

黄河, 廖旭, 万波, 赵伯明, 2007. 抚顺活断层探测震源计算模型的建立及优化. 震灾防御技术, 2(3): 264—269.

抚顺活断层探测震源计算模型的建立及优化¹

黄河¹⁾ 廖旭¹⁾ 万波¹⁾ 赵伯明²⁾

1) 辽宁省地震研究所, 沈阳 110031

2) 北京交通大学, 北京 100044

摘要 本文通过对断层震源模型的讨论, 明确了建立有限震源模型的方法。在考虑抚顺活断层的空间展布、错动方式、凹凸体的数量等多种参数的综合影响的基础上, 建立了抚顺目标断层的震源计算模型, 为同类工作的开展提供了参考。

关键词: 震源模型 有限断层 凹凸体

引言

在预测将来可能发生地震的地震动时, 最好的方法是通过建立符合地震学和地质学的接近真实情况的地震震源和介质模型, 利用数值模拟方法进行地震发生(断层的破裂过程)和地震波动的模拟, 进而通过系统地分析和评价地震动的模拟结果, 把握地震动的性质和特征。从国际同类研究的发展状况来看, 基于三维地震模型进行强地震动数值模拟预测, 已经成为今后的主要研究方向。建立断层震源模型为近断层强地面运动影响场的数值模拟, 从而确定合理的地震荷载输入机制, 是近断层强地面运动影响场数值模拟的重要基础和关键环节。近年来日本、美国以及台湾的破坏性大地震的近断层观测资料、震源过程反演和近断层强地震动数值模拟都表明: 在近断层区域内, 震源因素对强地面运动及其特征的影响不可以简化为单一震级参数的影响, 而是应考虑为断层的空间展布、错动方式、凹凸体的数量、大小、位置、破裂传播速度等多种参数的综合影响。这就意味着研究近断层强地面运动时, 必须要采用基于有限断层假定的震源模型。

1 关于有限断层震源模型

建立断层震源模型, 为近断层强地面运动影响场的数值模拟, 确定合理的地震荷载输入机制, 是近断层强地面运动影响场数值模拟的重要基础和关键环节。

构造地震主要是由地下岩层的突然剪切错动引起的, 实际地震断层的几何形状可能很复杂, 作为初级近似, 通常将地震断层简化为具有三维空间的矩形平面, 即有限断层假定, 这

1 中国数字地震观测网络项目, 沈阳活动断层探测与地震危险性评价分项目

【收稿日期】2007-04-15

【作者简介】黄河, 男, 生于1965年。副研究员。主要从事地震工程研究。E-mail: hhlnsy@163.com

样在技术上就可以建立具有曲面三维构造的有限震源模型。

近年来,在日本、美国以及台湾得到的破坏性大地震近断层观测资料、震源过程反演和近断层强地震动数值模拟都表明(Pitarka, 1998):在近断层区域(一般指断层距不大于 15km 或 20km 的区域)内,震源因素对强地面运动及其特征的影响不可以简化为单一震级参数的影响,而是应作为断层的空间展布、错动方式、凹凸体的数量、大小、位置、破裂传播速度等多种参数的综合影响来考虑。这就意味着研究近断层强地面运动时,必须采用基于有限断层假定的震源模型。

建立基于有限断层假定的震源模型,主要包括三项内容:一是确定断层全局震源参数;二是确定局部震源参数;三是基于全局和局部震源参数,近似确定震源时空破裂过程。

全局震源参数是指主要影响和控制近断层强地面运动的低频和长波分量的震源参数,主要包括有限断层空间展布和错动方式的 6 个独立参数:断层的走向角 ϕ_0 、倾向角 δ 、滑动角 λ 、矩形断层沿走向的边长 L (断层长度)、矩形断层沿下倾方向的边长 W (断层宽度)以及断层的上界埋深 H 。除以上 6 个独立参数外,全局震源参数还应包括:矩震级 M_w 、断层上下盘之间的平均位错 \bar{D} 或平均应力降 $\Delta\sigma$ 以及断层平均破裂速度。

局部震源参数是指主要影响和控制近断层强地面运动的高频和短波分量,对低频和长波分量产生次要和非控制性影响的震源参数,这些参数与震源时空破裂过程的不均匀性密切相关,如凹凸体(Asperity)的数量及位置、各子震源破裂起始和终止的时间、破裂起始点和终止点的位置与破裂方向等,都是重要的局部震源参数。

震源时空破裂过程一般是指断层面滑动的时空过程(运动学模型)或断层面应力降的时空过程(动力学模型)。震害调查表明,通常靠近断层的土木工程以及城市的地震破坏,主要是由强地面运动的高频分量引起的。因此合理确定局部震源参数,建立包含足够丰富的高频分量的有限断层震源模型,对于城市和工程的防震减灾具有举足轻重的作用。

2 凹凸体模型(Asperity Model)

断层的最新研究成果表明,对断层面全体而言在发生断层错动时,并不是整个断层以均一的形式平均破裂,而是在几个区域产生较大的破裂,并释放出较多的地震能量产生地震距,这个区域称之为“凹凸体”。而考虑这种凹凸体的有限震源模型被称为凹凸体模型(Asperity Model)。通过对典型性地震事件的震源反演解进行特征性统计解析(Irikura, 2004),可得到以下结论:

- Asperity 的平均数量约为 2.6 个(相对于断层的数量);
- Asperity 的平均数量根据地震的规模为 1—3 个;
- Asperity 的面积比约为 0.22;
- 最大 Asperity 的面积比约为 0.16;
- Asperity 的滑动量比值约为 2.01;
- 背景区域的滑动量比值约为 0.71;
- Asperity 的应力降约为 10.5Ma;
- 背景区域的应力降约为 Asperity 区域的 20%。

凹凸体特征震源理论是目前近场强地震动研究中的主流震源计算模型。在模型中,凹凸体区域与背景区域的形式,合理地表现了断面上的应力或滑动的不规则空间分布。

对于抚顺活断层探测的强地震动评价, 本文将采用基于运动学模型的凹凸体模型作为震源计算模型。

3 计算震源模型

依据抚顺活断层探测地震危险性评价的结果, 本文基于有关震源模型的建立 (Somerville 等, 1999), 完成了抚顺活断层探测计算断层的凹凸体模型建模工作。

在抚顺活断层探测区中, 确定的计算断层为浑河断裂抚顺地区段 (F1A 断层)。该断层为第四纪晚期活动, 预测最大震级为 6.0 级。断层主要倾向为 SE, 倾角约为 80° , 为接近直立的逆断层, 如图 1 所示 (黑色虚线)。断层位于抚顺市区中央, 为东西走向。根据抚顺活断层探测地震危险性评价的结果, 最大地震震级为 6 级, 所确定的断层面积约 112 km^2 , 断层的长度为 14 km, 断层的宽度为 8 km, 走向 70.7° , 倾向 60° 。凹凸体部分的埋深约为 14—17 km 左右。

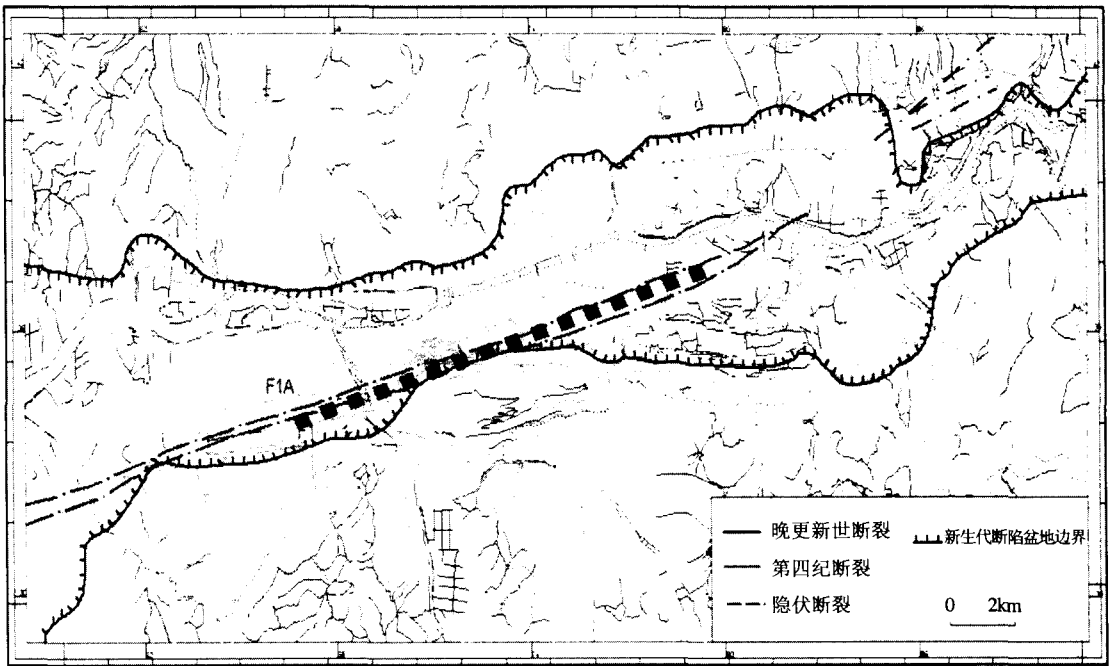


图 1 设定断层在抚顺目标区内的位置

Fig. 1 The position of the design fault in Fushun

通过上述分析, 我们确定抚顺浑河断裂抚顺地区段的震源模型为具有 2 个凹凸体的矩形断层, 其具体模型为:

- 18 km^2 的最大凹凸体 1 个;
- 7 km^2 的第二凹凸体 1 个;

凹凸体面积占断层总面积的 21.7%。

地震危险性评价结果表明, 在较浅的区域不易形成较大的应力集中, 也就是说, 在较浅的区域不易发生较大震级的地震。在考虑最大发震震级的前提下, 预测对于目标区最为不利的假设的原则, 我们将最大的凹凸体布置在地下结构较为复杂的区域, 第 2 个凹凸体相对于

最大的凹凸体布置于断层的另一侧。由于地震危险性评价结果无法确定破裂开始点位置, 参照以上原则和通常做法, 确定破裂开始点在最大的凹凸体下方 (亦即断层的下缘) 附近。凹凸体震源模型如图 2 所示。图中深色部分为凹凸体区域, 其它部分为背景区域, 星号表示破裂开始点位置。根据断层的类型和规模, 破裂传播形式确定为依开始点位置的等心圆破裂。

根据板内地震的震源特性, 对采用三维有限差分法与统计学格林函数法的混合计算方法 (Hybrid Method) 需要的震源计算参数进行推导。采用混合计算方法可最大程度地发挥每种计算方法的长处。通过断层长度、宽度、走向、倾角、滑动角 (震源机制)、矩震级、破裂传播速度、上界埋深、上断点的坐标等各项参数, 可推导出震源的宏观与微观参数。本文给出的震源参数结果列于表 1, 其中的断层长度、宽度、走向、倾角、滑动角 (震源机制)、矩震级、破裂传播速度、上界埋深、上断点的坐标等初始参数, 由抚顺活断层探测地震危险性评价结果提供。在获得以上初始参数之后, 再进行一系列的协调作业以确定其他参数, 最后根据所提出的方法可确定震源参数, 并建立相应的震源模型。

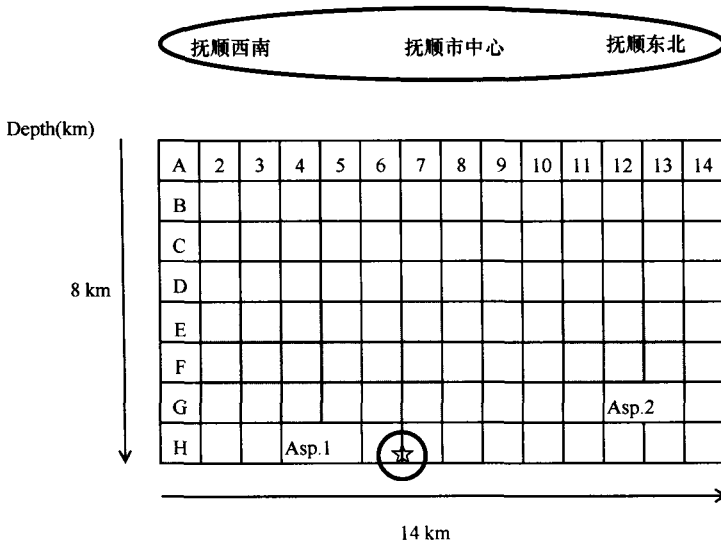


图 2 抚顺地区设定 $M6.0$ 级地震凹凸体模型

Fig. 2 The asperity distribution of the source model

构筑凹凸体模型的步骤主要包括: 确定震源物理参数 (Outer Fault Parameters) 和确定震源详细物理参数 (Inner Fault Parameters) 两项。确定震源物理参数主要包括以下内容: ①确定断层面积 (长度、宽度); ②确定平均应力降; ③确定地震规模 (M_0)。确定震源详细物理参数主要包括以下内容: ①确定粘着体总面积; ②确定粘着体应力降; ③确定粘着体的个数。有关建模的过程在 Somerville (1999) 和 Irikura (2004) 的文章中有详细阐述。

因为震源断层模型的建立原则, 对计算结果具有重要的影响, 所以在设定不均匀滑动震源模型时, 本文在基于上述合理的理论方法的基本前提之下, 参照了已有的经验性研究, 以及其它地区相近规模地震的不均匀滑动震源模型 (Zhao, 2004), 并且通过改变震源参数进行了参数敏感度分析, 考察了设定偏差的影响范围, 为地震动的计算建立了比较真实的震源模型。

表 1 抚顺凹凸体模型参数表

Table 1 The parameters of the asperity model in Fushun

参 数	设 定 值	单 位	设 定 依 据
断层长度	14	km	活断层探测结果确定
断层宽度	8	km	孕震区
断层上断点	8	km	孕震区上端
断层下断点	16	km	孕震区下端
走向 (strike)	70.7	度	北向顺时针旋转
倾斜 (dip)	60	度	走向顺时针方向
滑动角 (rake)	80	度	根据下盘滑动方向确定
长度方向分割量 (NL)	14		$NL \times NW \times ND < 1000$
宽度方向分割量 (NW)	8		$NL \times NW \times ND < 1000$
断层要素的长度	1	km	断层长度 / NL
断层要素的宽度	1	km	断层宽度 / NW
滑动方向分割数 (ND)	11		$\text{SQRT}(NL \times NW)$
叠加数量	1232		$NL \times NW \times ND$
样本频率	100	Hz	
再分割数量 (n')	4		震源时间 \times 样本频率 / ND
断层面积	112	km^2	断层长度 \times 断层宽度
地震距	1.1	$10^{25} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	
断层要素平均地震距	0.9	$10^{22} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	
最大 Asperity 面积	18	km^2	
次级 Asperity 面积	7	km^2	
破坏开始点位置	Asperity 下缘		活断层探测结果确定
破裂速度	2.7	km/s	
破裂形式	等心圆		根据断层产状选定
震源时间	0.45	s	
Asperity 平均滑动量比	2.01		
背景域平均滑动量比	0.7		
● Asperity 位错量一定的情况			
最大 Asperity 的地震距	0.4	$10^{25} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	
次级 Asperity 的地震距	0.1	$10^{25} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	
背景 Asperity 的地震距	0.6	$10^{25} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	
平均应力降	22.6	bar	
最大 Asperity 的应力降	127.6	bar	
第二 Asperity 的应力降	131.5	bar	
背景域的应力降	18	bar	
● Asperity 应力一定的情况			
最大 Asperity 的地震距	0.4	$10^{25} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	
次级 Asperity 的地震距	0.1	$10^{25} \text{dyne} \cdot \text{cm}$	

续表

参 数	设 定 值	单 位	设 定 依 据
背景 Asperity 的地震距	0.6	10^{25} dyne·cm	
平均应力降	22.6	bar	
最大 Asperity 的应力降	127.6	bar	
第二 Asperity 的应力降	131.5	bar	
背景域的应力降	18	bar	

4 结 论

通过对震源模型的分析, 明确了建立包含高频和短波分量的有限断层震源模型的方法以及应注意的问题, 建立了符合本地区实际情况的震源模型, 保证了活断层地震危害性评价结果的科学性和可靠性, 为同类工作的开展提供了参考。

参 考 文 献

- Irikura K., H. Miyake, T. Iwata, K. Kamae, H. Kawabe and L.A. Dalguer, 2004. Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake. 13th World Conference on Earthquake Engineering, No. 872.
- Pitarka A., K. Irikura, T. Iwata and H. Sekiguchi, 1998. Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, Japan. Bulletin Seismological Society of America, 88, 428—440.
- Somerville P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Swada, D.J. Wald, N. Abeahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada, 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. Seismological Research Letters, 70, 59—80.
- Zhao B.M., M. Tsurugi and T. Kagawa, 2004. Strong motion simulation for large subduction earthquakes. 13th World Conference on Earthquake Engineering, No. 795, 1—12.

Development of the Source Model for Fushun Active Fault Zone

Huang He¹⁾, Liao Xu¹⁾, Wan Bo¹⁾ and Zhao Boming²⁾

1) Institute of Seismology of Liaoning Province, Shenyang 110031, China

2) School of Civil Engineer and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract After reviewing the current source model for limit fault, we developed the source model for Fushun Fault, in which the space distribute, faulted pattern and the amount of asperity are considered carefully. Our results provide helpful reference for the similar work in the future.

Key words: Source model; Limit fault; Asperity model