

震源破裂方式和断层性质对近场强地震动特征的影响

张冬丽¹, 周正华², 陶夏新³

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150083;
3 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150083)

摘要:基于数值格林函数法的近场强地震动数值模拟方法,以1994年Northridge地震断层面上位错量的不均匀分布模式和该地区的地层剪切波速度结构为震源模型和计算模型,做了两个方面的模拟研究:(1)直立走滑断层(断层倾角为 90°)情况下,模拟分析了有限断层单侧破裂模式和双侧破裂模式对强地震动特征——破裂方向性和上盘效应的影响;(2)对于倾斜断层(倾角为 45°),模拟分析了正断层、逆断层和走滑断层情况下,单侧破裂模式对其强地震动主要特征——破裂方向性效应和上盘效应的影响。结果表明:断层的破裂方式直接影响着地表地震动峰值和矢量分布;在近场区无论直立断层还是倾斜断层,其地表地震动峰值分布所表达的破裂方向性效应显著,位于破裂传播前方的地震动强度大,反映了波前被压缩的趋势,破裂后方地震强度明显变小;倾斜断层引起的上盘效应明显,NS向分量和竖向分量的地表地震动峰值的最大值出现在上盘靠近断层迹线处,EW向分量的峰值在断层迹线两侧呈不对称分布,且逆断层引起的地震动峰值最大,走滑断层的次之,正断层的最小。

关键词:近场地震动;数值模拟;破裂方向性效应;上盘效应

中图分类号:P315.3⁺3; P315.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0844(2009)04-0311-08

Influence of Seismic Source Mechanism and Fault Property on Near-field Strong Ground Motion

ZHANG Dong-Li¹, ZHOU Zheng-Hua², TAO Xia-Xin³

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2 Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150083, China; 3 Harbin Institute of Technology, Harbin 150083, China)

Abstract: Based on the simulation of strong ground motion at near-field by numerical Green function method, take the seismic source with heterogeneous dislocation distribution and crustal velocity structures in 1994 Northridge earthquake as computing model, two studies are proceeded: (1) For vertical strike fault (the dip is 90°), we simulate the strong ground motion by means of unilateral rupture and bilateral rupture, and analyze the influence on two major strong ground motion characters—the rupture directivity effect and hanging wall effect. (2) For oblique fault, (the dip is 45°), we compute the strong ground motion of normal fault, thrust fault and strike fault with unilateral rupture mode, and analyze the influence on rupture directivity effect and hanging wall effect. The results reveal that in near field, the rupture directivity effect and hanging wall effect are obviously influenced by different fault properties and seismic source modes. The seismic source modes effect the ground motion peak values and vectors distribution directly. In near field, whatever vertical fault or inclined fault, the ground motion intensity ahead of rup-

收稿日期:2009-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(40604005);中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DF-IGCEA-0607-1-18);地震科学联合基金项目(A07027)

作者简介:张冬丽(1974—),女(汉族),河南叶县人,副研究员,主要从事强地震动数值模拟研究。

ture directivity is stronger than that of behind rupture directivity, which indicates that the wave-front are compressed during propagation. The hanging wall effect can be described by simulation results of inclined fault very well. The maximum values of NS component and UP component appear on hanging wall near the fault and the EW component maximum values are dissymmetry on both sides along fault. The peak values caused by thrust fault are greater than by strike fault and normal fault, the values cause by normal fault are the smallest of all.

Key words: Near-field ground motions; Numerical simulation; Rupture directivity effect; Hanging wall effect

0 引言

近场强地震动研究是近年来地震学和地震工程学的核心和热点,尤其是20世纪90年代以来,随着一系列强烈地震的发生和强震观测台网的建设,近场或近断层强震记录的快速积累为近场强地震动的特征研究和机理分析提供了宝贵的基础数据资料,也加深了人们对近场强地震动的一些工程特性的认识,如近断层的破裂方向性效应、上盘效应、地壳波导效应、大型沉积盆地的边缘效应等^[1],其中破裂方向性效应和上盘效应对近地表地震动幅值的分布有重要影响^[2-3]。在近来发生的地震中,如1994年美国Northridge M_w 6.7地震、1995年日本Kobe M_s 7.2地震和2000年我国云南施甸 M_s 5.9地震等,还观测到大的近场长周期加速度脉冲,以及地震动竖向分量比水平分量大很多的现象^[4]。对上述地震动重要特征的新认识,呼唤着传统地震动估计方法的更新和完善,将地震观测、数值模拟、理论分析与野外调查相结合,从而揭示地震发生的机理、地震波的传播特征,为地震危害性模拟预测提供理论基础和技术支持,以满足我国抗震防灾工作的需要。

近年来,结合有限元方法、有限差分方法及计算机并行技术,数值模拟方法作为近场强地震动研究的重要手段在美国、日本等都有较大的发展,在地震动模拟和震害预测方面起到了重要作用^[5-7]。在我国地震工程研究领域,预测强地震动的随机方法^[2,8]和波动模拟的数值方法^[9-12]与并行计算技术^[13]已全面展开,在地震动估计和近场特征研究等方面取得了一定的成就,使中国的近场强地震动研究工作有了实质性的进展和突破。

笔者在此研究背景上,参考1994年美国Northridge M_w 6.7地震的震源参数和地壳波速结构,采用经过合理简化的三维强地震动数值模拟方法,模拟分析不同断层性质和震源破裂模式对近场强地震动主要特征——破裂方向性效应和上盘效应的影响作用。

1 简化的地震动数值模拟方法

对于复杂的三维问题,要综合考虑震源、传播途径和局部场地条件的影响,包含震源在内的计算模型相当大。受计算机能力的限制,数值模拟的精度被限制在长周期范围内。为了克服这一瓶颈,国内外研究人员经过持续努力,发展了多种解决方案,主要思路可归纳为两种:一是充分利用计算机资源,实现并行算法^[13-14]。二是分解和简化计算过程,加快计算效率,在单台机上实现近场强地震动的合成。温联星等^[15]发展了广义射线理论和有限差分组成的混合方法,在介质均匀区用广义射线理论,在不均匀区用有限差分理论,把均匀区广义射线理论的结果作为不均匀区有限差分的输入波场,用来求解波部为横向不均匀介质时二维模型的点源位错的响应。为了便于不具备并行计算条件的科技人员使用,我们将广义射线理论与时、空解耦的波动显式有限元数值模拟方法相结合,综合考虑震源细节、三维地壳速度结构和局部场地条件的影响,发展了基于数值格林函数法的三维强地震动数值模拟的简化计算方法,在单机上实现大型计算区域强地震动的数值模拟。整个计算可分解为两步实现:

第一步,设定位错量呈不均匀分布的有限断层源为外源,将断层底界到计算区基岩面的介质设定为无限均匀介质,考虑发震断层的几何形状、产状及断层面上滑动的时空不均匀分布特征,利用矩张量源的解析解公式^[11]计算并叠加出所有子源在覆盖层底面产生的位移反应,作为下一步波动有限元数值模拟的不均匀输入场。

第二步,上覆盖层的波动有限元数值模拟。采用与局部人工透射边界技术(多次透射边界)结合的三维波动显式有限元时、空解耦数值模拟方法^[16],将第一步计算中得到的盖层底面位移反应作为输入,计算地表地震动。基于震源运动学位错模型和离散介质的三维波动有限元时、空解耦的数值计算方法是一种实用的、类似有限差分的有限元方法,它

既保持了有限差分方法的优点(如计算简便、无需形成刚度阵、便于编程),又具有有限元方法的优点(消除了有限差分方法在处理非线性介质和非规则边界时所遇到的困难),分析方法在时空上是显式和解耦的,较一般有限元方法节省内存、计算效率高。

在均匀弹性介质中,由单一位错点源引起的格林函数的数值解与解析解的等价性已得到了详细论证^[11],据此可以推断,对于设定地震,在保证震源参数和滑动时间函数一致、位错量分布模式和子源划分方案相同的情况下,采用基于数值格林函数方法的波动有限元方法可以保证不均匀介质内数值模拟的可靠性及精度要求。

2 震源模型

为研究强地震动特征与断层性质和震源破裂模式的关系,我们采用 1994 年 Northridge 地震断层面上位错量的不均匀分布模式和地层剪切波速度结构^[17]。遵循断层面上所有子源的地震矩之和与总地震矩相等的原则及子源长度与震级的关系,将断层面沿长、宽方向离散为 6×5 共 30 个子源,子源尺度为 3 km(图 1),并依据断层错动等值线确定每个子源内的平均位错量分布^[2],采用 Brune 模型^[18]确定滑动时间函数的时、空不均匀分布模式^[19]。

Northridge 地震中断层走向为 122°,为方便计算结果的对比研究,本模型的断层走向取为 NS 向。选取的计算区域以断层上界线在地表的投影为对称轴,沿平行走向(NS)、垂直走向(EW)和深度方向的尺寸为 30 km×60 km×20 km,数值模拟的基本参数见表 1。分图 1 为有限断层面上各子源的平均位错量分布及单侧和双侧破裂模式。分别模拟了以下五种情况的近场长周期地震动。

(1) 垂直走滑断层单侧破裂模式:破裂自断层右下方向周围传播,破裂起始点位于有限断层面上第(5,5)个子源;

(2) 垂直走滑断层双侧破裂模式:破裂自断层底部近中心部位向两侧及周围传播,由于在平行走向方向上划分的子源个数为偶数,故破裂起始点并不精确位于断层底部中心,只能设置于第(5,3)个子源上;

(3) 倾角为 40°(西倾)的正断层单侧破裂机制:破裂起始点位于第(5,5)个子源;

(4) 倾角为 40°(西倾)的逆断层单侧破裂机制:破裂起始点位于第(5,5)个子源;

(5) 倾角为 40°(西倾)的走滑断层单侧破裂机制:破裂起始点位于第(5,5)个子源。

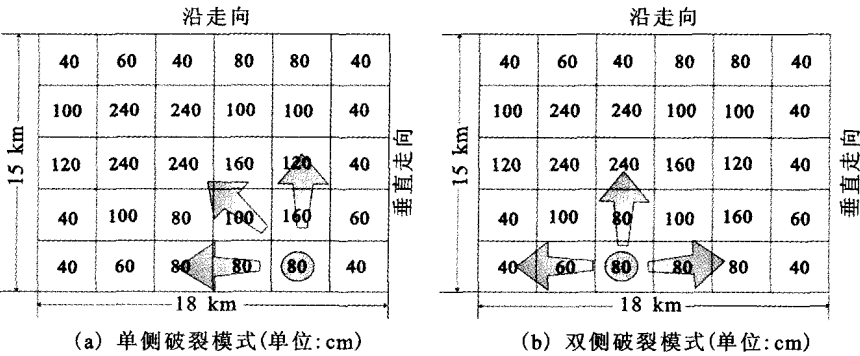


图 1 有限断层源单侧破裂和双侧破裂模型示意图

Fig. 1 Sketch of unilateral rupture model (a) and bilateral rupture model (b) on finite fault source.

表 1 强地震动数值模拟参数

震源参数		有限元模型及计算参数	
震源深度	18.4 km	速度结构(V_s)	1 000 m/s
断层顶面埋深	5 km	(自上而下)	2 000 m/s
断层尺寸(长×宽)	18 km×15 km		3 200 m/s
地震矩	$1.3 \pm 0.2 \times 10^{26}$ dyne-cm		3 700 m/s
应力降	74 bar	积分时步长	0.02 s
V_s (剪切波速)	3 700 m/s	计算持时	60 s
V_r (破裂速度)	$V_s \times 0.80$	最小网格尺寸	200 m
介质密度	2.8 g/m ³	计算时间	52 h

3 数值模拟结果及分析

断层的展布形态、产状、断层破裂方向和滑动机制是影响近场地震动幅值分布的主要因素。在断层破裂面为矩形、几何尺寸和形状都相同的情况下,不同倾角和破裂机制的有限断层引起的近场基岩地表长周期地震动幅值的分布如图2(a)、(b)和图3(a)、(b)、(c)所示。图中的红色垂直虚线为隐伏断层上界在地表的投影(断层迹线),箭头指示方向代表破裂的传播方向;黑色实线为等值线,表示地震动幅值的绝对值;背景的彩色区域代表地震动的正负向分布。这样处理有两个原因:一是由于位移、速度和加速度是矢量,且在地表成片分布,在地震动正、负分布区域的边界处大多是不连续的,没有从正值到负值的梯度可言,即使有梯度也很大,如按正负值画等值线在边界处会出现梯度失真;第二个重要的原因是,在实际的震害调查工作中,根据震区的破坏程度进行烈度划分和绘制等震线时,只参考地表破裂的标量值,很少考虑地震动幅值的方向性。

3.1 直立走滑断层的近场地震动峰值分布特征

从图2中可以看出,直立走滑断层引起的地震动峰值位移、速度和加速度以断层迹线为对称轴对称分布,具体特征如下:

(1) 模拟结果中的破裂方向性效应明显。图4示意说明了一系列点位错源激发的地震波在传播过程中所呈现的特征:在破裂传播的前方波前呈压缩趋势,而在破裂后方则正好相反。这种特征与破裂传播的方向性有关,地震波向前传播的过程中从若干点源激发的一系列地震波到达观测点的时差小于点源触发破裂的时差,波前被压缩易形成较大的长周期脉冲,造成破裂前方的震害较为严重;与之相反,破裂传播的后方地震波到达相应观测点的时差拉大,相邻波阵面之间的时间间隔增大,形成宽度大而中等强度的速度脉冲,震害也相对较轻。同这种特征相比较,本文的模拟结果显示,破裂传播的前方等值线较为密集,地震动峰值位移、速度、加速度较大;破裂后方的等值线则相对疏松,震动强度相对较低。

(2) 近场地震动的集中性和条带状分布。近场地震动随断层距的增大衰减较快,致使近场地震动在地表呈现条带状分布,即以断层在地表的投影为中心,较大强度的破坏集中在一个狭窄的范围内。无论是直立断层的单侧破裂和双侧破裂,还是倾斜断层,均符合以上特征。

(3) 单侧破裂机制与双侧破裂机制地震动特征有明显不同。单侧破裂机制下,地震波向前传播,NS向分量上只出现一个最大值,EW向分量的等值线呈蝶状分布,最大值对称于断层迹线,破裂前方的峰值大于破裂后方的峰值;竖向分量的地震动峰值分布图上出现多个地震动峰值沿断层迹线呈串珠状分布。双侧破裂机制下,地表地震动的分布特征有明显的改变,破裂从断层底部中心向两侧和向上传播,地震动峰值分布图在平行断层走向和垂直断层走向方向上均呈现一定的对称性;地震动峰值在断层两端也呈现出明显的对称性,如在地震动的竖向分量中,位移、速度和加速度等值线均在断层两端出现了对称的峰值,突出了双侧破裂机制的地表分布特征。

3.2 倾斜断层的近场地震动峰值分布特征

倾斜断层破裂时引起的近场地震动的最明显特征就是,地表地震动峰值分布不再以断层迹线为轴对称分布,在上盘和下盘,地震动三个分量的峰值分布、等值线的梯度变化、地震位移、速度和加速度的矢量区分布都随着断层破裂机制的不同有所差异。在图3中,断层迹线左侧为上盘,右侧为断层下盘。可以看出:

(1) 上盘效应特征明显。模拟结果表明倾斜断层引起的强地震动NS向分量和竖向分量的峰值均出现在上盘,这是由于倾斜断层上盘的场地总比下盘上距断层水平距离相同的场地更靠近断层面。从图中还可以看出上盘加速度分布较复杂,出现多个加速度峰值呈条带状或放射状分布的现象,强烈震动的分布区域宽于下盘。这是由于地震激发一系列大的加速度脉冲最先到达上盘,并在短时间内实现叠加所致。同时上盘地震动受到子源破裂机制和传播路径的影响较大,导致地震动峰值分布图比下盘的复杂。

(2) 倾斜断层同样具有较强的破裂方向性,只是分布模式更加复杂。从三种破裂机制的地震动分布图中可以发现:一是在NS向分量的地震动分布图中,破裂前方出现了多峰值、放射状的复杂分布形态,这种现象在逆断层和走滑断层的加速度地震动分布图中比较突出;二是对垂直于断层走向的EW分量地震动,上盘的地震动峰值与断层距离较远,下盘的相对较近一些。这两个特征与断层的破裂方向性有密切的关系。对于直立走滑断层,向前的破裂方向性效应主要集中于从震源向破裂的终止端,而对于倾滑断层则产生从震源沿倾斜面向上至地表的

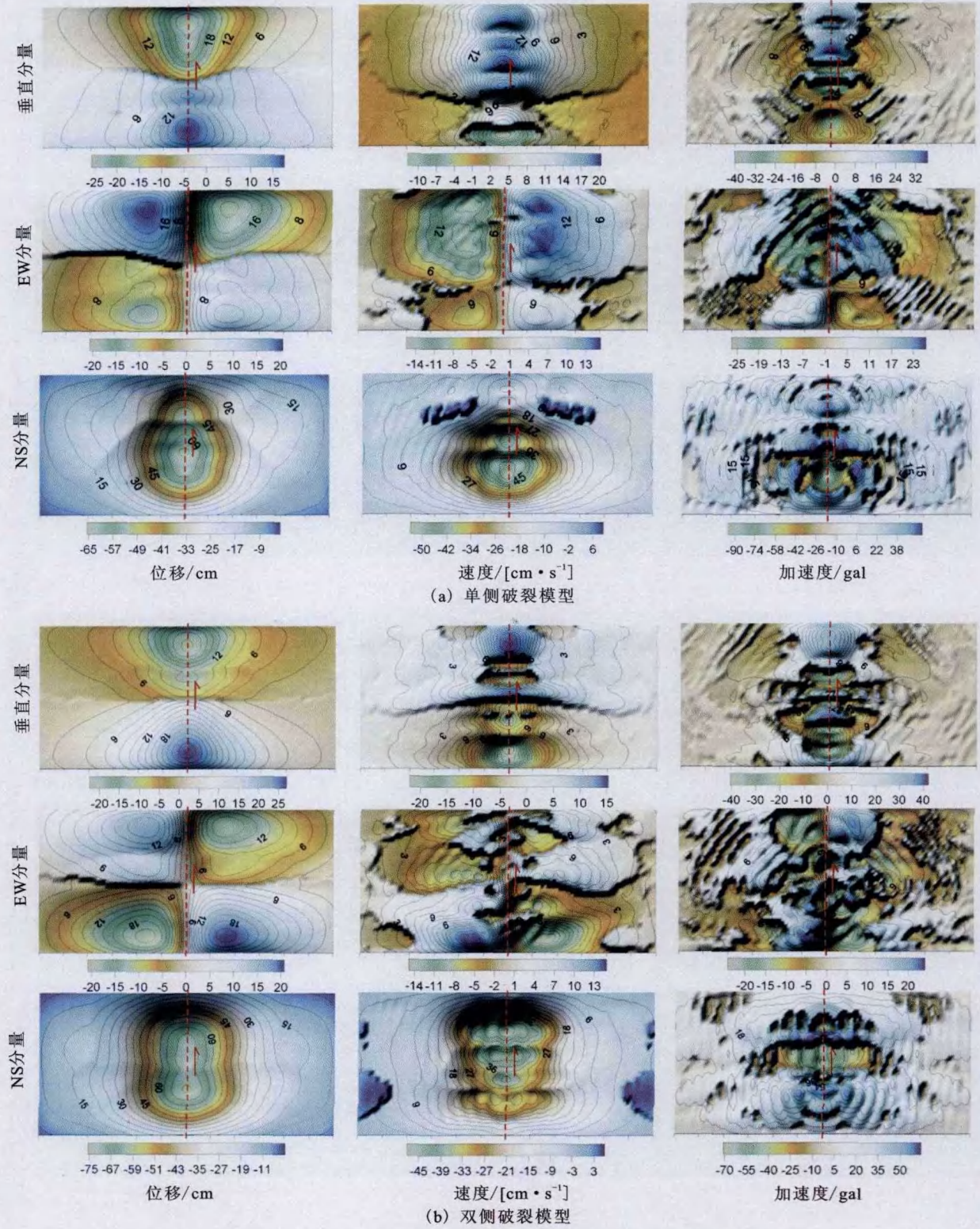
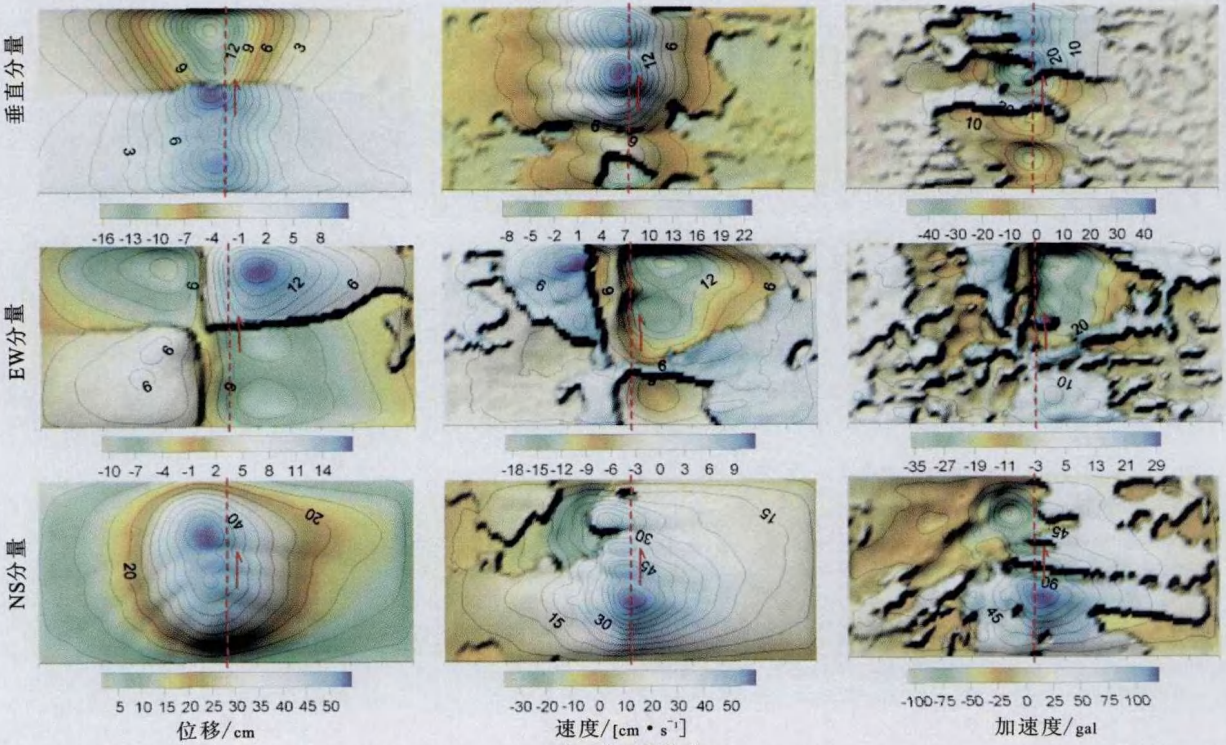
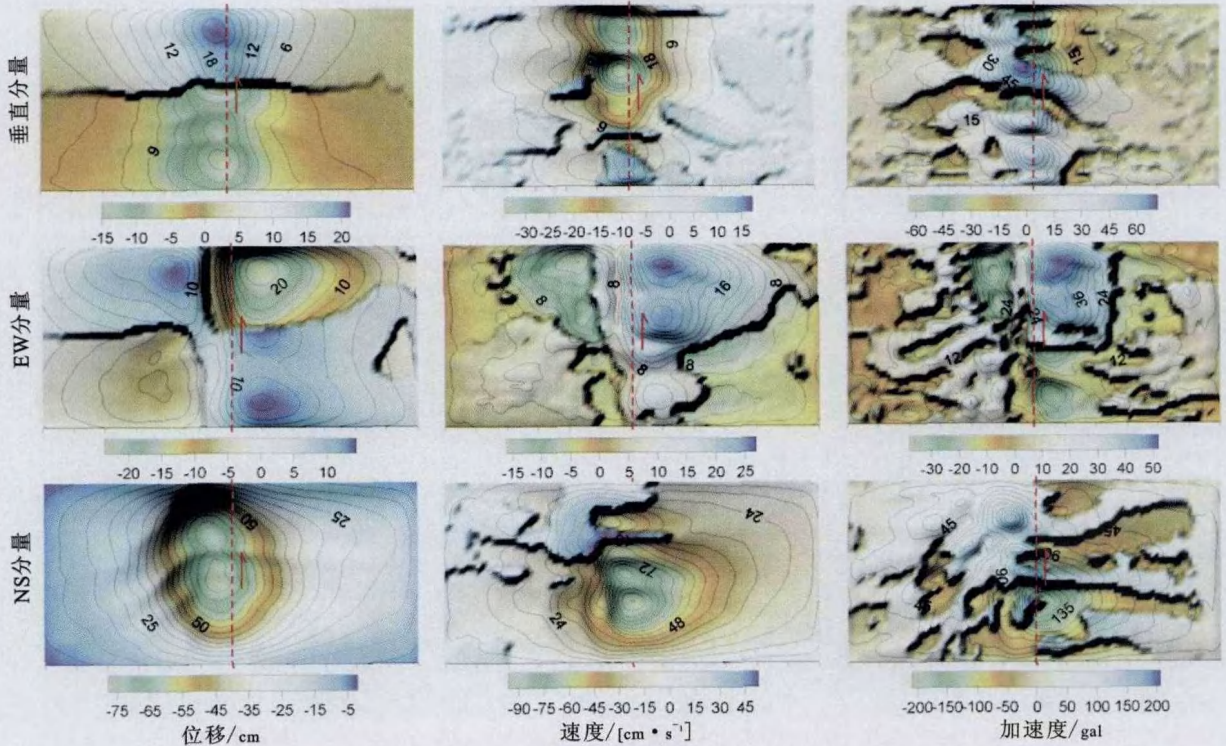


图 2 直立走滑断层引起的地表峰值位移、速度、加速度分布图

Fig. 2 Peak value distributions of displacement, velocity and acceleration on ground surface caused by vertical strike fault.



(a) 正断层模型



(b) 逆断层模型

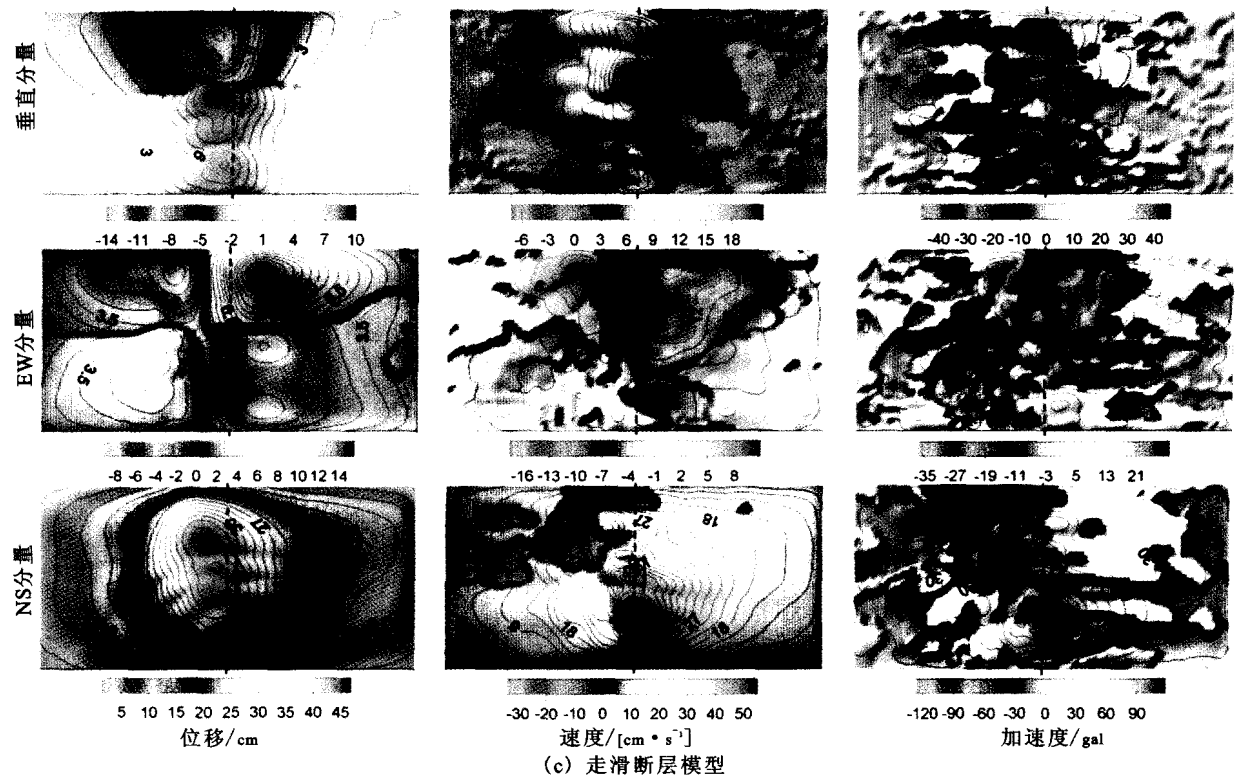


图3 倾斜断层(倾角45°)单侧破裂引起的地表峰值位移、速度、加速度分布图

Fig. 3 Peak value distributions of displacement, velocity and acceleration on ground surface caused by oblique fault (dip angle:45°).

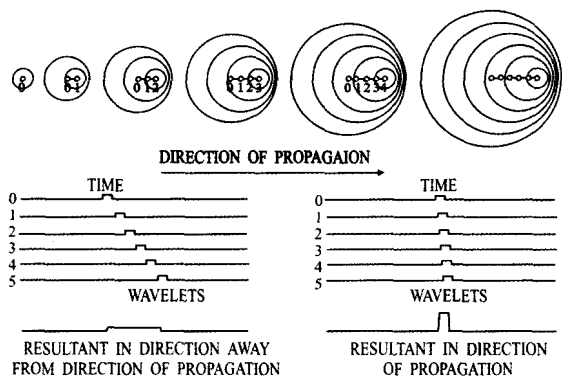


图4 一系列点位错源引起的破裂方向性^[19]

Fig. 4 Rupture directivity of a series of point dislocation sources^[19].

方向性效应^[2],表现了断层产状和破裂机制对三分量地震动图的影响;第三个主要特征是,倾斜断层的地震动峰值大致出现在上盘距断层较近的场地范围内,而不是在断层迹线上,与地震观测到的现场破坏特征基本一致,即距断层迹线较近范围内地表或建(构)筑物的破坏程度并不如想象的严重,相反,震中或极震区往往离断层破裂带有一定的距离。

(3) 断层的破裂机制还影响地震动峰值及其矢

量的地表分布。对比模拟结果得出,倾斜断层的三种破裂机制影响下,逆断层引起地表地震动峰值位移、速度、加速度最大,如在沿破裂方向的分量上(NS向),逆断层引起地表加速度值几乎是正断层的两倍左右,走滑断层引起地表地震动峰值次之,正断层的最小,后两者作用的差别较小,这种模拟分析结果与诸多震害调查的结论也基本一致。从图3中还可看出破裂机制对地震动矢量分布(正负值)的影响:正断层和走滑断层的矢量分布区类似,与逆断层的矢量分布区刚好相反,明显反映了断层滑动方向的影响。

4 结论

采用基于数值格林函数方法的近场强地震动数值方法,在考虑不同断层性质和震源破裂模式的情况下,对直立断层的单侧和双侧走滑破裂,倾斜(倾角为40°)正断层、逆断层和走滑断层破裂进行了近场强地震动数值模拟,分析、归纳近场强地震动的峰值分布特征,结果表明:

(1) 直立断层引起地震动峰值分布以断层迹线为对称轴呈完全对称,呈现强度分布的近场条带

状特征。NS向分量和竖向分量的最大值出现在断层迹线上,EW向分量的最大值离开断层迹线对称分布;单侧破裂和双侧破裂机制直接影响强地震动峰值的分布位置。(2)无论是直立断层还是倾斜断层,其地表强地震动峰值分布所表达的破裂方向性效应显著,位于破裂传播前方的等值线密集,强度大,反映了波前被压缩的趋势;破裂后方的等值线较为疏松,为相邻波阵面之间的时间间隔增大,不同子源激发的地震波到时差增加所致。

(3)倾斜断层引起地震动的上盘效应明显,NS向分量和竖向分量最大的峰值出现在上盘靠近断层迹线处,EW向分量的峰值在断层迹线两侧呈不对称分布。

(4)对于倾斜断层,逆断层引起的地震动峰值最大,走滑断层的次之,正断层的最小。

当然,通过近场强地震动结果还可以对近场破裂方向性效应和上盘效应的波形特征进行更进一步的分析研究,由于篇幅所限,在以后的文章中会详加论述。

[参考文献]

- [1] Somerville P G. Seismic hazard evaluation[A]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Auckland:IAEE,2000: 2883.
- [2] 陶夏新,王国新. 近场强地震动模拟中对破裂的方向性和上盘效应的表达[J]. 地震学报. 2003, 25(2):191-198.
- [3] 董娣,桑向国,刘锐,等. 震源机制对近场地震动反应谱的影响[J]. 西北地震学报. 2008,30(1):6-10.
- [4] Wang G Q, Boore D M, Igel H, et al. . Some observation on collocated and closely-spaced strong ground motion records of the 1999, Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2003, 93(2): 674-693.
- [5] Brad T Aagaard . Finite-Element Simulation of Earthquakes [D]. Pasadena California:California Institute of Technology, Report No. EERL 03,1999.
- [6] Hiroshi Kawase, Shinichi Matsushima, Robert W Graves, et al. Strong Motion Simulation of Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake Considering Both the Heterogeneous Rupture Process and the 3-D Basin Structure[A]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Auckland: IAEE,2000:0990.
- [7] Hisade Y, Jacobo BIELAK . Effects of Sedimentary Layer on Directivity Pulse and Fling Step[A]// Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Canada: Vancouver, B. C. , 2004:1736.
- [8] Wang Haiyun, Tao Xiaxin, Li Jie. Global source parameters of finite fault model for strong ground motion simulations or predictions[A]//Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering [C]. Canada: Vancouver, B. C. , 2004: 2743.
- [9] 廖振鹏. 近场波动的数值模拟[J]. 力学进展, 1997, 27(2):193-216.
- [10] 高孟潭,俞言祥,张晓梅,等. 北京地区地震动的三维有限差分模拟[J]. 中国地震, 2002, 18(4): 356-364.
- [11] 张冬丽,陶夏新,周正华. 近场地震动格林函数的解析法与数值法对比研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 199-205.
- [12] 王满生,姜慧,胡聿贤. 交错网格有限差分随机过程模拟强震地面运动比较[J]. 地震学报, 2005, 27(5):543-550.
- [13] 丁海平,刘启方,黄勇,等. 三维地震动场数值模拟并行计算系统[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2):19-22.
- [14] 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.
- [15] 温联星,姚振兴. 用广义射线和有限差分计算近场理论地震图的混合方法[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2):211-219.
- [16] 周正华,廖振鹏. 消除多次透射公式漂移失稳的措施[J]. 力学学报, 2001, 33(4):550-554.
- [17] D J Wald, T H Heaton, K W Hudnut . The Slip History of the 1994 Northridge, California, Earthquake Determined from Strong Ground Motion, Teleseismic, GPS, and Leveling Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86: 49-70.
- [18] Brune. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal Geophysical Research. 1970, 75(26): 4997-5009.
- [19] 张冬丽,陶夏新,周正华. 关于有限断层计算模型的研究—考虑位错时、空不均匀分布的滑动时间函数[J]. 西北地震学报. 2005, 27(3):193-198.
- [20] Singh J P. Characteristics of Near-Field Strong Ground Motion and Their Importance in Building Design[A]//Proceedings of Applied Technology Council (ATC) Seminar on Earthquake Ground Motion and Building Damage Potential [C]. San Francisco:ATC. 1984.