

Study on the Economic and Population Loss of Beijing Area Considering the Recurrence of the Sanhe-Pinggu M8 Earthquake in 1679

Qing Wu^{*1}, Changhua Fu¹, Xiangyun Guo¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 100081

*Corresponding author: Qing Wu, Email: wuqing908@sina.com

ABSTRACT

This paper aims at the Sanhe-Pinggu M8 Earthquake in 1679, and uses the precise location of small and medium earthquakes to determine the source model and rupture properties of large historical earthquakes. Using the combination of deterministic numerical simulation method and finite fault random ground motion synthesis method, the broadband ground motion effect field of historical large earthquakes is obtained. Taking the broadband earthquake motion as input, based on the current economic and demographic data, the macroeconomic vulnerability model and life vulnerability model with GDP loss as the index are used to predict the loss of earthquake disasters in Beijing Area. This will provide support for the establishment of earthquake catastrophe model, and provide reference for insurance companies to set rates and establish earthquake risk compensation mechanism.

Keywords: Sanhe-Pinggu Earthquake, precise location of small and medium earthquakes, broadband ground motion effect field, dynamic elastic-plastic analysis method of city, macro vulnerability Model

1679年三河-平谷8级大地震重现北京地区经济人口损失研究

吴清^{*1}, 付长华¹, 郭祥云¹

1 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081

通讯作者: 吴清, 电子邮箱: wuqing908@sina.com

摘要

本文以1679年三河-平谷8级大地震为目标, 利用中小地震精定位, 确定历史大震震源模型和破裂性质; 利用确定性地震动数值模拟方法和有限断层随机地震动合成方法的结合, 得到历史大震的宽频带地震动影响场; 以宽频带地震动为输入, 基于现有经济、人口等资料, 利用以国民生产总值GDP损失为指标的宏观经济易损性模型和生命易损性模型对地震灾害损失进行预测, 展示在历史大震重现的情景下, 北京地区可能会面临的损失, 为建立地震巨灾模型提供支撑, 为保险公司厘定费率、建立地震风险补偿机制提供借鉴。

关键词: 三河-平谷大地震, 中小地震精定位, 宽频带地震动影响场, 城市动力弹塑性分析, 宏观易损性模型

1 引言

1976年唐山地震以后, 我国除东北地区深震和台

湾地区发生的地震外, 6.5级以上地震全部发生在西部地区, 大多数7级以上大地震发生在青藏高原无人

区,即巴颜喀拉块体周缘,使得许多人认为中国大地震都发生在西部地区。事实上东部地区大地震活动曾经也是非常强烈、频繁的,历史上华北地区及邻近地区一共发生了8次7级以上大地震,其中8级以上大地震3次,包括1654年天水8级大地震、1668年山东郯城8.5级大地震、1679年三河平谷8级大地震。再如,1966-1976年间,首都圈附近发生了4组7级以上大地震,包括1966年邢台6.8级和7.2级地震、1969年渤海湾7.4级地震、1975年海城7.3级地震、1976年河北唐山7.8级大地震和滦县7.1级地震^[1]。这些历史大地震曾造成过巨大的人员伤亡和巨额的经济损失。据记载,1303年山西赵城洪洞8级地震造成“死亡20万有余”、“山川地貌为之改观”;1556年陕西华县8.3级大震死亡人数有姓名记载的就超过83万,不知名的死者及未经奏报的死者更是不计其数,这是中国历史地震中死亡最多的一次地震,为世界地震死亡人口之最;1668年山东郯城8.5级大地震,造成约5万余人死亡,破坏面积涉及方圆近千公里;1695年山西临汾8级大震“统计压毙民人五万二千六百余名”;1976年河北唐山7.8级大地震造成24万余人死亡,16万余人受伤,直接经济损失达54亿元。

东部地区集中涵盖了中国的政治、文化、经济中心,改革开放以来,大量的人口、资产和重大设施快速向这些城市集中,暴露于大地震危险区域的人口、资产以指数方式迅速累积,导致地震风险剧烈飙升。以北京地区为例,北京常住人口2015年已经达到2170.5万人,地区生产总值达到2.3万亿元,分别是1978年的2.49倍和150倍。大部分城市地区的房屋建筑和基础设施抗震能力先天不足、未老先衰。东部大城市与城市群地区人口稠密、经济发达,1次8级地震可造成数万甚至数十万人死亡,数万亿经济损失,是我国社会经济发展和重大威胁和高风险源,必须加以高度重视和防控。

本文从地震学的角度出发,以1679年三河-平谷8.0级大地震为例,基于现有经济、人口等资料进行地震灾害损失预测研究,重现东部地区历史大震灾害,为地震巨灾保险提供支撑,为震灾风险管理提供依据,切实提高应对震灾风险的能力以及防灾减灾能力,对于社会经济建设和发展规划具有十分重要的意义。

2.研究方法

利用现代应力场的研究结果并结合地震地质资

料,推断地震的震源机制解是获取缺乏仪器观测的历史强震震源机制解的一种可能途径。通过分析强震震源断层的状况和破裂方式,认识该区域历史强震的震源构造,对于重现历史大震具有重要科学意义。中小地震的定位精度对于分析地下应力场和断层构造起着非常重要的作用。

有限差分法是目前地震动模拟中比较成熟、常用的数值方法(也称为确定性方法),通过求解相关波动方程可以准确获得任意非均匀介质(包括粘弹性、各向异性、随机介质、多孔介质等)内的地震波场解^[2-11]。随机地震动模拟方法基于有限断层的假定,将发震断层划分成一系列小子源。每个子源的震源谱满足 ω^2 方法则,当频率小于拐角频率时谱幅值保持恒定值不变,但当频率超过拐角频率时谱幅值按 ω^2 平方律衰减。各子源的拐角频率(静态拐角频率)与该子源的地震矩和应力降有关^[12-14]。

Motazedian and Atkinson^[15]在此基础上提出了“动态拐角频率”的方法,认为子源的拐角频率并非一成不变,而是与断层破裂的持续过程相关。这种方法可保证断层辐射的总能量守恒,而无须考虑子断层大小的影响,也不需要设置每个子源多次发生子震。随机振动合成方法依赖经验的衰减关系进行地震动模拟,对于复杂介质和特殊场地(例如盆地)中的地震动,特别是长周期地震动,却估计不足。确定性地震动数值模拟方法和随机振动合成方法在地震动模拟中各有优劣,我们可以利用两种方法各自的优点来模拟宽频带地震动。

传统的地震灾害损失研究通常采用易损性分类清单方法,要求对研究区内建筑设施建立分类数据库,并详尽的收集资料用以建立震害矩阵。但面对现代社会的快速发展,使得传统的方法在收集并及时更新资料方面都存在着明显的局限性,而这种详细的分类资料在许多地区甚至是难以获得的。陈颀等^[16]在执行联合国“国际减轻自然灾害十年”计划中论证了可以将承灾体脆弱性转化为国民生产总值(GDP)脆弱性,GDP资料容易获得且更新及时,随后陈颀等^[17-18]、陈棋福等^[19]、米宏亮^[20]、刘吉夫等^[21-22]在此思路开展了地震灾害损失预测研究,建立了地震宏观风险分析模型。刘吉夫等^[23]采用陈颀等人提出的宏观易损性分析思路,完善了该分析方法的人口和GDP分配方案,以烈度区为分配单位,同时考虑了前人忽略了的人口死亡率为0时的特殊情况,在收集大量灾害性地震资料的基础上,拟合出来新的地震生命易损性模型。王晓青等^[24]将此方法用于汶川地震损失快速评估

中,其结果与袁一凡等^[25]进行现场调查得出的经济损失与人口伤亡结果进行了比较,结果较为一致。杨斌等^[26],范志伟等^[27]都通过实际震例验证了王晓青等^[24]提出的宏观经济易损性模型在小尺度空间范围内震后经济损失快速评估中的可行性。本文采用这一思路,在历史大地震重现情景下,给出经济损失和人员伤亡预测结果。

2.1 三河-平谷历史大震震源参数的确定

利用小震精定位获得三河-平谷地区现代小震分布。地震震源位置的空间分布与发震断层有着密切的关系,在近似的情况下,我们可以认为发震断层面可以用一个平面来模拟,且设大多数地震发生在这个平面断层的附近,即可通过地震震源位置来确定发震断层面参数,即寻找一个平面,使所有地震震源位置到这个平面距离的平方和最小^[28]。

根据地震密集程度确定断层面所在位置。用于确定断层参数的地震是确定的,因此,采用中心的90%地震所在区域来确定断层面的位置似乎是合理的,10%的地震落在断层面之外的区域。因此,我们将地震从集最上部的2.5%地震的下边界、最下部发生的2.5%地震的上边界、最左端的2.5%地震的右边界和最右端的2.5%地震的左边界分别作为断层面的上边界、下边界、左边界和右边界,由此确定断层面的四个顶点的位置。

假定断层所在区域的应力场作用在该断层面上的剪切应力方向与地震断层错动方向相同,那么断层的滑动角即为断层面上剪应力方向与断层走向的夹角。

根据现今的小震活动推断震源参数和断层面。三河-平谷地震发震断层的平面分布位置如图1所示。

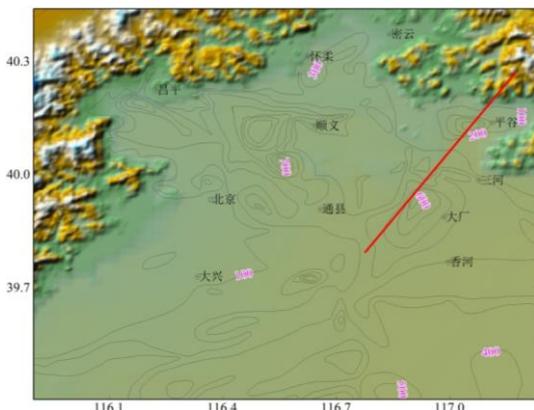


图1 三河——平谷地震发震断层地表投影

震源模型的主要参数为:①发震断层两端点坐标分别为(116.8°E、39.8°N)和(117.2°E、40.3°N),断层面长度为63km,宽度为16km,面积1008km²,走向为32.5°,倾角90°,滑动角均为260°,断层上端埋深2km;②设定矩震级为Mw7.5级,释放的地震矩为1.9953e+20N·m;③断层面上分布有两个凹凸体。主要凹凸体分布于断层面北段,面积为160km²。次级凹凸体分布于断层面南段,面积为60km²。最大滑动量约为8m;④断层面上凹凸体平均滑动量比为2.0,背景域平均滑动量比为0.7;⑤初始破裂点位于断层面中部,以初始破裂点为中心,破裂以2.8km/s的速度向四周扩展,直达断层面边界处停止;⑥采用钟形震源滑动速率函数描述地震能量释放的物理过程,震源上升时间取为2.5s。

2.2 三河-平谷大震地震动模拟

收集并整理地震勘探结果、地质资料、钻孔资料、波速测试资料及地形等资料,建立精确的地下介质三维速度结构模型。获取地下不同速度层界面的三维几何形态以及各层的波速、密度、介质品质因子等信息。根据2.1节得到的历史大震震源参数进行地震动数值模拟,得到基岩地表长周期段地震动时程。根据历史大震震源参数的研究成果,采用Motazedian and Atkinson^[15]提出的随机振动合成方法,模拟基岩地表高频地震动。将确定性地震动数值模拟得到的地震动进行低通滤波,对随机振动合成方法的地震动进行高通滤波,然后在时域内将滤波后的长周期地震波和短周期地震波进行叠加,获得基岩地表宽频带地震动时程。图2为三河-平谷大震地震动模拟PGV(Peek Ground Velocity)分布图。由图2可以看到,PGV最大值达到240cm/s,震中烈度达XI度。

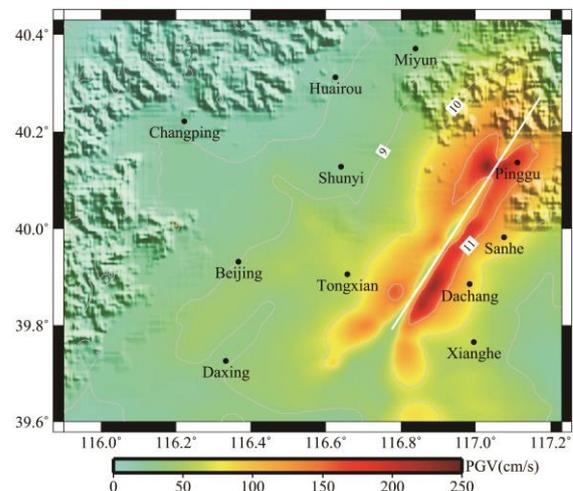


图2 三河-平谷地震动模拟 PGV 分布图

(图中数字代表烈度)

2.3 地震宏观经济易损性模型和生命易损性模型

王晓青等^[24]给出了宏观经济易损性模型:

$$F(I, GDP) = \begin{cases} 2 \times 10^{-8} \cdot I^{9.8082} & \text{人均GDP} < 2700 \\ 2 \times 10^{-10} \cdot I^{11.585} & 2700 \leq \text{人均GDP} < 10000 \\ 4 \times 10^{-11} \cdot I^{11.377} & \text{人均GDP} \geq 10000 \end{cases} \quad (1)$$

生命易损性模型:

$$R(I, GDP) = \begin{cases} 6 \times 10^{-13} \cdot I^{9.849} & \text{人均GDP} < 2700 \\ 9 \times 10^{-17} \cdot I^{14.977} & \text{人均GDP} \geq 2700 \end{cases} \quad (2)$$

式中, I 代表烈度。

以 2016 年的北京统计年鉴数据为基础, 带入到宏观经济易损性模型和生命易损性模型, 结合三河-平谷大震情景模拟地震动值, 对比直接带入利用衰减关系计算得到的地震动值, 给出三河-平谷历史大

震重现情况下经济损失和生命损失评估。结果见表 1。衰减关系是地震动的平均表征, 而地震动模拟可以更多的反映震源特性。

3 结论与讨论

根据地震动模拟结果, 在当前抗震设防水平下, 三河-平谷大地震重现, 可能对北京地区造成 5 万亿左右的经济损失, 人口损失在三十五万人左右; 而利用衰减关系计算, 不考虑地下结构土层影响, 三河-平谷大地震重现, 可能对北京地区造成 2 万亿左右的经济损失, 人口损失在十二万人左右。不管哪种形式, 当前的抗震设防形势依然十分严峻。

地震动模拟涉及到各种参数的设定, 存在一定的不确定性, 但此方法可以为抗震设防、应急备灾、决策制定提供一定的参考。

表 1 三河-平谷大震再现情景下北京地区经济人口损失

县(市)区	地震动模拟情景			衰减关系计算		
	烈度值	GDP 损失(亿元)	人口损失(万人)	烈度值	GDP 损失(亿元)	人口损失(万人)
东城	9	5925.48	1.547	8	2485.86	0.49
西城	9	10353.07	2.218	8	3647.86	0.56
朝阳	9	14861.12	6.793	9	7838.03	2.93
丰台	9	3727.49	3.973	8	1055.06	0.75
石景山	8	362.79	0.191	8	315.00	0.16
海淀	8	4059.97	1.085	8	3657.11	0.95
门头沟	8	118.82	0.094	7	44.98	0.03
房山	8	456.48	0.331	7	193.71	0.11
通州	10	6430.36	12.189	9	2043.09	2.69
顺义	8	1197.70	0.325	9	3575.27	1.37
昌平	7	124.10	0.082	8	364.77	0.34
大兴	9	1676.08	2.984	8	676.77	0.90
怀柔	7	42.73	0.016	8	116.24	0.06
平谷	10	2080.24	3.730	9	899.77	1.24
密云	8	188.96	0.146	8	277.42	0.24
延庆	6	3.50	0.001	7	36.84	0.03
合计		51609.00	35.705		27227.78	12.85

致谢

本论文由科技部基础资源调查专项（2018FY100504）和科技部重点研发计划（2018YFC1504601）联合资助。

参考文献

- [1] 高孟潭, 2016, 新一代国家地震区划图与国家社会发展, 城市与减灾, (3) :1-5
- [2] Virieux J. 1986. P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51:889-901.
- [3] Levander A R. 1988. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. *Geophysics*, 53:1425-1436.
- [4] Graves R W. 1996. Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86 (4):1091-1106.
- [5] Ohminato T, Chouet B A. 1997. A free-surface boundary condition for including 3D topography in the finite-difference method. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87:494-515.
- [6] Aoi, S., H. Fujiwara, 1999, 3D finite-difference method using discontinuous grids. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89:918-930.
- [7] Aoi S., T. Hayakawa, H. Fujiwara, 2004, Ground Motion Simulator: GMS. *Geophys. Explor. (Butsuri-Tansa)*, 57:651-666 (in Japanese with English abstract).
- [8] Aoi S., R. Honda, N. Morikawa, H. Sekiguchi, H. Suzuki, Y. Hayakawa, T. Kunugi, H. Fujiwara, 2008, Three-dimensional finite-difference simulation of long-period ground motions for the 2003 Tokachi-Oki, Japan, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 113, no. B07302, doi: 10.1029/2007JB005452.
- [9] 高孟潭, 俞言祥, 张晓梅, 等. 2002. 北京地区地震动的三维有限差分模拟[J]. *中国地震*, 18(4): 356-364.
- [10] 张伟. 2006. 含起伏地形的三维非均匀介质中地震波传播的有限差分算法及其在强地面震动模拟中的应用. 北京大学博士学位论文.
- [11] 付长华, 高孟潭, 陈颀. 2012. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响. *地震学报*, 34(3): 374-382.
- [12] Hanks T C. 1979. B value ω -r seismic source models: implication for tectonic stress variations along active crustal fault zones and the estimation of high frequency strong ground motion. *J. Geophys. Res.*, 84(B5):2235-2242.
- [13] Mcguire R K, Hanks T C. 1980. RMS accelerations and spectral amplitudes of strong ground motion during the San Fernando, California earthquake. *BSSA*, 70(5):1907-1919.
- [14] Boore, D. , 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73: 1865-1894.
- [15] Motazedian D., and Atkinson G.M.,2005, Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency.*Bull. Seism. Soc. Am.* 95, 995-1010.
- [16] 陈颀,朱宏任.1991.地震灾害量化研究.国际地震动态,(5):5-9
- [17] 陈颀, 陈棋福, 陈凌, 1999.地震损失预测评估中的易损性分析[J]. *中国地震*, 15(2):97-105.
- [18] 陈颀, 彭文涛, 徐文立, 2004, 21世纪地震灾害的一些新特点[J], *地球科学进展*, 19 (3): 359-363
- [19] 陈棋福, 陈颀, 陈凌, 1997, 利用国内生产总值和人口数据进行地震灾害损失预测评估, *地震学报*, 19 (6): 640-649
- [20] 米宏亮, 2002, 地震灾害宏观易损性研究与震害快速评估的网络实现[D]. 硕士学位论文, 中国地震局分析预报中心

- [21] 刘吉夫, 2006, 宏观震害预测方法在小尺度空间上的适用性研究[D]. 博士论文, 中国地震局地球物理研究所.
- [22] 刘吉夫, 陈颀, 史培军等, 2008, 中国大陆地震风险分析模型研究, 北京师范大学学报(自然科学版), 44(5): 520-523
- [23] 刘吉夫, 陈颀, 史培军等, 2009, 中国大陆地震风险分析模型研究(II): 生命易损性模型, 北京师范大学学报(自然科学版), 45(4): 404-407
- [24] 王晓青, 丁香, 王龙, 等, 2009, 四川汶川8级大地震灾害损失快速评估研究[J]. 地震学报, 31(2):205-211.
- [25] 袁一凡, 2008, 四川汶川8.0级地震损失评估[J]. 地震工程与工程振动, 28(5):10-19.
- [26] 杨斌, 马朝晖, 2013, 灾害损失宏观预测模型震后快速评估, 地震地磁观测与研究, 34(3/4): 213-216
- [27] 范志伟, 杨凡, 陈晓燕, 2016, 基于宏观经济指标对张家口地区地震灾后经济损失快速评估, 防灾减灾学报, 32(3): 15-18
- [28] 王鸣, 王培德, 1992, 1989年10月18日大同-阳高地震的震源机制和发震构造, 地震学报, 14(4): 407-415