

文章编号: 0253-3782(2003)05-0475-04

中国强地面运动研究进展^{*}

许力生 俞言祥 陈运泰

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 简要总结了近年来我国在强地面运动资料的处理、近断层地面运动的影响因素、强地面运动的模拟和宽频带反应谱等方面的研究工作。同时,回顾与展望了我国在强地面运动研究方面的国际合作进展。

关键词 强地面运动 研究进展

中图分类号: P315.63, P313.4 **文献标识码:** A

引言

地震震源、传播路径和场地条件都是影响强地面运动的重要因素。工程地震学家更关心场地效应,而地震学家则更关心传播路径与地震震源效应。工程地震学家与地震学家越来越认识到合作研究的必要性。如果工程地震学家与地震学家共同合作,很多问题可望解决得更快更好。例如,地震动的定量描述、地震动参数估计方法、强震记录数据库的建立、长周期地震动特性、近断层大速度脉冲特性、地面运动场的描述、缺少加速度记录地区的衰减规律、震源时间函数特征、地震危险性评价、地震活动性评价中的不确定性问题、地震危险性评估中确定性方法和概率方法的改进、考虑强地面运动持续时间的设计规范、地形条件及最终设计标准问题,等等(Hu, 2001)。在这篇短文中,我们简要总结了近年来我国地震学家与工程地震学家在强地面运动方面的研究进展。

1 强地面运动资料的处理

观测资料的正确使用在科学的研究中至关重要。不正确地使用资料会导致荒谬的结论。因此,在使用资料前,去伪存真的资料处理是非常重要和十分必要的。强地面运动资料中一个常见的问题是基线偏移,即零点飘移。其中最重要的原因是,断层附近的地表在地震过程中发生的形变使地震仪在地震结束之前发生了倾斜。1999年9月21日台湾集集 M_s 7.6 地震的强震记录中普遍存在着基线偏移的现象。为了使资料准确可靠,王国权(2001)提出了一种基线校正的方法,并将此方法应用于台湾集集 M_s 7.6 地震的 70 个台的 210 条记录中。他应用这种校正方法,对校正的加速度记录积分,获得了速度记录和位移记录,并计算了相应的反应谱;并注意到大约小于 10 s 的反应谱几乎不受基线校正的影响,而低频段的反应谱则受基线校正的影响很大。因此,在计算峰值速度、峰值位移和永久位移时,要特别注意基线偏移造成可能影响。

* 国家重点项目(2002CB412706)资助。中国地震局地球物理研究所论著 03AC1027。
2003-02-19 收到初稿, 2003-05-27 收到修改稿, 2003-06-01 决定采用。

2 近场强地面运动的影响因素

离断层的距离和断层的破裂方向是影响近断层强地面运动的重要因素之一。王国权(2001)对1999年9月21日台湾集集 $M_s 7.6$ 地震的研究发现,在距断层小于3 km的地方造成的地面运动比在其它地方的地面运动大得多;平行于断层滑动方向的分量远远大于垂直于断层滑动方向的分量。然而,对反应谱分析表明,破裂方向仅仅对短周期(<0.6 s)的强地面运动才有影响(王国权, 2001)。地震断层的几何学特征和运动学特征也是影响强地面运动的重要因素。1999年9月21日台湾集集 $M_s 7.6$ 地震是一次以逆冲为主的事件,地震断层的倾角较小。通过回归方法建立的这次地震的水平和垂直向峰值加速度的经验衰减关系和由实际的峰值加速度记录建立的衰减关系的比较表明,在断层上盘和下盘的峰值加速度之间具有系统的差别。断层上盘的峰值加速度明显高于断层下盘的峰值加速度。峰值加速度相对于地表破裂的非对称性,从观测到的峰值加速度等值线图也可以清楚地看到,上盘的峰值加速度随距离衰减较慢(俞言祥, 高孟潭, 2001)。

实际地震引起的强地面运动往往是非常复杂的。1999年9月21日台湾集集 $M_s 7.6$ 地震的地面运动有许多突出特点:第一,速度脉冲大。这次地震产生的最大垂直向、南北向和东西向的峰值速度分别为228.6, 292.2和280.5 cm/s。而在此前,记录到的最大的速度脉冲为177 cm/s,这是由1994年的北岭地震产生的;第二,永久位移大。用强震仪记录到的这次地震的最大垂直向位移约为10 m,最大水平向位移约为9 m;第三,具有丰富的长周期成分。宽频带数字地震仪获得的记录表明,大量的长周期地面运动(从断层附近的观测点获得的8套记录)在周期为6 s时,其水平向反应谱的平均值大于0.2 g(g表示重力加速度),甚至在周期为8 s时水平向反应谱的平均值加上一倍方差仍大于0.2 g(俞言祥, 高孟潭, 2001)。

影响强地面运动的因素很多,地震学家和工程地震学家一直在试图用不同的方法和从不同的途径理解和解释这种复杂的地面运动。金星等(Jin *et al.*, 2001)根据震源理论,借助于地震动傅里叶谱随空间变量的展开,定量分析了地震震源对强地面运动空间相关性的影响,并在震源模型相对简单(即地震震源为一具有常破裂速度的有限长单侧破裂线源)的情况下,获得了相邻两点之间的地震动谱的关系。

强地面运动的影响因素除了稳定的影响因素以外,还有许多随机的因素。而这种随机因素只能通过随机分析的方法予以处理。王国权(2001)采用样本集的概念对1999年9月21日台湾集集 $M_s 7.6$ 地震地面运动资料进行了分析。分析表明,两水平分量在幅值和周期的统计特性上基本没有差别,但在相关特性上却差别较大;垂直运动和水平运动在统计特性和相关特性上都存在着明显的差别。从集系和样本函数两个方面的相关性研究表明,加速度时程的相关函数包含着丰富的随机分量。根据加速度时程相关矩阵的特征,地震动可以看成是一个超随机过程。对速度和位移时程的随机特性的初步研究表明,速度时程的随机性要比加速度时程的随机性小,而位移时程几乎接近于确定性过程(王国权, 2001)。

3 强地面运动的模拟与预测

地震引起的地面运动一方面取决于产生地震波的地震震源,另一方面则取决于包括场地条件在内的地震波传播介质。一些研究人员则侧重于研究地震震源性质与地面运动的关

系, 而另外一些研究人员侧重于研究传播介质与地面运动的关系。近年来, 这两方面的研究都取得了长足的进展。罗奇峰(Luo, 2000)考虑了一次震级为 6.5、发生在距上海市区 100 km 外的设定地震, 用经验格林函数方法和理论方法预测了上海地区可能的地面运动。用两种方法预测的平均峰值加速度分别为 $25 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 和 $33 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 。这一结果和用地震危险性分析方法估计的 50 年超越概率 63% 的峰值加速度 $24 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 的结果非常一致。丁志峰等 (Ding *et al.*, 2003a, b) 用横向不均匀非弹性介质中合成地震图的计算方法, 模拟了北京城区的地面运动。不但把合成时程和 1998 年张北地震的地震记录作了比较, 而且把合成时程和观测的 1976 年唐山地震的宏观地震烈度的分布作了比较。针对西集镇和北京市区计算了三分向合成地震图。通过模拟唐山和张北地震的地面运动发现, 北京市西北部地区的第四纪沉积层放大了地面运动的峰值, 增加了地面运动的持续时间。这一结果与 1976 年唐山地震时西集镇异常高的宏观烈度具有很好的相关性, 也与 1998 年张北地震时北京市区记录到的地面运动具有很好的相关性。因此, 北京市第四纪沉积层的厚度被认为是控制局部场地效应的关键因素。根据沉积层的厚度, 将北京市划分成 4 个区, 分别计算了它们的反应谱。计算表明, 高达 0.1 g 的谱峰值与过去的地震活动性是一致的, 如果有一个类似于 1697 年三河-平谷地震的地震发生, 则有可能会超过这个值。

4 宽频带反应谱

越来越多的实例表明, 一些大型结构即使远离震中, 也会遭到破坏。因此, 在设计一些像超高层建筑和大跨度桥梁这种固有周期大于 5 s 或 10 s 的现代建筑时, 不得不考虑远震以及长周期地震动的影响。过去, 由于观测技术水平的限制, 从模拟式强震仪获得的地震动资料在长周期部分具有明显的缺陷, 由此建立的地震动反应谱在低频段缺乏必要的信息。近年来, 观测技术的提高使我们能够利用宽频带观测资料和现代地震学方法计算宽频带的反应谱。胡聿贤和俞言祥(Hu, Yu, 2000)提出的地震学与工程学相结合估计远震宽频带反应谱的方法, 在长周期段(2~20 s)使用了地震学家使用的宽频带数字记录, 并考虑震级与位移的关系; 而在短周期段(0.1~3 s)则应用从加速度强震仪获得的强地面运动资料。利用这种方法, 可以获得周期长达 10~20 s 的反应谱, 而且具有足够的精度和可靠性(Yu *et al.*, 2000; Yu, Hu, 2001)。

5 国际合作与未来发展

在这样一个信息全球化的时代, 学科的发展离不开国际合作。在过去的几年中, 中国专家积极参与国际合作, 从事强地面运动研究, 收到了良好的效果。1998 年 8 月~1999 年 3 月期间, 中国专家参与了模拟旧金山湾区的强地面运动的合作研究。在合作中提出了一种计算地面运动的方法, 并通过 3 个设定地震, 检验了这种方法。在使用和检验现有的数据库和各种地面运动模型方面取得了很好的成效(Qi, 2001)。我国地震学家和工程地震学家认为进一步加强国际合作是十分必要的。未来的合作主要应该集中在建立加速度数字地震仪构成的强地面运动台阵、观测技术、数据处理及观测资料等应用方面。同时应该考虑下列问题: ①长周期地面运动; ②近断层地面运动; ③多分量地震动及其相关性; ④强地面运动的衰减; ⑤地表破裂与地震震源、传播效应及场地之间的关系; ⑥模拟破裂的方法; ⑦强地面运动模拟的综合过程; ⑧模拟强地面运动的宽带格林函数过程; ⑨大沉积

盆地的地震响应分析; ⑩ 用于活断层观测和评价的 GIS 系统 (Qi, 2001).

参 考 文 献

- 王国权. 2001. 1999 年台湾集集地震的近断层地面运动特征[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 1~90
- 俞言祥, 高孟潭. 2001. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报, 23(6): 615~621
- Ding Zhifeng, Chen Yuntai, Panza G F. 2003a. Estimation of site effects in Beijing city[J]. *Pure Appl Geophys* (in press)
- Ding Zhifeng, Romanelli F, Chen Yuntai, et al. 2003b. Realistic modeling of seismic wave ground motion in Beijing city [J]. *Pure Appl Geophys* (in press)
- Hu Yuxian, Yu Yanxiang. 2000. A seismological-engineering approach to the estimation of wide response spectrum for distant earthquake[A]. In: Ko J M, Xu Youlin eds. *Advances in Structural Dynamics*, Vol. I[C]. Amsterdam: Elsevier, 193~200
- Hu Yuxian. 2001. Strengthen the link between engineering and seismology[A]. In: Spencer Jr B F, Hu Yuxian eds. *Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium*[C]. Lisse: A A Balkema, 103~108
- Jin Xing, Chen Chao, Ding Haiping, et al. 2001. Research on effects of seismic source on space correlation [A]. In: Spencer Jr B F, Hu Yuxian eds. *Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium*[C]. Lisse: A A Balkema, 153~158
- Luo Qifeng. 2000. Estimation of Ground motions affecting Shanghai by long distance earthquake[A]. In: Ko J M, Xu Youlin eds. *Advances in Structural Dynamics*, Vol. I[C]. Amsterdam: Elsevier, 225~232
- Qi Xiaozhai. 2001. An overview of US-PRC cooperation on earthquake engineering at IEM and future prospects of the program[A]. In: Spencer Jr B F, Hu Yuxian eds. *Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium*[C]. Lisse: A A Balkema, 127~131
- Yu Yanxiang, Hu Yuxian, Wang Suyun. 2000. Calculation of long-period ground motion response spectrum by using broad-band digital record[A]. *Proceed of 12th WCEE*[C]. Aucland, New Zealand, paper ID, 1424
- Yu Yanxiang, Hu Yuxian. 2001. A combined method to establish attenuation law of wide response spectrum[A]. In: Spencer Jr B F, Hu Yuxian eds. *Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium*[C]. Lisse: A A Balkema, 177~182

ADVANCES IN GROUND MOTION STUDIES IN CHINA

Xu Lisheng Yu Yanxiang Chen Yuntai

(Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper briefly summarizes the works in the processing of strong ground motion data, the factors affecting strong ground motion, the modeling of strong ground motion and the calculating of broad-band response spectrum which have been done recent years by engineering seismologists and seismologists of China. In addition, we think back to the international cooperation in strong ground motion of the recent years and make some expectations for the future.

Key words: strong ground motion; advances in research