

沈阳活断层地震危害性预测结果与分析

黄河¹, 廖旭¹, 赵伯明²

(1. 辽宁省地震研究所, 辽宁 沈阳 110031; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要:简述了沈阳活断层地震危害性预测中所使用的模型及计算方法, 给出并分析了不同规模地震下的地震动预测结果。通过把地震动预测结果分别同现行地震安全性评价结果、国家地震动参数区划图进行比较与分析, 给出了活断层地震危害性预测结果的使用条件与建议。

关键词: 沈阳; 活断层地震危害性预测; 地震模型; 地震动预测; 地震动参数区划图

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)03-0292-08

Result and Analysis of Active Fault Earthquake Hazardous Forecast for Shenyang Area

HUANG He¹, LIAO Xu¹, ZHAO Bo-ming²

(1. Institute of Seismology of Liaoning Province, Shenyang 110031, China;

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

Abstract: The current models and the computational method used in the active fault earthquake hazardous forecasting in Shenyang area are introduced briefly, and the forecast results in different earthquake scales are given and analyzed. The results are compared with the present result of seismic safety evaluation and the national seismic motion parameter regionalization map. The corresponding exploitation conditions and some suggests are presented also.

Key words: Shenyang area; Active fault earthquake hazardous forecast; Earthquake model; Seismic motion forecast; Seismic motion parameter regionalization map

0 引言

研究表明, 预测未来可能遭受地震影响的最好方法是通过建立符合地震学和地质学的地震构造计算模型, 利用计算机模拟地震的发生和地震波动, 通过系统分析地震动的模拟结果, 揭示地震动的性质和特征。目前随着计算机性能的飞速发展, 地震研究成果以及地震资料的积累, 数字地震台网的健全, 通过科学的手段精确确定地震断层的活动机理, 借助研究大地震的近场强地震动, 可以预测特定场地的地震动^[1]。从国际发展状况来看, 基于三维地震模型开展活动断层模拟计算, 进行强地震动数值模拟预测已经成为今后的主要方向, 是近年迅速发展的一门学科。

近年来, 随着中国数字地震观测网络项目的实

施, 全国许多城市开展了活断层探测与评价工作, 取得了许多成果。但由于活断层地震危害性的评价方法与我国现行的地震安全性评价及全国地震动参数区划图所采用的技术路线、方法有所不同, 所得到的结果虽然同样是对未来可能遭受地震影响的描述, 但其含义是不同的, 且各有各的适用条件。本文以沈阳为例, 分析活断层地震危害性预测结果与中国地震动参数区划图的关系。

1 地震危害性预测模型及方法

沈阳地区处于辽东上升区和下辽河沉降区的交界部位, 地质构造复杂。区内历史上发生最大地震为1765年沈阳老城区的5½级地震^[2]。市区内以

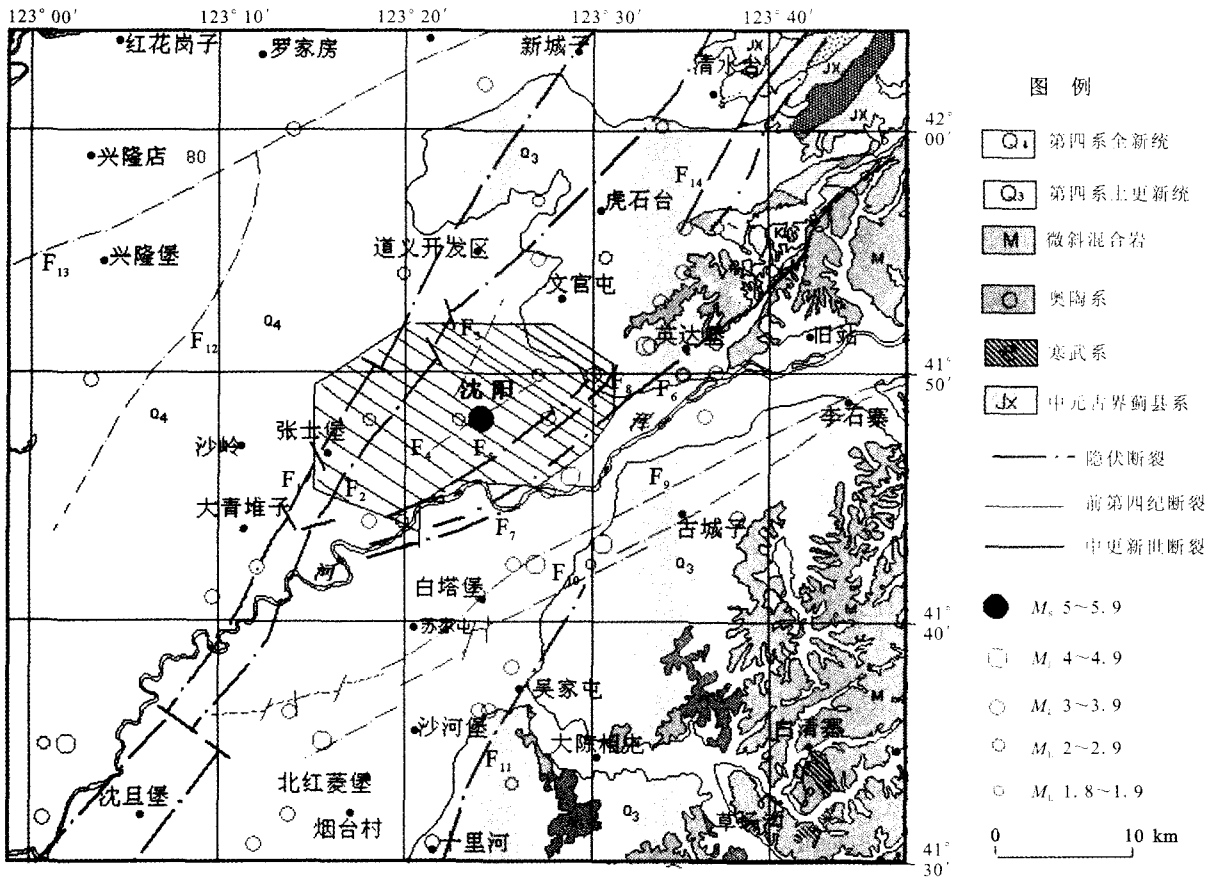
收稿日期: 2009-03-11

基金项目: 中国地震局“十五”重点项目(1-4-6), 中国数字地震观测网络项目, 地震活断层探测分项目

作者简介: 黄河(1965-), 男(汉族), 吉林农安人, 副研究员, 主要从事地震工程研究。

NE 向断裂为主,主要有浑河断裂(F_9 、 F_{14} 、 F_{15})和依兰-伊通断裂(F_1 、 F_2)及其分支断裂($F_3 \sim F_8$) (图1),断裂的活动年代以早、中更新世活动为主^[3]。沈阳地区基岩上的沉积盖层主要由第三系和第四系组成,厚度变化较大,呈斜坡状分布,西南最大厚度分别可达到 240 m 和 100 m 以上,向东北方向逐渐变薄,东北部为基岩区。在沈阳地区主要活断层探测与评价中,根据地震危险性评价结果确定沈阳地区评价的目标断层为依兰-伊通断裂的相

对活跃分支:长白乡-观音阁断层(F_6)。该断裂为一沿丘陵山地前缘分布的断裂,最新的断面显示为压扭性正断层。断层由南西段与北东段两段组成,南西段为隐伏段,长度约为 20 km,北东段为裸露段,6 km,总长 26 km(图2)。断裂在晚更新世坡洪积扇堆积形成以来没有活动,物探结果也表明该断裂为中更新世断裂^[4]。根据沈阳地区主要活断层探测与评价的地震危险性分析结果,预测最大震级为 6.0 级。



F_1 :王纲堡—新城子断裂; F_2 :永乐—清水台断裂; F_3 :淮河院—五彩新村断裂; F_4 :铁西八院—北塔断裂; F_5 :太古屯—大北监狱断裂; F_6 :长白乡—观音阁断裂; F_7 :东谟家—中夹河断裂; F_8 :故宫—祁家屯断裂; F_9 :浑河断裂; F_{10} :浑河断裂; F_{11} :十里河断裂; F_{12} :曹西断裂; F_{13} :人民屯断裂; F_{14} :蒲河断裂

图1 沈阳地区活动构造图

Fig.1 The active structural map of Shenyang area.

城市活动断层地震危害性评价的核心内容是通过建立合理准确的三维震源模型和三维地下构造模型,基于地震学和数理方程进行地震波空间分布的数值模拟,根据强地震动预测结果对城市开展潜在震害可能性的综合评估和预测。沈阳地区三维震源模型和三维地下构造模型在文献[5]、[6]中已有详细介绍,本文仅简要叙述这两个模型的参数及地表地震动的计算方法。

1.1 震源模型

实际地震断层的几何形状很复杂,通常近似地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。建立基于有限断层假定的震源模型包括三项主要内容: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^[5]。全局震源参数是指主要影响和控制震源和近断层强地面运动的低频

和长波分量,对高频分量仅产生次要和非控制性影响的参数,包括有限断层空间展布和错动方式,如断层的走向、倾向、滑动角、矩形断层的边长、断层的上界埋深等,还包括矩震级、断层上下盘之间的平均位错或平均应力降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震源和近断层强地面运动的高频和短波分量,对低频和长波分量仅产生次要

和非控制性影响的参数。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指断层面滑动的时空过程或断层面应力降的时空过程。

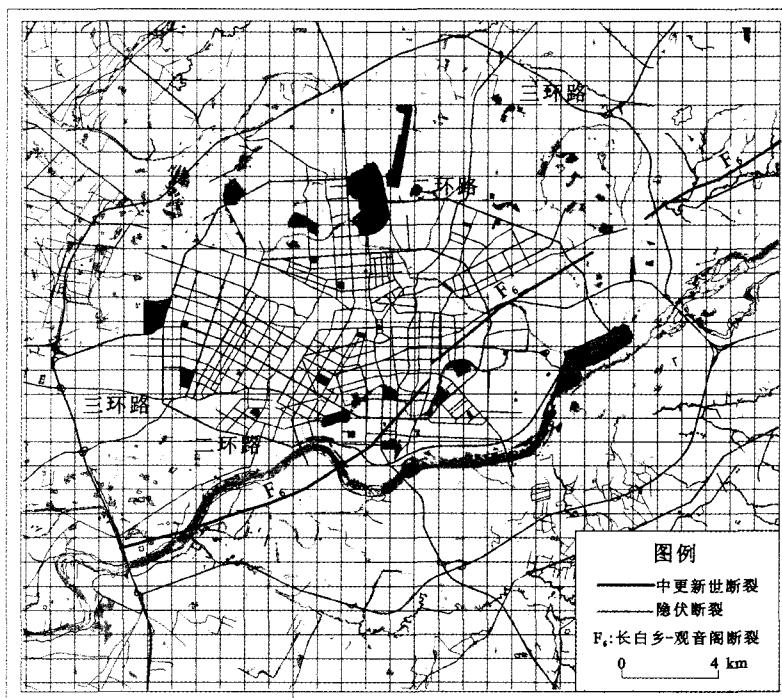


图2 沈阳城区长白乡-观音阁断层的分布

Fig. 2 Distribution of Changbeixiang - Guanying fault in Shenyang city.

对断层的最新研究成果表明,断层面全体不是以均一形式的平均破裂,而是几个领域产生较大的破裂,释放出较多的地震能量产生地震距,这个领域称之为「凹凸体」^[7-8]。凹凸体特征震源理论是目前学术界公认的近场强地震动研究中主流震源计算模型,在模型中凹凸体区域与背景区域的形式合理地表现了断层面上应力或滑动的不规则空间分布。

根据沈阳地区主要活断层探测及地震危险性分析结果,长白乡-观音阁断层为走向 NE、倾向 SE 的正断层,倾角为 75° 。根据最大地震震级确定的断层面积约 112 km^2 ,断层的长度为 16 km ,断层的宽度为 7 km ,上断点为 10 km ,滑动角 225° 。断层可划分两个凹凸体(图3),最大凹凸体重心位于断层带上的地震发生空白区域,南西段与北东段的连接段,凹凸体部分的埋深约为 $12 \sim 15 \text{ km}$ 。最大凹凸体(Asp1)面积 18 km^2 ,次级(Asp2)为 7 km^2 。破裂速度为 2.7 km/s ,震源时间为 0.45 s 。图3中深色

部分为凹凸体区域,点线部分为背景区域,星号表示破裂开始点位置。空间破裂传播形式根据断层的类型和规模确定为依破裂开始点位置的等心圆破裂。以上述参数为基础,可以确定其他参数,从而可得到建立计算震源模型所需的震源参数(表1)。

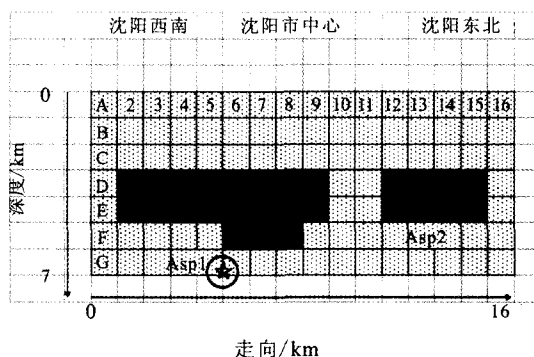


图3 长白乡-观音阁断层凹凸体模型(6.0级)

Fig. 3 Asperity model for Changbeixiang - Guanying fault.

表1 长白乡-观音阁凹凸体模型参数

参数	$M_s6.0$ 设定值	$M_s5.5$ 设定值	设定依据
断层长度/km	16	7	活断层探测的结果
断层宽度/km	7	5	震源区
断层上断点/km	10	6	震源区上端
断层下断点/km	17	12	震源区下端
走向/ $^{\circ}$	59.9	59.9	北向顺时针旋转
倾角/ $^{\circ}$	75	75	走向顺时针方向
滑动角/ $^{\circ}$	225	225	根据下盘滑动方向确定
长度方向分割量(NL)	16	7	$NL \times NW \times ND < 1000$
宽度方向分割量(NW)	7	5	$NL \times NW \times ND < 1000$
断层要素长度/km	1	1	断层长度/NL
断层要素宽度/km	1	1	断层宽度/NW
滑动方向分割数(ND)	11	6	$SQRT(NL \times NW)$
叠加数量	1232	210	$NL \times NW \times ND$
样本频率/Hz	100	100	
再分割数量(n)	4	4	震源时间 $\times$ 样本频率/ND
断层面积/ km^2	112	35	断层长度 $\times$ 断层宽度
地震距/dyne $\cdot$ cm	1.1×1025	0.2×1025	
断层要素平均地震距/dyne $\cdot$ cm	0.9×1022	1×1022	
最大凹凸体面积/ km^2	18	6	
次级凹凸体面积/ km^2	7	2	
破坏开始点位置	凹凸体下缘	凹凸体下缘	活断层探测结果
破裂速度/ $[km \cdot s^{-1}]$	2.7	2.7	
破裂形式	等心圆	等心圆	根据断层产状选定
震源时间/s	0.45	0.26	
凹凸体平均滑动量比	2.01	2.01	
背景域平均滑动量比	0.7	0.65	

1.2 地下结构模型

沈阳地区基岩上的沉积盖层主要由第三系和第四系组成,且厚度变化较大,第四系最大厚度达 100 m,第三系最大厚度达 240 m 以上。由于沉积盖层的厚度和形状对于近场地震波的空间传播产生很大影响,所以活断层地震危害性评价中应考虑三维地下结构效应。建立接近真实的三维速度模型不仅需要详尽的深、浅部勘探资料和钻孔等资料来揭示盆地的内部结构,还需要建立复杂不规则速度模型的技巧和手段。对于地下速度结构模型要求由包括震源区在内的地壳模型和基岩顶面至工程地层的以第三系和第四系为主的盆地地下速度结构模型组成。另外作为建立三维地下速度结构模型的辅助方法,采用基于高密度地脉动的结果补充没有物探等数据的地区,实现更加全面、连续的三维结构模型。

根据沈阳地区目标断层的探查结果,利用沈阳地区的地震浅层勘探结果、地质与地形资料、深孔资料、各地层波速试验资料以及其他调查资料,确定了沈阳地区典型地层的空间分布和物性参数,建立了符合地质学和地形学理论三维不均匀地层结构模型^[6]。模型包括第四系,上第三系,下第三系以及

地壳速度结构模型。其中第四系内地层细分为 T_1 , T_2 和 T_3 地层,第四系基底为 T_q 层;第三系内地层细分为 T_{n1} 与 T_{n2} 地层,第三系基底为 T_n 层。工作中采用将相邻介质逐层叠加的形式组建三维地下速度结构模型,模型的各层参数见表 2。详细的地下速度模型等深线图可参见文献[6]。

表2 沈阳地区地下速度构造模型物理参数

层	纵波波速 v_p / $[km \cdot s^{-1}]$	剪切波速 v_s / $[km \cdot s^{-1}]$	密度/ $[kg \cdot m^{-3}]$	品质因子 Q
T_1	1.00	0.30	1.75	60
T_2	1.90	0.75	1.85	80
T_3	2.40	0.90	1.90	100
T_g	3.00	1.37	2.20	120
T_{n1}	3.80	1.85	2.40	150
T_{n2}	4.50	2.10	2.50	200
T_n	4.80	2.50	2.70	350
T_b	5.40	3.00	2.80	500

1.3 计算方法

在预测地震动方法中,三维差分法适合长周期计算而不能进行短周期计算;经验格林函数法或统计学的格林函数法虽然原理上可以合成宽频地震动,但不利于表现三维效应和放射方位特性显著的长周期地震动。为此对上述方法进行了改进,采用改良随机格林函数法^[9]计算小于 1 秒的短周期强地

震动,然后进行大地震合成^[10]。该方法考虑了包括断层破裂的方向效应和冲积地层特殊效应的影响因素,其有效性已经通过与多个地震的观测记录比较的研究得到验证,被证明是目前计算短周期强地震动最为有效的方法^[11]。另外在保证计算模型参数的合理化和效率化的前提下,基于不规则网格的三维有限差分法进行有效周期为1秒以上的长周期地震动场的理论计算。根据地层波速采用不同网格的高效率计算程序,在保证计算精度的同时,提高了运算效率^[12]。

为最大限度地发挥两种方法的长处,把两者进行适当改进之后再复合形成的方法称之为混合计算

方法^[13]。是有效地进行宽频带地震动预测的唯一手段。采用混合计算方法的目的是尽最大可能地发挥每一种计算方法的长处,同时尽最小限度地回避各自的短处,可以达到集约型利用各种方法的优点的效果。

2 最大地震动分布与分析

通过上面介绍的模型和方法,针对沈阳市的具体情况,建立了相应的计算模型和方法,对沈阳目标断层的危害性进行了预测。

预测结果表明:沈阳地区最大加速度值达到285 gal,最大加速度PGA分布(图4(a))的高值影

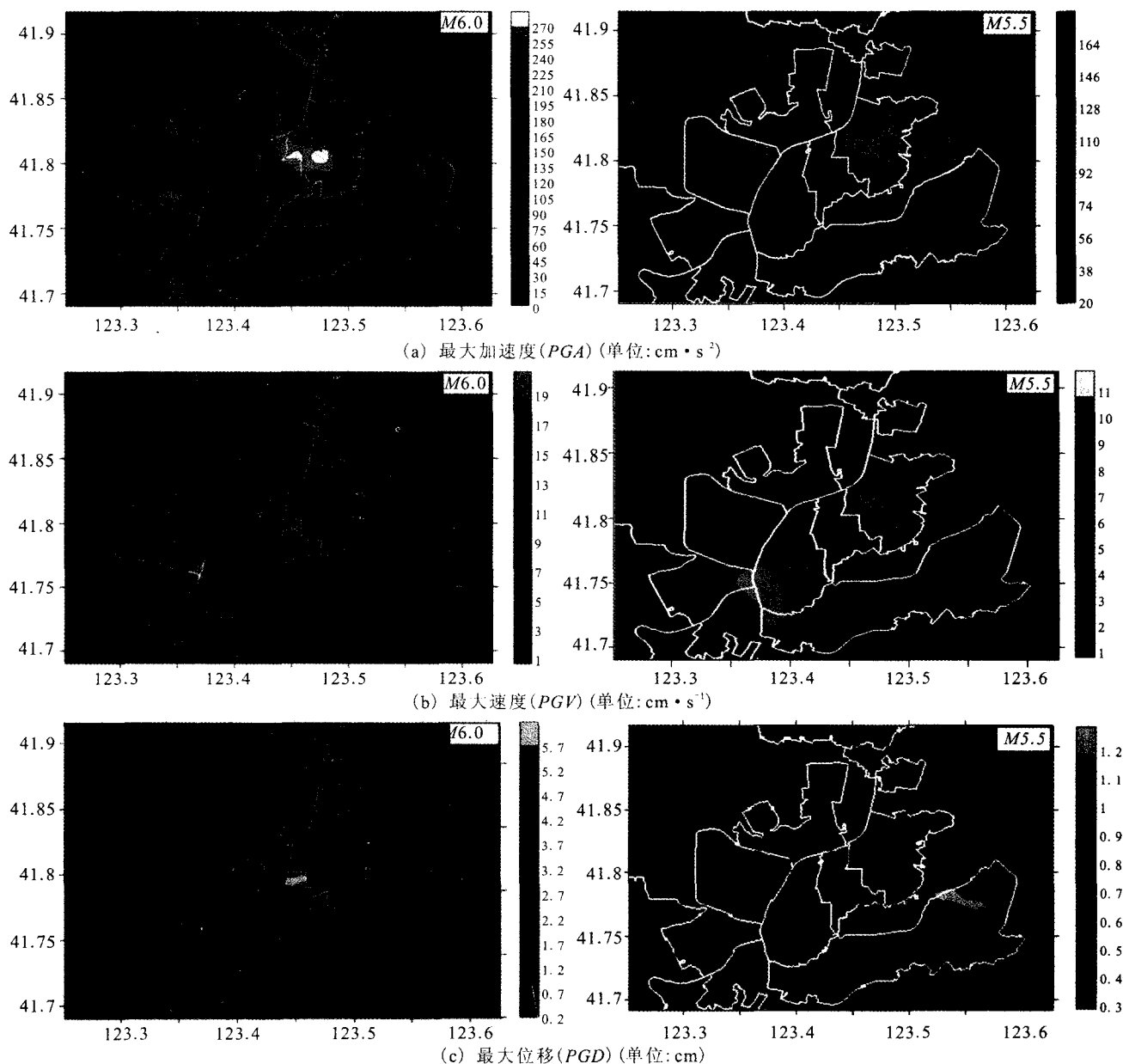


图4 沈阳地区最大加速度、最大速度和最大位移分布图

Fig.4 The distribution of PGA, PGV and PGD in Shenyang.

响区(指对建筑物产生破坏的可能性较大的 200 gal 以上的分布区域)相对比较集中,主要分布于断层的两侧和城市东侧靠近丘陵和山地的地区。

影响加速度分布的主要原因一是地震本身的震源机制,例如断层的大小、破坏形式等;二是区域地质构造的影响。沈阳目标断层的长度达 16 km,断层投影面积较大(与倾角相关),故影响范围较大。沈阳地区除东部地区以外其他地区均有比较松散的覆盖层,对地震动产生较为显著的放大效应。

在垂直于断层的方向和城市东侧地区加速度也较大,其原因有两种可能:其一是沈阳设定断层为高角度正倾滑断层(倾角约 75° ,滑动角为 45°)。虽然是正倾滑断层,但是其产生的近断层强地震动也不程度地存在上盘效应、滑冲效应、速度大脉冲效应和竖向效应,其中前三种效应没有逆倾滑断层结果显著,但竖向效应却更为显著,而且近断层强地面运动的竖向效应有随倾角增大而加大的变化趋势;其二是断层的破裂方式具有沿断层走向发展的趋势,在断层破裂的前方生成较大振幅的脉冲波形,在地表形成高值区,这种效应已经在台湾集集地震的记录解析中得到验证^[14]。同时,东侧的山地和丘陵地带与盆地交接的边缘对于地震波形成反射、折射以及叠加等效应,在盆地边缘附近形成高值区,其分布形状基本呈现垂直于地震波传播方向、平行于盆地边缘方向的带状分布。另外,边界效应的部分原因是山地反射波或盆地表面波的波面与后继传播的地震波波面的叠加,这种典型的盆地边缘效应形成高值区域。

最大速度 *PGV* 分布图(图 4(b))显示速度高值影响区分布范围相对比较集中,主要发生在断层附近。西南地区的第四系厚度达 100 m 左右,为沈阳地区第四系沉降中心,具有较大的速度分布。沈阳地区的速度极限最大值约为 19 cm/s。高值区分布的机理基本相同于上述对最大加速度分布的分析。从最大速度的分布情况看,最大速度高值影响区出现的区域与松散覆盖层的厚度对应程度较高,也就是说速度分布对于地下结构的敏感度高。从总体分布状况来看,最大值的分布比较均匀,符合速度量中长波卓越的频谱成分构成规律。

最大位移 *PGD* 分布图(图 4(c))显示地震动的位移峰值场的分布具有明显的集中和条带特征,与地表破裂带或强变形带的位置、长度和宽度之间存在很强的相关性。影响区主要沿断层走向分布。断层南侧中央区域的高值区明显反应了断层的正倾滑

性质(南侧为上盘)。

虽然是正断层,但是由于具有较厚的覆盖表层和复杂的盆地结构等不利因素,对地震动有较大影响。沈阳的波形成分中表面波的含量丰富,同时持续时间长,中长周期成分卓越。持续时间和频谱成分的不同会对建筑物产生完全不同的破坏效果,从这种意义上讲,沈阳地区发生地震时具有较大的危险性。

3 不同规模地震的结果比较

为了考察不同规模的地震对沈阳市造成的影响,进行了不同级别地震(*M*5.5、*M*6.0)的量化比较。二者断层机制的设定原则基本相同,不同点在于断层的面积和地震距有所不同:5.5 级地震时设定断层长度为 7 km,宽度为 5 km,上断点 6 km,下断点 12 km,最大凹凸体面积 6 km²,次级为 2 km²,震源时间为 0.26 s(表 1)。计算结果分别表示在图 4 右侧。

*M*5.5 地震比 *M*6.0 地震的断层震源更接近点源的破裂形式,最大加速度值为 160 gal。最大值分布范围很小,影响圈主要集中在震源附近。东侧盆地边缘附近的松散覆盖层区域形成的高值分布区,主要是由于震源的破裂方向效应和盆地效应的影响的结果。影响圈主要集中在震源附近。最大速度和最大位移的分布有沿断层分布的特征但不显著。

由于两个地震的地震距不同,其震源断层的面积分别为 112 km² 和 35 km²;其断层长度分别为 16 km 和 7 km(表 1),两个震级的地震产生的最大地震动分别为 285 gal 和 160 gal 左右。对于近场地震动来讲,除震源效应以外,具有三维不均匀介质的松散地层产生的场地效应对地震动的空间分布亦产生非常复杂的影响,断层的尺寸和展布位置也直接影响地震动在地下结构中的空间分布,震级小的地震由于具有相对集中的应力场和场地条件的影响也可能在特定区域激发较大的地震动,这种现象已经在以往的地震观测记录中也有报告。

4 地震危害性评价的主要认识及讨论

4.1 主要认识

基于对沈阳地区目标断层(长白乡-观音阁断层)*M*6.0 地震的强地震动计算结果的分析,得到主要结论如下:

(1) 断层长白乡-观音阁断层发生 *M*6.0 地震时,具有潜在破坏性的地震动影响范围主要分布于

目标断层附近的区域,其中超过 225 gal 的区域约占沈阳地区面积的 4% 左右。地震动高值区分布于断层两侧的较大范围内以及东部接近盆地边缘的地区。区内极限最大加速度值达到 287 gal,最大加速度影响圈(平均加速度 225 ~ 250 gal)涉及和平区和大东区的局部地区。二级加速度影响圈(平均加速度 200 ~ 225 gal)涉及和平区和沈河区的局部地区。东部的山地部分地震动为沈阳地区内最小,平均加速度值为 50 gal。

(2) 最大速度的影响范围主要集中在分布于断层的两侧,分布范围较小,在断层西部较为集中,该地区为沈阳地区第四系最大沉降中心,地下构造较为复杂,沈阳地区极限最大速度值达 20 cm/s 左右。最大位移的影响范围局限于目标断层的周围,最大位移值达 6 cm。

(3) 沈阳地区内覆盖层分散比较广泛,西南部较厚沿 NE 方向呈递减趋势,形成两个 NW - SE 向的台阶状结构。东部盆地边缘地区的地下结构变化较大,上述地下结构将对于较长周期的地震动产生放大作用等不利影响。

(4) 沈阳地区发生 $M6.0$ 别的破坏性地震时,在一定的周期频带范围内,个别地区的地震动水平超过本地现行设防标准中对于一般建设工程的设防水准(中震,烈度 VII 度,加速度值 100 gal (90 ~ 140 gal)),与年超越概率 0.02% 的大震的设防水准相近。

(5) 沈阳地区发生 $M5.5$ 地震时,地震动的影响范围较小,断层效应较弱。与沈阳的抗震设防水准相当。

4.2 危害性评价结果与区划图的关系

根据国标 GB18306 - 2001《中国地震动参数区划图》,在 II 类场地条件下,在 50 年超越概率 10% 水平时,沈阳地区峰值加速度为 100 gal,其加速度值范围为 [90 gal, 140 gal]。特征周期分区为 0.35 s。区划图的适用范围为一般工业与民用建设工程。

按三级设防的要求,实际抗震设计时需考虑小震(50 年一遇)和大震(2500 年一遇)的影响。地震区划图中大震的数值是中震(《区划图》规定的加速度值)乘以一定的系数 1.6 ~ 1.7 得到的。该系数具有一定的平均意义。如按照现行的适用对象为一般工业与民用建设工程的抗震设计规范,沈阳地区考虑 2500 年一遇的大震时,至少必须要按照在 II 类场地条件下,平均加速度 $100 \text{ gal} \times 1.7 = 170 \text{ gal}$ (加速度值范围 $140 \text{ gal} \times 1.7 = 238 \text{ gal}$) 的平均地震动水

平设防。

本工作考虑的是沈阳地区潜在最大震级为 6.0 级的地震,在这种意义上,设定地震动水平应该大于《中国地震动参数区划图》中规定的大震(2500 年一遇)的地震动水平。本工作预测了在沈阳地区产生的直下型地震时的地震动空间分布,根据模拟的结果进行的地震动响应中,具有最大加速度值的区划单元($0.025^\circ \times 0.025^\circ$, 约 6 km^2) 内的最大平均加速度值约为 250 gal,最高数值超过 280 gal。

本工作采用的强震动预测方法体系考虑了震源特性 - 传播途径特性 - 场地放大特性,包含了强地震动模拟(预测)应该考虑的各种相关联特性,与此同时,在严格遵循震源机理的基础上,对于震源断层的附近存在的地震动的影响,依据现在可能达到的科学水平尽可能地进行了考虑。

本方法的预测原则是首先查明断层的具体情况,确定其可能发生的最大地震,通过确定性的方法进行详细的地震动预测。此方法体系不同于现行的《中国地震动参数区划图》和地震安全性评价等抗震法规中使用的设计地震动的设定方法。现行的抗震法规的基本原则是根据本地区未来一段时间内(如 50 年或 100 年)对地震发展趋势的预测,给出城市或场地的平均地震动,是将概率统计方法与对象地点的地震危险度的分析相关联,以地震的再现期、抗震设计等级要求的非超越概率之间的关系为基础决定设计地震动(期望值以及其变动性)的方法。同时,现行抗震设防标准反映了当时的建筑技术和经济发展水平的程度。并且现行抗震设防标准没有考虑以下因素:(1)城市直下型地震的特性:直下型地震的断层位于城市的正下方或非常接近的地区;(2)近场地震动的特性:近场地震动与断层的空间展布、断层的破裂形态、断层的特殊地震效应有密切关系;(3)三维场地效应的影响:三维场地效应包括水平方向的不均匀介质的影响、盆地的各种特殊效应等。

研究指出,现在采用的设计地震荷载或地震动并不是最安全的,而是一种平均值。例如,在采用地震烈度作为设计指标的规范中,所规定的地震系数 $k = a/g$ 或地震动加速度 a 并非属于该烈度的最大值,而只是一种平均值或等效值。当地震属于同一烈度时实际加速度有一半的可能性会超过规范中所规定的数值。地震发生时建筑物可能遭受到比抗震设计所考虑的更大的地震动。

根据国外发达国家的抗震法规的发展趋势和目

前国际上倡导的“建筑物性能化设计”的理念^[15],今后,依据强地震动预测确定城市的抗震评价和特定场地的土木工程抗震输入地震动的方法将逐步被吸收到抗震法规之中。

如用基于本工作提出的预测地震动体系及结果进行抗震设计,其设计目标可保证在遭遇到潜在最大地震袭击时,即使部分建筑物发生损伤,也不会导致大面积的城市设施和房屋破坏,从而达到防震减灾的目的。

4.3 评价结果的应用条件与建议

目前虽然大地震发生的时间还不能预测,但是根据目前的研究水平,大地震一旦发生所造成的影响是可以在一定的精度范围内事先预测的。通过对沈阳未来可能发生的地震提供了比较完整的描述,这种预测结果的意义不只在于今后对土木建筑上抗震法规的修订,而且对于现代城市作为一个系统的抗震防灾体系的建设必将起到促进作用。

本工作结论的应用条件为:

(1) 本结果给出的强地震动的计算结果是基于沈阳地区潜在最大震级为6.0级的地震断层发生破裂时,沈阳地区产生的地震动空间分布;

(2) 计算结果反映了目前的最新成果,相对于现行规范的具有平均意义的单值参数和统计时程,提供了具有一定精度的地震动的空间分布形态和时程结果;

(3) 本工作的设定地震事件作为低超越概率地震,相当或超出区划图中规定的大震或重要工程中使用的最不利地震的概率水平,建议应用于城市规划 and 重要工程的抗震设防中;

(4) 近场地震动的大小受到断层和场地效应的影响,具有非常复杂的性质,根据频带的不同其值亦不同,因此地震动的最大值只是地震动参数之一,不宜独立于其它参数单独使用。

最大位移分布的计算结果显示地表位移(包括强变形带)基本上是沿断层最为显著,这反映了活断层的一个重要的特征,即伴随断层的破裂,地表变形和破裂带的出现将给建筑物带来变形灾害,这一点对于新建建筑物的抗震设防具有重要的意义。

[参考文献]

- [1] Pitarka A, K Irikura, T Iwata, et al. . Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo - ken Nanbu (Kobe) earthquake, Japan[J]. B. S. S. A. , 1998, 88: 428-440.
- [2] 赵振. 1765 年沈阳 M5 ½ 地震的再研究[J]. 东北地震研究, 2001, 17(3): 42-45.
- [3] 雷清清, 廖旭, 董晓燕, 等. 辽宁省主要活动断层与地震活动特征分析[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(2): 111-125.
- [4] 雷清清, 王超, 赵晓辉, 等. 沈阳长白乡 - 观音阁断裂、抚顺浑河断裂的定位和活动性研究[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(2): 128-136.
- [5] 廖旭, 赵伯明, 黄河. 沈阳活断层探测震源计算模型的建立与优化[A] // 辽宁工程结构技术交流会论文集[C]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008.
- [6] 廖旭, 赵伯明, 等. 沈阳地区地下速度结构模型建立及优化[J]. 世界地震工程, 2008, 24(4): 64-69.
- [7] Somerville P G, K Irikura, R Graves, et al. . Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. Seismological Research Letters, 1999, 70: 59-80.
- [8] Irikura K, H Miyake, T Iwata, et al. . Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake [A] // Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering [C]. Canada: Vancouver B. C. , 2004: 872.
- [9] Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra[J]. Bulletin Seismological Society of America, 1983, 73: 1865-1894.
- [10] Kamae K, K Irikura. Prediction of site specific strong ground motion using semi-empirical methods [A] // 10th World Conference on Earthquake Engineering [C]. Madrid: Taylor and Francis, 1992: 801-806.
- [11] Irikura K. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function [A] // Proc. of 7th Japan Earthquake Engineering Symposium [C]. Madrid: Taylor and Francis, 1986: 151-156.
- [12] 解廷伟, 赵伯明. B - Spline 函数在区域三维地下速度模型中的应用[J]. 山西建筑, 2008, 34(8): 118-119.
- [13] Zhao B M, Kagawa T. 3D hybrid structure modeling method with locally detailed model and spline function model [A] // Proceeding of the Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting [C]. Tokyo: Steering Committee of the Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, 2004: S981.
- [14] 王国权. 921 台湾集集地震近断层地面运动特征 [D]. 北京, 中国地震局地质研究所, 2001: 1-216.
- [15] 韩小雷, 郑宜, 季静, 等. 美国基于性能的高层建筑结构抗震设计规范[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 64-70.
- [16] 李浩, 张燕梅. 利用正交多项式对三维地震资料拟合算法的研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 148-151.
- [17] 任慧, 尚宋平, 李刚, 等. 非均质场地地震反应的模态叠加法解[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 26-30.
- [18] 王德利, 雍运动, 韩立国, 等. 三维粘弹介质地震波场有限差分并行模拟[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 30-34.