观测结果的差别在工程地震中还是可以接受的(罗奇峰, 1989).

表 6 4 个远场台的 Δ_s , Δ , A_{smax} , A_{omax} , A_{max}

编号	台站名称	Δ_s /km	Δ /km	A_{smax}		A_{omax}		A_{max}	
				/ $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$		/ $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$		/ $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	
				NS	EW	NS	EW	NS	EW
6	北京饭店 1 台	145	162	32	25	54	67	68	74
7	北京饭店 2 台	145	162	36	28	65	68	96	82
8	官厅水库台	216	228	13		20		49	
9	红村桥台	362	408	6	8	16	15	18	11

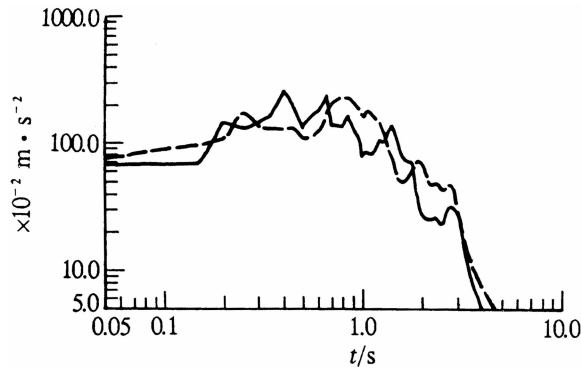


图 4 远场 6 号台观测的唐山地震东西向(EW)
加速度记录反应谱(实线)与合成加速度
时程反应谱(虚线)的对比

3.3 近场地震动合成结果与讨论

1, 2, 3, 4, 5 号等近场 5 个台与唐山主震、5.7 级余震的震中距 Δ , Δ_s , 及 5 个台记录的余震加速度峰值 A_{smax} 、合成的加速度峰值 A_{max} 见表 7.

图 5a, b 分别为 5 号台观测的小震记录、合成的唐山主震加速度时程. 虽然没有真实记录可用来检验这 5 个台的合成结果, 但合成结果符合唐山地震烈度的分布特征. 如玉田台(5 号台)距唐山地震震中虽小于迁安台(3 号台)的震中距, 但不仅该台合成加速度的峰值小于迁安台, 而且合成加速度的反应谱在 0.3~15 Hz 范

围内均为迁安台结果的 $\frac{1}{2}$ 或更小(见图 6). 这一结果与迁安是Ⅷ度破坏区、玉田是低烈度异常区(Ⅵ度)的震害分布情况相符. 1 号台、2 号台同处震中地区, 但 2 号台合成加速度峰值要比 1 号台小得多, 这与二处场地条件有关, 1 号台场地为第四纪复盖层, 厚约 100 m,

表 7 5 个近场台的 Δ_s , Δ , A_{smax} , A_{max}

编号	台站名称	Δ_s/km	Δ/km	$A_{smax}/10^{-2}\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		$A_{max}/10^{-2}\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	
				NS	EW	NS	EW
1	唐山机场台	66	5	12	13	1124	925
2	唐山水泥厂台	64	2	4	4	288	326
3	迁安台	7	59	136	140	317	390
4	昌黎台	32	80	32	21	29	23
5	玉田台	92	47	4	6	208	236

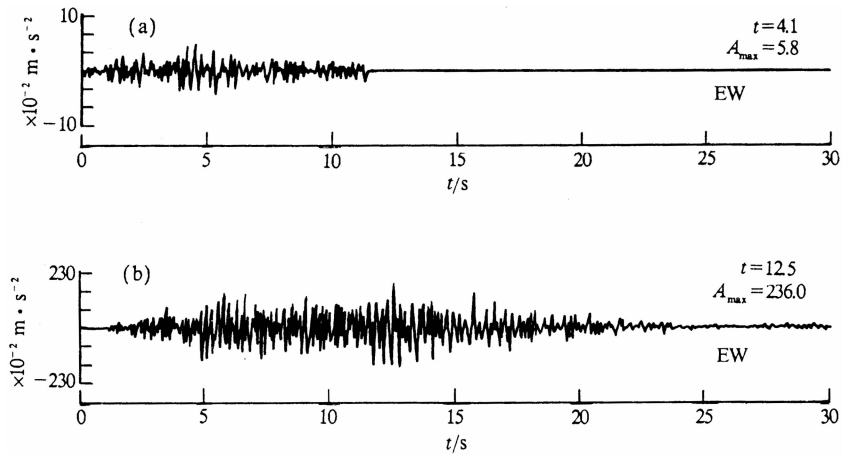


图 5 近场 5 号台观测的余震加速度记录(a)和合成的加速度时程(b)

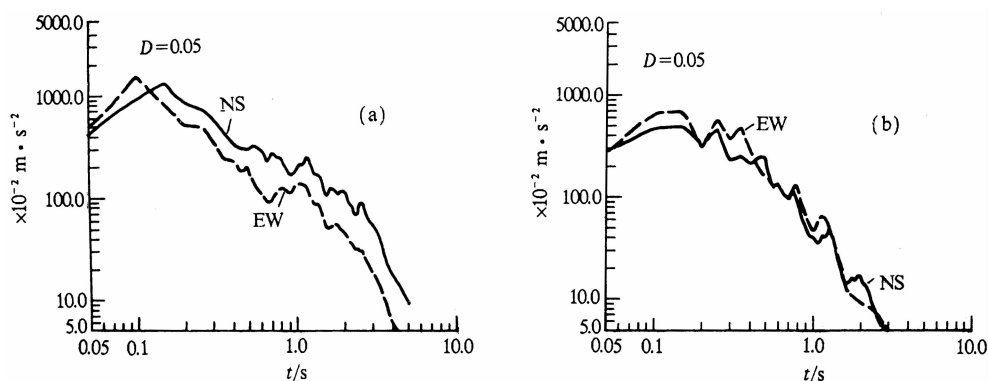


图 6 近场 3 号台(a)和 5 号台(b)合成加速度反应谱的对比

而 2 号台场地为基岩, 实地调查也反映 2 号台所在的唐山水泥厂的震害较轻. 值得注意的是, 这两个台的加速度峰值的差别在小震记录中就已得到反映, 这说明经验格林函数具有反映复杂场地条件影响的优越性. 合成结果表明唐山地震近场加速度峰值达 1.1 g , 这一结果与近年发生的一些大震(如日本兵庫县南部地震等)中记录到的最大峰值接近.

4 结论

通过唐山地震近、远场加速度的合成, 可以得出以下结论:

(1) 唐山地震近、远场加速度的合成结果说明, 能用改进的经验格林函数法有效地估计大震近场地面运动的时程. 这种方法计算简单, 又能反映复杂的震源破裂过程、介质传播过程和场地影响的一些主要特征, 适合在工程地震中用来估计场地地震动时程.

(2) 本文在用半经验方法估计唐山地震近、远场地震动时所建立的唐山地震非均匀断层模型是可行的.

(3) 合成结果表明唐山近场加速度峰值达 1.1 g . 虽然这是一种半经验估计, 但与近年一些大震中记录到的近场最大加速度峰值接近, 与唐山地震震中烈度分布特征相符, 因而可供在高烈度区进行抗震设计时参考.

本研究得到中国科学院院士、国家地震局地球物理研究所陈运泰教授和国家地震局工程力学研究所廖振鹏研究员的支持与帮助; 国家地震局工程力学研究所彭克中、胡成祥等提供了宝贵的强震观测资料. 在此, 笔者表示由衷的感谢.

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. 地震学报, 11(4): 337~350
胡聿贤等, 1986. 参考唐山地震确定的华北地区地震动衰减. 土木工程学报, 19(3): 1~10
国家地震局工程力学研究所, 1987. 唐山地震校正加速度数字化记录(上册). 北京: 地震出版社. 1~19
国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社. 113~118
罗奇峰, 胡聿贤, 1988. 合成近场地震图的经验格林函数法评介. 世界地震工程, (4): 1~6

- 罗奇峰, 1989. 近场地震动的半经验合成. 国家地震局工程力学研究所博士学位论文. 8~14
- 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. 地震工程与工程振动, **10**(3): 1~13
- 罗奇峰, 1992. 经验格林函数法加速度合成的影响因素分析. 见: 文集编委会(主编), 地震工程研究文集. 北京: 地震出版社. 433~443
- 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. 中国科学院地球物理研究所博士学位论文. 94~105
- 张之立, 李钦祖, 谷继成, 等, 1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. 地震学报, **2**(2): 111~129
- 周惠兰, 1985. 浅源走滑大震震源过程的某些特征. 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. 见: 刘恢先主编, 唐山大地震震害(第一卷). 北京: 地震出版社. 1~16
- Brune J, 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J Geophy Res*, **75**(26): 4 997~5 009
- 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 of Stuct Const Eng (Trans of Arch Inst of Jap)*, (405): 35~45
- Dan K, Ishii T, Ebihara M, 1993. Estimastion of strong ground motion in meizoseismal region of the 1976 Tangshan, China, earthquake. *Bull Seism Soc Amer*, **83**(6): 1 756~1 777
- Shedlock K M, Baranowski J, Xiao W, Hu X L, 1987. The Tangshan aftershock sequence. *J Geophy Res*, **92**(B3): 2 791~2 803

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA