



不同性质断层触发地震对滑坡崩塌分布的影响^{*}

Different fault impact on the regional tectonic stress field and the distribution of landslide collapse with finite element method

惠红军¹ 陈晓利² 杨家英¹ 赵永红^{*}

HUI HongJun, CHEN XiaoLi, Yang JiaYing and ZHAO YongHong

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2014-04-09 收稿; 2015-01-20 改回; 2017-10-15 接受; 2017-12-22 在线出版

引用格式:

惠红军, 陈晓利, 杨家英, 赵永红. 2017. 不同性质断层触发地震对滑坡崩塌分布的影响. 岩石学报. doi: 10.18654/2095-8927/201404090072

Hui HJ, Chen XL, Yang JY and Zhao YH. 2017. Different fault impact on the regional tectonic stress field and the distribution of landslide collapse with finite element method. *Acta Petrologica Sinica*, doi: 10.18654/2095-8927/201404090072

Abstract: Earthquake-induced landslide because of its huge hazard caused widespread social concern. During an earthquake, large displacement is often accompanied by a strong ground motion, where under conditions suitable topography is easy to trigger landslides. In this paper, based on the establishment of three ideal models of normal faults, reverse faults and strike-slip faults with the finite element method, the distribution of these three co-seismic fault displacements produced were analyzed, and the potential for seismic landslide hazard areas were predicted. The results show that under the same differential stress, co-seismic displacements generated based on the size and distribution of different seismic fault model is different, but are concentrated in the vicinity of the fault. And strike-slip fault model are different, normal faults and reverse faults with seismic displacement model showed significant effects on the disk. This paper also studied the distribution of co-seismic displacement field generated by the earthquake and the landslide triggered by the earthquake, preliminary results show that the landslide occurred in the same general area of larger co-seismic displacement, and mainly on plate.

Key words: finite element; different faults; Wenchuan earthquake; co-seismic displacement

摘要: 地震诱发滑坡因其巨大的致灾性引起广泛的社会关注。地震中,在持时一定的情况下,较大的同震位移往往伴随着较强的地震动,而地震动较强的区域,在有适宜的地形地貌条件下则易触发滑坡。本文利用有限元方法在建立正断层、逆断层和走滑断层等三种理想模型的基础上,对这三种断层产生的同震位移分布特征进行了分析,并对潜在的地震滑坡危险性区域进行了预测。结果显示,在相同的差应力下,基于不同断层模型的地震产生的同

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(41274094)资助

第一作者简介: 惠红军, 地球物理专业硕士生, 2011年毕业于北京科技大学物理系

通讯作者: 赵永红, E-mail: zhaoyh@pku.edu.cn

震位移大小及分布是不同的,但都集中于断层附近。与走滑断层模型不同的是,正断层及逆断层模型同震位移表现出明显的上盘效应。本文还研究了汶川地震产生的同震位移场分布,对汶川地震触发的滑坡分布作了较粗略的拟合,初步结果显示,滑坡一般出现在地震同震位移较大的区域,且集中在上盘。

关键词: 有限元; 不同断层; 汶川地震; 同震位移

中图分类号: P542

0 引言

2008年汶川地震滑坡灾害是迄今为止记录到的在一次地震中产生滑坡崩塌分布范围最广、数量最多的事件。该次地震中约有20000人的伤亡时由滑坡崩塌造成的。震后众多的地学工作者对滑坡分布的特征进行了研究,其中,滑坡崩塌灾害在断裂带两侧不对称分布的现象引起广泛的关注。黄润秋等(2008)在汶川地震断层效应的研究中认为,断层对滑坡出现的范围、密度及坡体滑动的优势方向等有重要影响,而逆冲型断层的上下盘效应则是导致滑坡崩塌灾害在上盘分布明显多于下盘的主要原因。陈晓利等(2011)通过对北川地区滑坡崩塌分布与岩性、坡度、高程等影响因素相互关系的分析,也获得断层错动方式是影响该区滑坡在断裂带两侧不对称分布的主要原因的认识。

逆冲型断层相较于走滑断层和正断层能够在更大的范围触发更多的滑坡崩塌灾害的认识不仅得到大量震例的证实,而且也具有一定的动力学数值模拟成果的支持。大量的研究表明断裂的几何形状、运动方式对破裂速度、地表变形、地震动参数等起着重要的影响作用(Oglesby et al., 2000, 2001; Abrahamson and Somerville, 1996)。地震动作为地震滑坡的触发因素,在一定地形地貌条件下,其强度大小对滑坡的发生与否起着重要的作用。Oglesby等学者针对1999年台湾集集地震中断裂的几何形态对该地震的动力学影响进行了三维数值模拟研究,认为集集地震中发震断层的逆冲运动方式与几何形态不仅是引起上盘地震动较下盘强烈的主要原因,同时也是较高的地震动加速度值分布在上盘近断层区域的主要原因(Oglesby et al., 2001)。张冬丽等对汶川地震强震记录的研究认为断层距和上盘效应控制了地震动强度的变化,在断层上盘地震动的峰值加速度明显大于断层下盘等距离台站的相应值,距离断层较近的区域内地震动峰值加速度较大,离开断层后峰值加速度迅速衰减,且下盘衰减明显快于上盘(张冬丽等, 2009)。这样的研究结论是汶川地震中滑坡大量分布于上盘的有效解释之一。

不同运动特性的断裂所触发地震在地震动的衰减规律上表现出不同的特点。在地震发生的短时间内,较大的同震位移意味着较强的地震动加速度,当加速度达到一定阈值时,则可造成坡体破坏或失稳,进而触发滑坡崩塌等灾害。许冲等(2012)将地震滑坡影响因子分为地震因子、地形因子、地质因子及其他因子,对玉树地震滑坡的统计研究中得出同震位移大的地方,滑坡较易发生的初步结论。

胡才博等于2009年提出了同时考虑区域构造应力与介质不均匀性来研究地震触发与应力场连续变化的有限元新模型,认为地震的触发不仅与断层的强度和几何形状有关,震前区域应力场对地震的发生也有很关键的影响(胡才博等, 2009),但并未对不同断层模型的影响做出相应的计算分析。本文即是在采用这种新方法并同时考虑震前构造应力场和断层介质不均匀性,基于FEPG的有限元新模型,通过对不同性质断层的同震位移进行数值模拟,分析地震滑坡崩塌分布与应力改变的相互关系,从区域构造应力场的角度研究不同断层模型触发的滑坡空间分布特征,对地震滑坡的上下盘效应进行分析,并以汶川地震为例进行了分析。

1 不同性质断裂对同震位移的影响

1.1 计算方法简介

在力学上,地震可以模拟为断层带介质突然软化而引起应力释放的失稳过程(胡才博等,2009),该计算方法的基本原理为在断层模型上持续施加一载荷,模拟震前区域构造应力。在某一时刻通过降低断层处材料强度(即加入断层,考虑介质不均匀性)触发地震。具体实现方法是,在有原始断层但尚未滑动的模型上施加载荷,产生的物理场作为初始构造应力场;在降低断层材料强度的模型上施加相同的边界条件,产生的物理场作为最终场;而最终场减去初始场的结果即可得到地震产生的同震位移场。

1.2 三维理想模型

为了使边界束缚对断层周围产生的影响可以忽略,即远震区的位移为零,本模型选择了一个较大的尺度。模型大小为500km(L)×500km(W)×100km(H)。断层长度约200km,延伸至地表下30km。为了考虑断层介质的不均匀性,断层取为厚度为200m的薄弱层,这种有厚度的模型更加符合现实地壳中的断层(胡才博等,2009)如图1中蓝色部分。而断层周围介质设定为各向同性的材料。其材料参数设定见表1。因重力场的影响在计算中会抵消掉,故在计算过程中可不予考虑。三种模型均划分成16380个六面体单元,18662个节点。

表1 理想模型材料参数设定值

Table 1 The set value of ideal model material parameters

	杨氏模量 E/Pa	泊松比 ν	密度 $\rho/\text{kg/m}^3$
围岩介质	1.0×10^{10}	0.3	3000
断层	1.0×10^8	0.3	3000

图1,图2,图3分别为逆断层、正断层和走滑断层三维有限元模型。

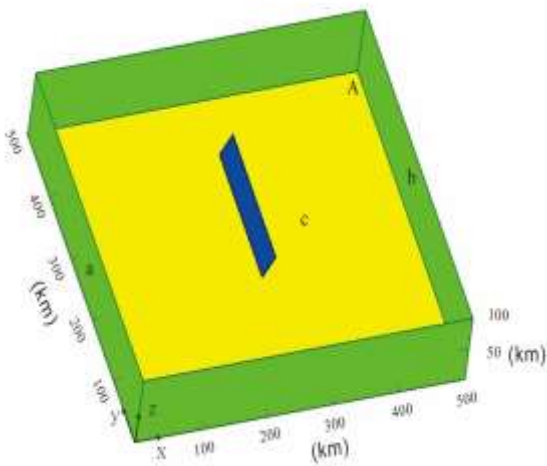


图1 逆断层模型简图

Fig.1 Thrust fault model diagram

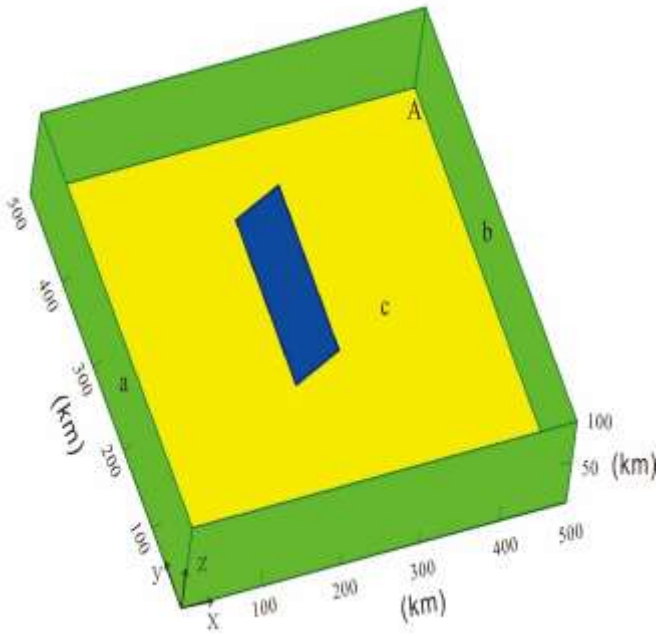


图 2 正断层模型简图

Fig.2 Normal fault model diagram

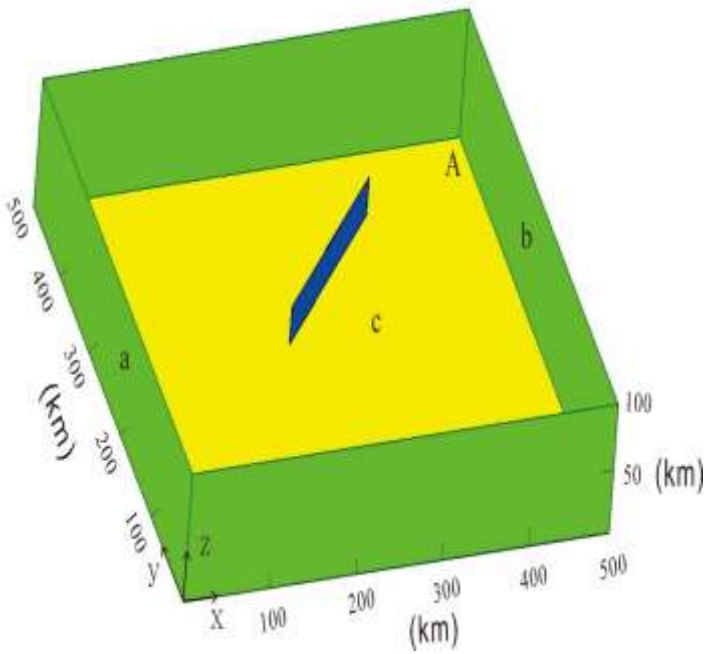


图 3 走滑断层模型简图

Fig.3 Strike-slip fault model diagram

表 2 为三种断层模型参数与相应约束条件。

表 2 模型参数及约束条件

Table 2 Model parameters and constraints

断层类型	断层走向	断层倾角/度	模型约束条件
逆断层	NS	30	a 面 10MPa 差应力;
走滑断层	NE	90	b、c 面滚桶约束;
正断层	NS	60	A 点固定, 地表自由。

2 理想模型有限元计算的结果与分析

通过计算, 本文获得了逆断层、正断层及走滑断层地震 x、y、z 三个方向的同震位移分布。下列结果图 4—12 中左上、左下分别为地表、地下深 30km 处的剖面 (断层与基岩交界面) 的计算结果, 右列 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 和 l_5 分别为模型中自北向南, 垂直于 y 方向的 5 个切面结果图, 其位置分别为断层端点与模型边界的中点处、断层端点处、断层中点处, 具体位置因断层不同而不同。

2.1 逆断层的计算结果与分析

图 4、图 5 和图 6 分别为逆冲断层模型同震位移场在 x 方向、y 方向和 z 方向的计算结果。模型中 5 个切面的位置分别为从南向北 75km、150km、250km、350km 和 425km 处。

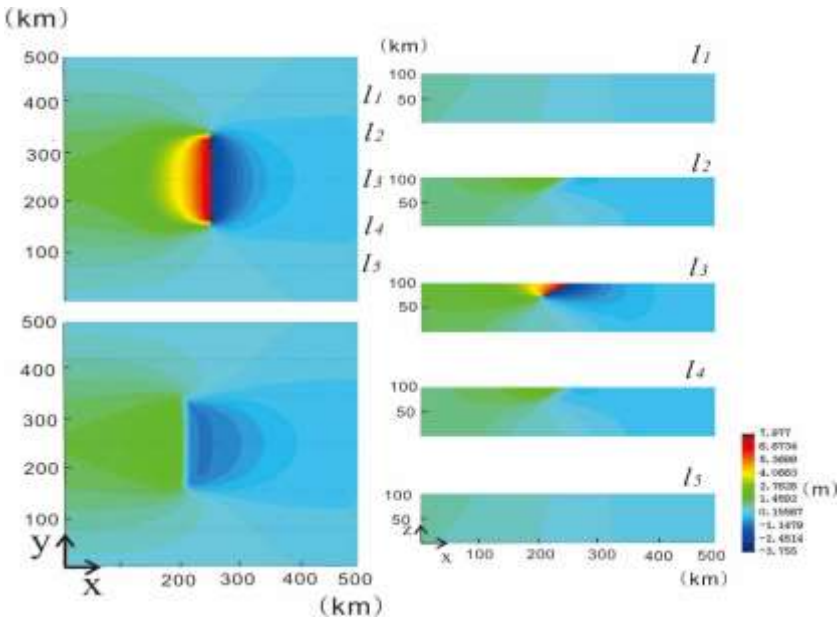


图 4 逆冲断层模型 x 方向同震位移场

Fig.4 Coseismic displacement field in the x direction of thrust fault model

计算结果中, 正负位移表示沿 x 正方向与负方向的位移。U 方向位移的最大值出现在地表上, 离端部大约 20km 的断层面上, 即图 4 中星号位置处, 达到近 8m 的位移。从 5 个切面图和断层与基岩交界面的结果可以看出, 随着深度的增加, 位移变小。且在 100km 深的地方, 位移影响衰减为零。 l_3 切面上, 东西方向上, 位移最大的地方集中在断层附近, 随着离断层距离的增加而快速变小, 这正反应了地震灾害的严重性随着与断裂带距离之间的关系。因为模型在几何上的对称性, 同震位移结果在南北方向也呈现出高度的对称性。结果显示了较强的上盘效应, 且在断层延长线上的位移基本为零。

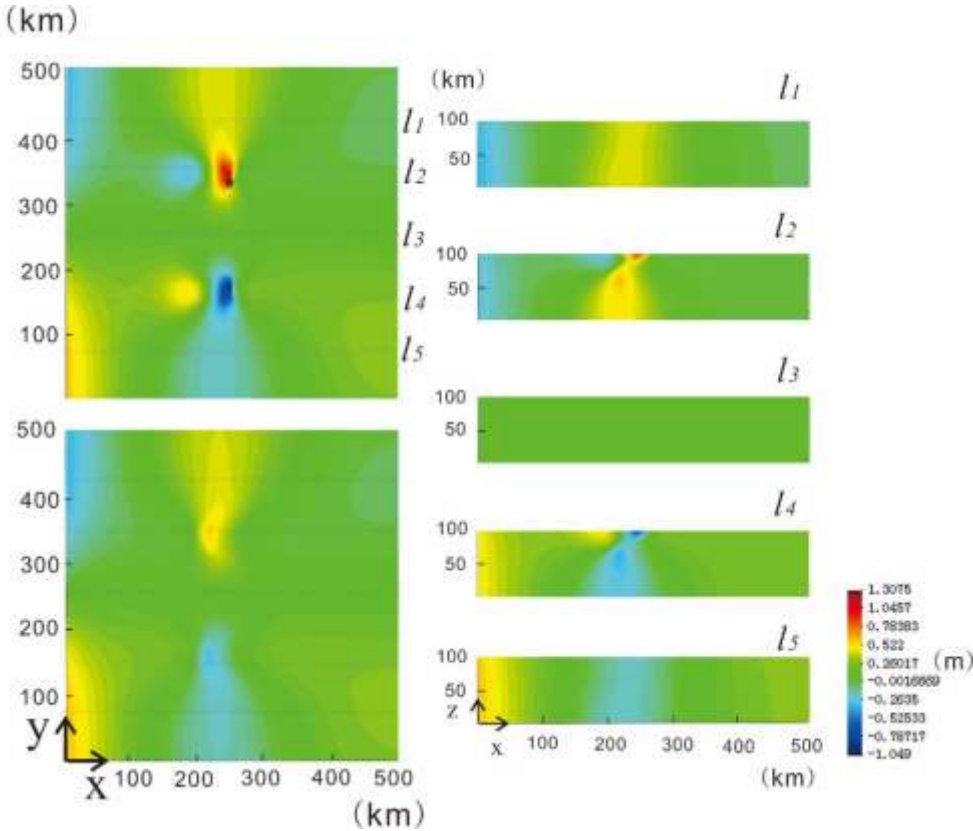


图5 逆冲断层模型 y 方向同震位移场

Fig.5 Coseismic displacement field in the y direction of thrust fault model

正负位移表示沿 y 轴正方向与负方向的位移。与 x 方向同震位移一样, y 方向位移最大值也出现在地表处, 离断层端部 20km 的地方, 正方向最大约 1.3m 的位移, 负方向最大约 1m 的位移, 产生数值不对称的原因是模型边界条件设定的不完全对称, 即为了约束模型而施加的一个固定节点 A。垂直于断层的范围内出现了一个同震位移为零的东西向的带, 即 l_3 切面附近。断层延长线的方向向南处为负位移, 向北为正位移, 这是由岩体的性质决定的, 因为最大主应力方向沿东西方向。从地表的同震位移图中可以清晰地看到, 在断层端部位移集中区的西部,

出现了与断层端部位移值反向的位移分布, 且在断层端的西部出现了集中区域。这可能是因断层延长线上的介质受力向南北方向移动, 而周围介质向中间填补的过程引起的。

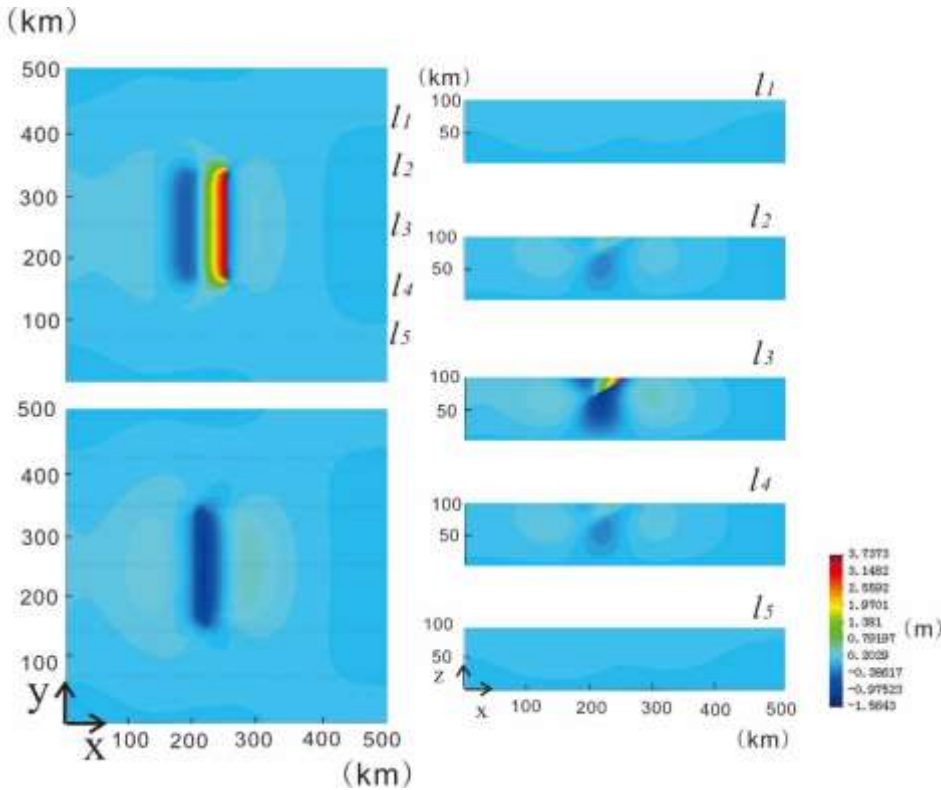


图6 逆冲断层模型 z 方向同震位移场

Fig.6 Coseismic displacement field in the z direction of thrust fault model

计算结果中, 正负位移为沿 z 正方向与负方向的位移。在断层附近, 上盘上升, 最大位移达到 3.7m, 下盘下陷, 达到近 1.6m。而在稍远离断层的地方, 位移呈现出很小的反向, 这可能是介质流走后所呈现的现象。另在远离断层的模型边界上, 也出现较小的不均匀位移。因为 z 方向上的约束完全对称, 结果呈现出高度南北对称性。

从图 4、图 5 和图 6 的对比中可以看到, x 方向的位移明显大于其他两个方向, 这正是断层走向和区域主应力方向的体现。

2.2 正断层的计算结果与分析

图 7、图 8 和图 9 分别为正断层模型同震位移场在 x 方向、y 方向和 z 方向的计算结果。正断层模型中 5 个切面的位置分别为从南向北 75km、150km、250km、350km 和 425km 处。

计算结果中, 正负位移分别表示沿 x 正方向和负方向的同震位移。x 方向位移最大和最小的点都在地表上距离断层端部 20km 的断层面上, 分别达到了 8.5m 和近 9m。从上图可以看出, 计算结果是南北对称的, 且在模型边缘处为零。上盘的位移为负, 下盘的位移为正, 表明断层处被拉开。另可以看到, 深度为 30km 处平面上, 位移的方向与其上覆的上下盘位移方向是一致的, 只是位移值要小很多。

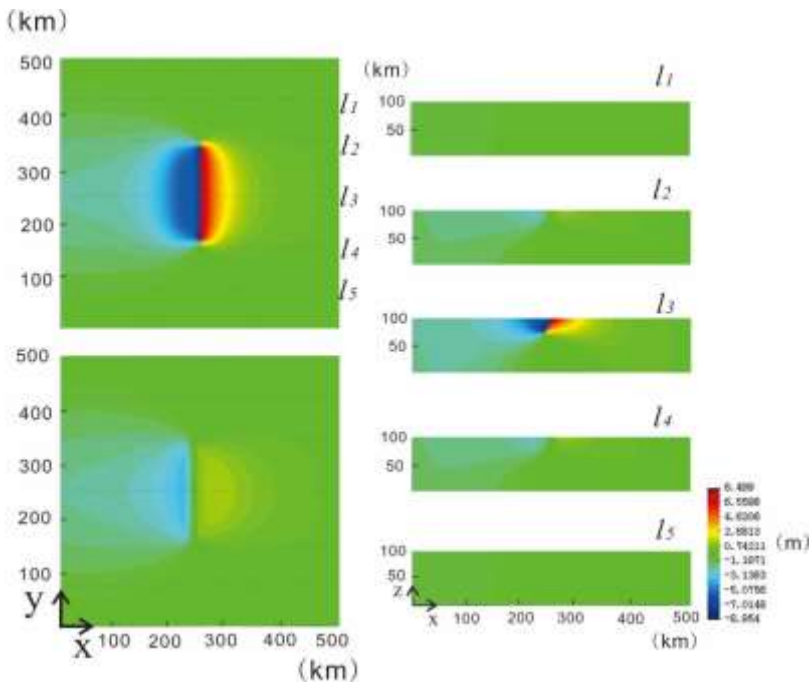


图7 正断层模型 x 方向同震位移场

Fig.7 Coseismic displacement field in the x direction of normal fault model

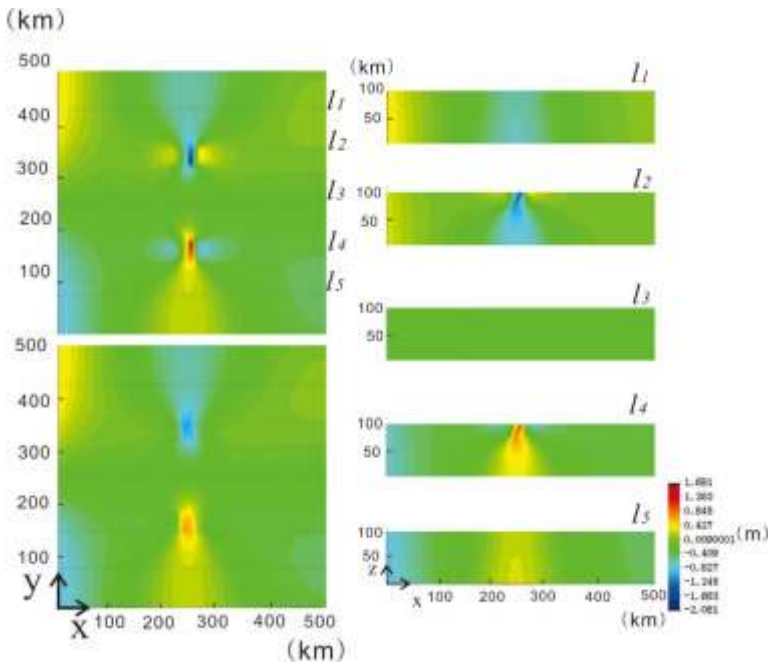


图8 正断层模型 y 方向同震位移场

Fig.8 Coseismic displacement field in the y direction of normal fault model

计算结果中, 正负位移分别表示沿 y 正方向和负方向的同震位移。 y 方向同震位移最大值也出现在离断层端部 20km 的地表处, 最大正向位移达到 1.681m, 最大负向位移达 2.081m。从上图可以看出, 地表处的 y 方向同震位移场在断层端部出现高度集中, 且在北端位移为负, 南端位移为正, 在断层延长线的部分也出现与相应南北端相同方向的同震位移。但在断层端部的东面和西面的位移方向出现了较小的与相应的端部位移相反的现象。深度为 30km 处的平面上的结果的大体轮廓与地表相似, 只是在断层端部附近的东面和西面都没有出现相对的位移值的集中现象。右列的切面图可以看到, 位移方向与其所在点的地表是相同的, 且 l_3 图的位移值为零。

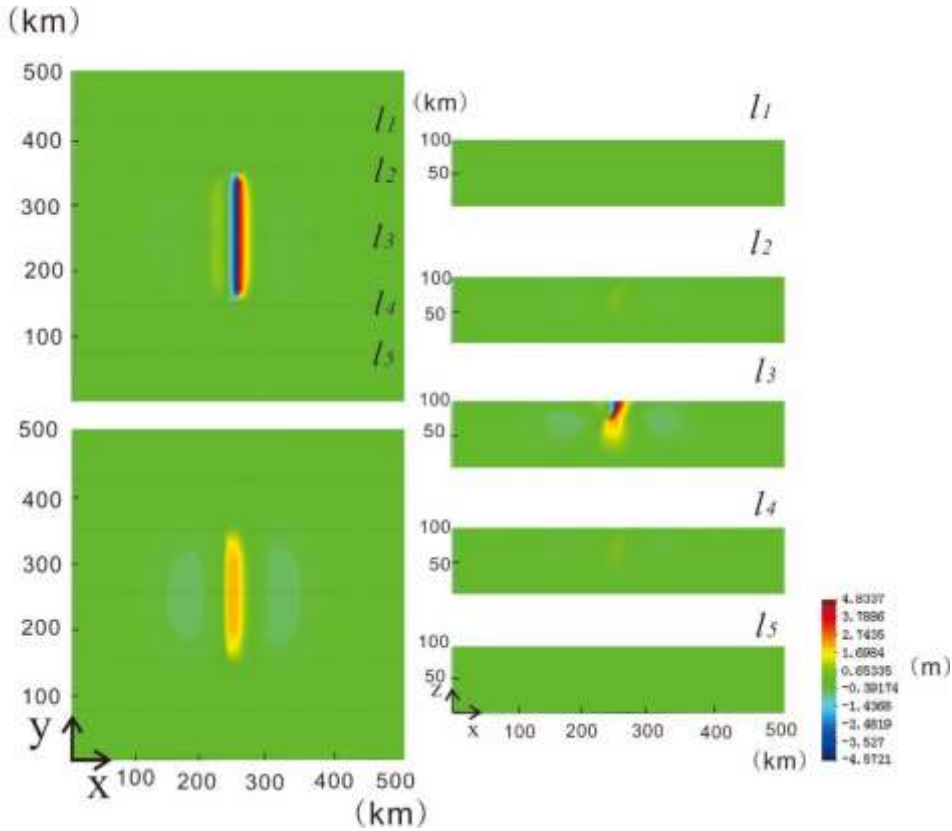


图9 正断层 z 方向同震位移场

Fig.9 Coseismic displacement field in the z direction of normal fault model

计算结果中, 正负位移分别表示沿 z 正方向和负方向的同震位移。 z 方向同震位移最大值出现在断层面中央, 深度为 12km 的地方, 达 4.8m。反向最大出现在地表距离断层端部 20km 的地方, 达近 4.6m。地表同震位移图显示, z 方向同震位移在断层周围高度集中, 上盘为负, 下盘为正, 且下盘位移不为零的面积略大。在上盘稍远于断层的地方出现了一部分区域同震位移为正的现象, 值较小。深度为 30km 处的平面上, 断层底部周围出现位移集中, 且都为正值, 而在断层的东边和西边均出现了位移值较小的负向位移。从右列切面图上可以看到, 远离断层的两个面上位移值为零, 而模型中央的切面 l_3 显示出位移在断层周围的高度集中, 在远离断层处快速衰减为零。

2.2 走滑断层的计算结果与分析

走滑断层模型中 5 个切面的位置分别为从南向北 90km、180km、250km、320km 和 410km 处。图 10、图 11 和图 12 分别为正断层模型同震位移场在 x 方向、y 方向和 z 方向的计算结果。

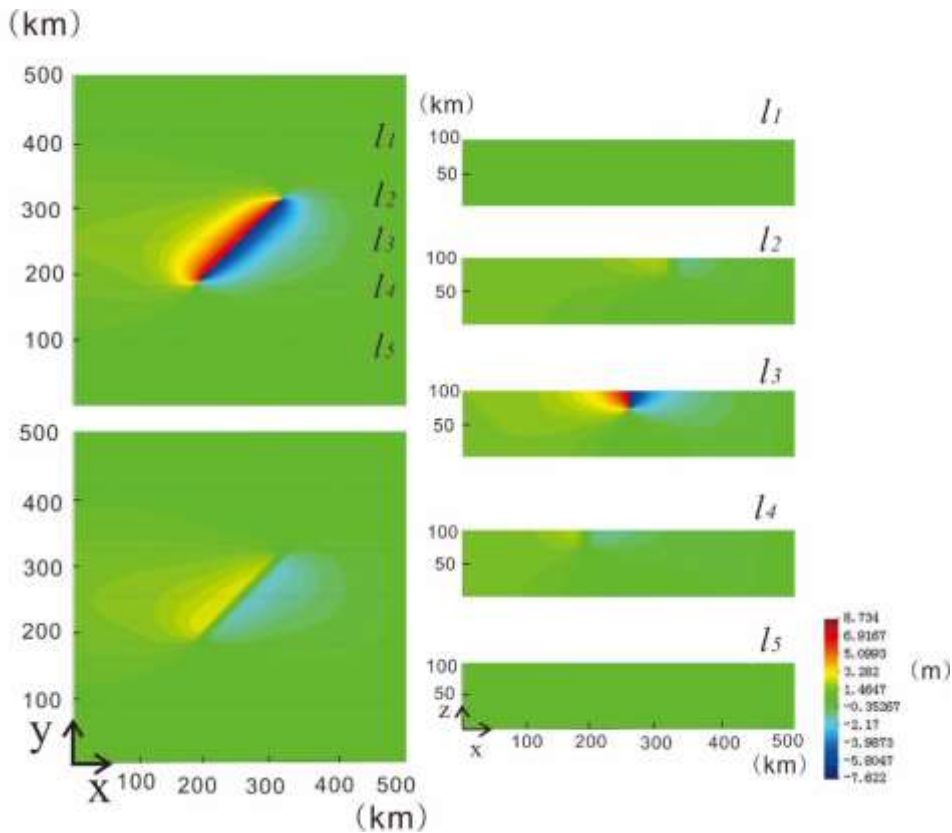


图 10 走滑断层 x 方向同震位移

Fig.10 Coseismic displacement field in the x direction of strike-slip fault model

计算结果中，正负位移为沿 x 正方向与负方向的位移。 x 方向同震位移正方向最大值出现在离断层 SW 端近 20km 的地表处，达到 8.7m。反方向最大值出现在离断层 NE 端近 20km 的地表处，达到 -7.6m。图 10 中显示， x 方向同震位移高度集中在断层附近区域，远离断层时快速衰减，远场处位移值为零。且在断层 SE 方向区域位移为负，断层 NW 方向区域位移为正。在深度为 30km 的平面上，也出现了类似地表的位移情况，数值小很多。右列切面图中，走滑位移在断层附近只是发生在有断层的深度内，而在稍远的地方位移才扩展到更深的地方，但位移值要小得多。

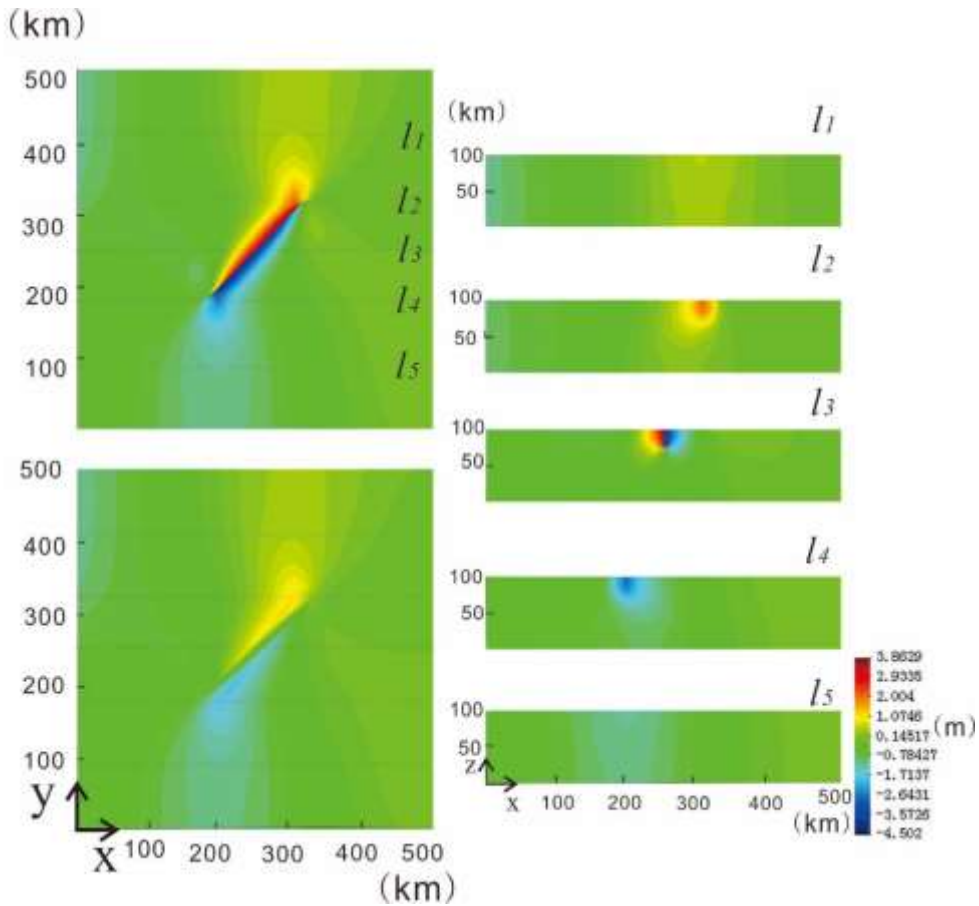


图 11 走滑断层 y 方向同震位移

Fig.11 Coseismic displacement field in the y direction of strike-slip fault model

计算结果中，正负位移为沿 y 正方向与负方向的位移。 y 方向同震位移正向最大的值出现在离断层 NE 端近 20km，深度为 6km 的断层面上达到近 3.9m；负方向最大的位移出现在离断层 SW 端近 20km，深度为 6km 的断层面上，达到 4.5m。图中可以看到， y 方向位移高度集中在断层面附近，且断层面 NW 方向区域位移为正，SE 方向区域位移为负，远离断层面位移值快速衰减，在远场处近似为零。结合图 10、图 11 可知，断层面 NW 方向区域位移方向为 NE，断层面 SE 方向的区域位移方向为 SW，整体出现走滑。右列切面图显示， y 方向同震位移主要集中在有断层的上部地壳部分，且断层附近 NE 端的位移为正，SW 端为负向位移。

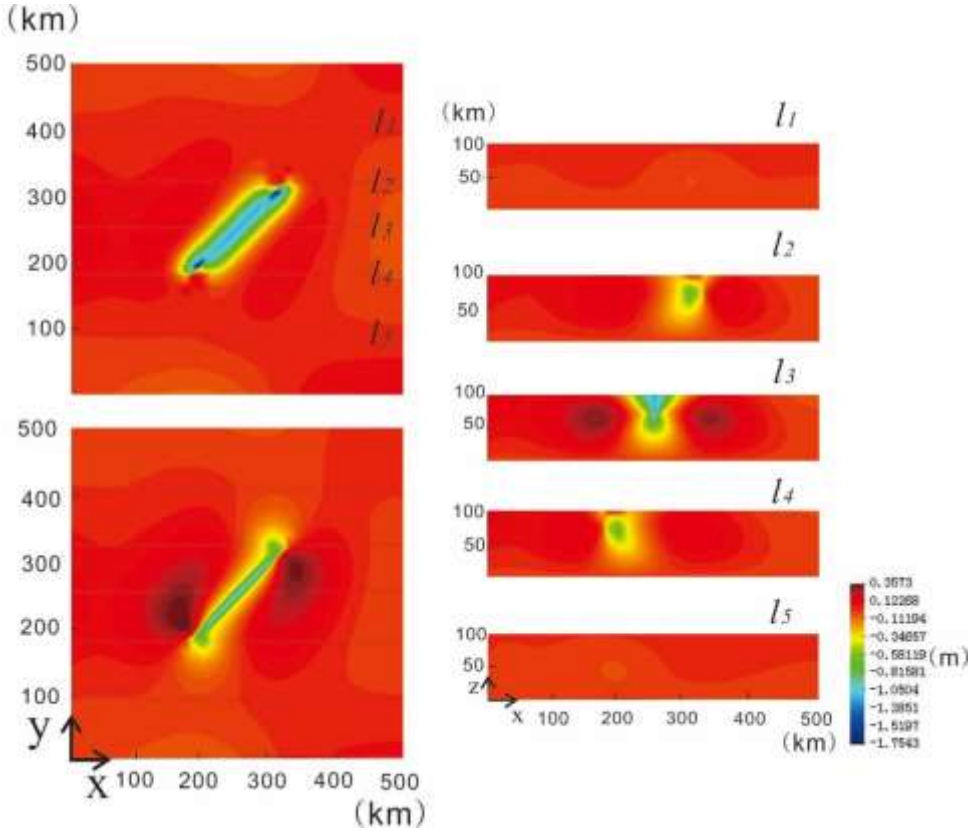


图 12 走滑断层 z 方向同震位移

Fig.12 Coseismic displacement field in the z direction of strike-slip fault model

计算结果中, 正负位移为沿 z 正方向与负方向的位移。 z 方向同震位移正向最大值出现在深度为 30km 的平面上, 断层 SW 端 NW 方向约 3km 的地方, 达到近 0.4m; 负方向最大值出现在距断层 NE 端近 20km 的地表断层上面, 达到 1.7m。上图中可以看出模型断层稍远及远场 z 方向同震位移为正, 只在断层附近处同震位移为负但数值均较小。在深度为 30km 的平面上, 位移为正的在断层端部产生集中。

3 汶川地震发震断层有限元计算

在上述理想模型的分析基础上, 以龙门山断裂带为例, 采用该方法对汶川地震中演断裂带的同震位移进行计算分析。

3.1 龙门山断裂带三维有限元模型的建立

汶川地震发生在青藏高原东部边界的龙门山断裂带。龙门山推覆构造带长约 500km, 宽约 40~50km, 由 3 条走向 NE45°, 倾向 50~70° 的逆断裂叠瓦状组合而成。从北西向南东, 这三条平行的断裂分别是龙门山后山断裂, 龙门山中央断裂, 龙门山山前断裂。龙门山后山断裂主

要包括青川断裂, 汶川-茂汶断裂和耿达-陇东断裂; 龙门山中央断裂包括茶坝-林庵寺断裂, 北川-映秀断裂, 盐井-五龙断裂等组成; 龙门山山前断裂又称 灌县-江油断裂, 由江油-广元断裂、灌县-江油断裂、双石-大川断裂等斜列而成 (徐锡伟等, 2008)。震后野外调查发现该次地震沿北川-映秀断裂、灌县-江油断裂分别产生了 240 公里、90 公里的地表破碎带, 最大的垂直位移和水平位移分别为 6.8 米, 4.8 米 (徐锡伟等, 2008; 何宏林等, 2008)。

本文采用采用的计算模型综合于 Shen Z K 等 (2009) 及徐锡伟等 (2010) 的反演模型, 但只模拟龙门山中央断裂的作用, 如图中所示, 材料参数如表 1 所示。模型尺寸为 1000km(L)×1000km(W)×100km(H), 断层厚度约为 200m, 长 320km, 以不同的倾角延伸至地下 20km, 如图 13 所示。

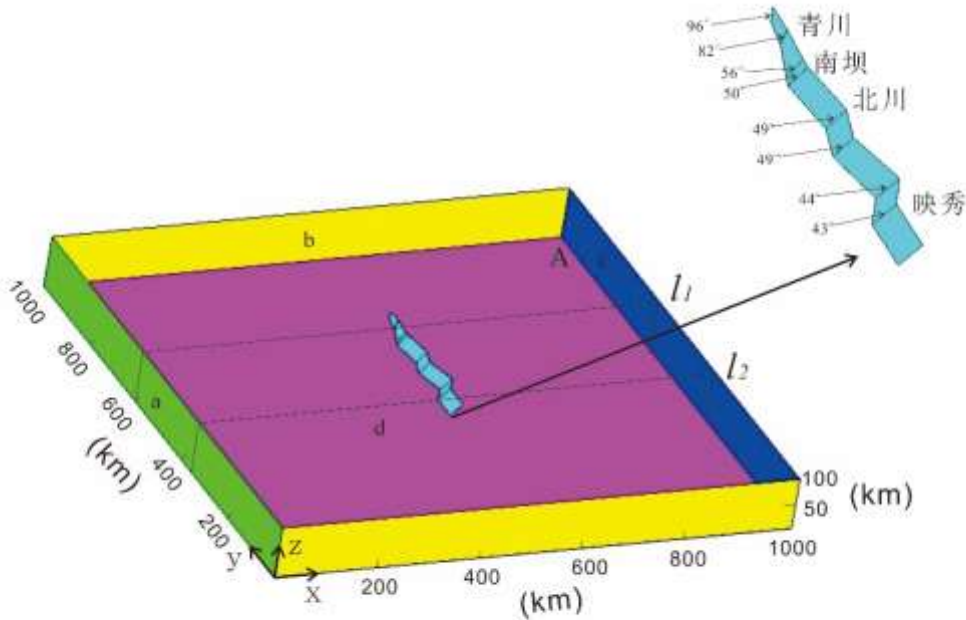


图 13 龙门山断层几何模型 (改自赵永红等, 2014)

Fig.13 The geometry model of Longmenshan fault (from Zhao Y H et al, 2014)

模型西侧为青藏高原挤压作用, 计算中沿垂直于断层方向即垂直于 a 面加载 10M 差压应力。模型东侧和模型底面分别为四川盆地阻挡作用和地幔支撑作用, c 面和 d 面均采用滚桶位移约束, 地表与 b 侧面及其对面自由。

3.2 计算结果及分析

图 14-15 为龙门山断层模型计算结果。其中, 图 14 及 15 为同震位移图。其中 x 方向沿垂直断层的东南方向为正, y 方向沿平行于断层的东北方向为正, z 竖直向上为正。图 15 中的 l_1 、 l_2 切面位置如图 13 中所示, 分别距模型 b 面边界 490km 与 625km。

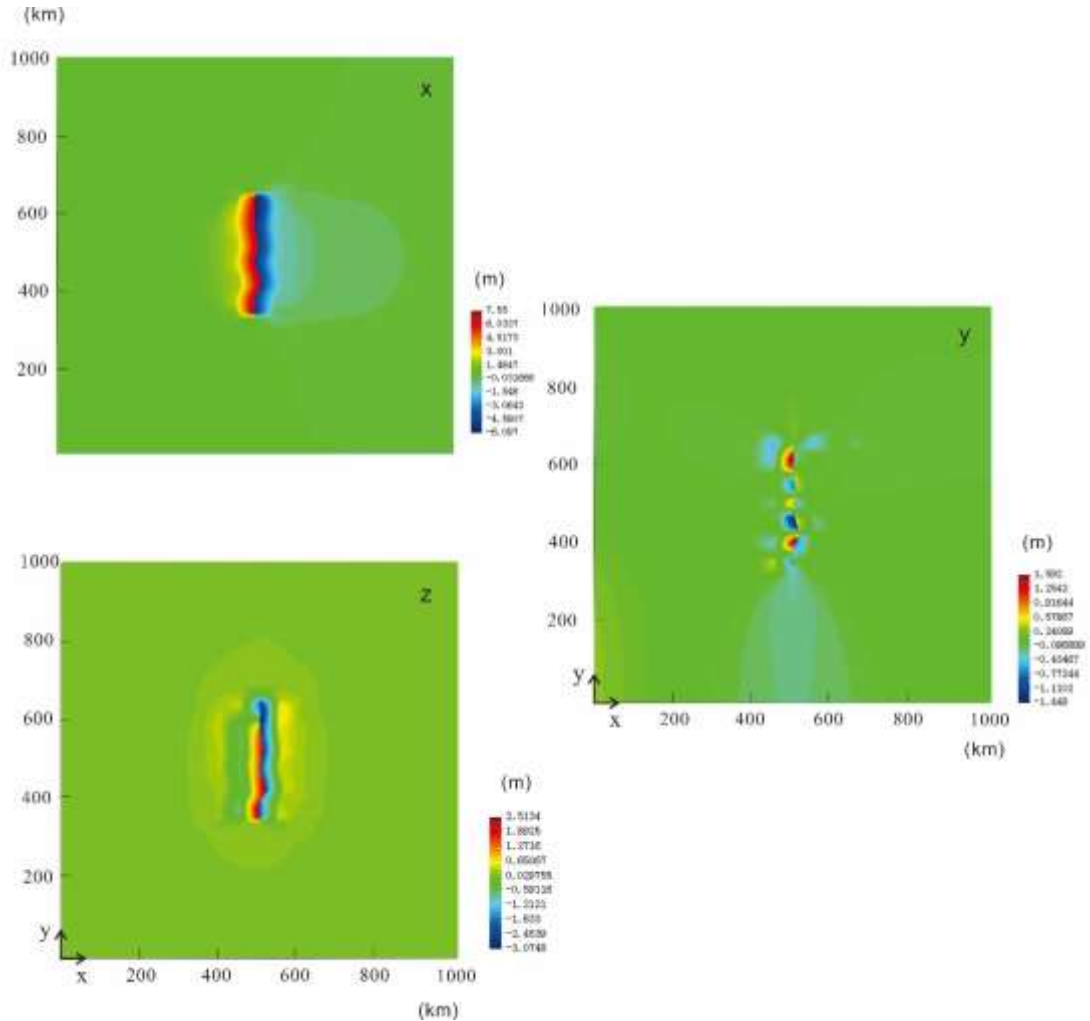


图 14 龙门山断层模型地表同震位移结果图

Fig.14 The coseismic displacement results in the surface of Longmenshan fault model

龙门山断层模型地表同震位移中，主要的同震位移集中在断层附近。x 方向同震位移达到 7.5m，出现在地表距离断层南端 20km 的断层上，且在断层拐角的地方产生同震位移较大，表明可造成更大的破坏。这样的计算结果与汶川地震中滑坡崩塌现象在断层拐点处发育较为发育的现象一致，如高川附近及青川附近（陈晓利等，2011）。模型北端出现 y 方向同震位移，即断层的走滑成份。上盘 z 方向位移为正，下盘位移为负。从计算结果中可以看出，龙门山断裂带东北段青川县附近有较大的右旋走滑同震位移分布，而此处也是滑坡集中分布的区域之一（陈晓利等，2011）。

值得指出的是，在本文的研究过程中，对龙门山断裂带模型的构建较为简单，仅仅模拟

龙门山中央断裂的作用，因此计算结果中出现了与实际位移分布不一致的情况，如整个模型包括断层北段都有较大的 x 方向同震位移，并且断层南端映秀处也出现明显的 y 方向同震位移，而实际观测中该地并没有出现走滑位移，与现实不符，这是下一步工作中需要改进的

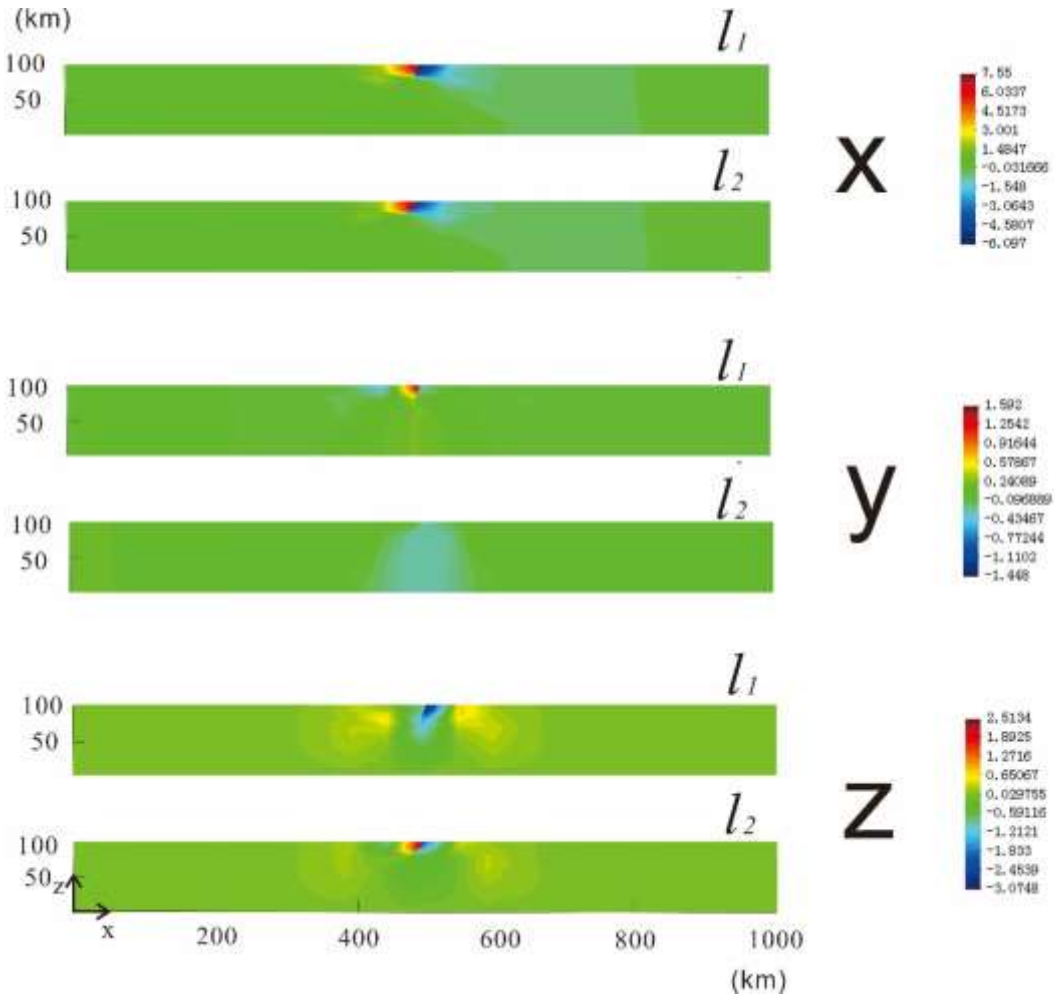


图 15 龙门山断层模型切面同震位移

Fig15. The coseismic displacement results in planes of Longmenshan fault model

图中 y 及 z 方向同震位移可以看出，断层北段有明显的走滑成份，南段为逆冲运动。同震位移主要集中在断层附近 100km 内，即边坡稳定性危险区域主要集中于断层附近 100km 范围内，与大量的汶川地震滑坡统计基本结果一致（陈晓利等，2011；黄润秋等，2008；许冲等，2010；殷跃平，2009）。同震位移结果显示有强烈的上盘效应，与汶川地震触发滑坡主要集中于断层上盘的现象是一致的。

4 问题与讨论

本文利用三维有限元新模型对三种不同断层模型下触发地震的同震位移分布进行了分析,进而解释了其与地震滑坡相关性,并将计算结果应用于汶川地震中,得到了一些有益的认识。计算结果清楚地显示,较大的同震位移集中在断层附近,其分布与地震滑坡分布基本一致。距离断层较近的区域边坡危险性较高,这与实际情况是一致的。且在正断层与逆断层地震中,滑坡分布呈现明显的上盘效应。在汶川地震滑坡的计算中,滑坡危险区域与汶川地震观测到的滑坡分布区域在尺度上一致,均为 100km 左右。

但由于模型只考虑了一条断裂,且考虑各向同性介质,材料设置过于简单,出现了一些与观测有出入的结果。且边坡稳定性还与多种因素相关,如岩性、高程、坡向、地震动峰值加速度、地貌与地震波传播时引起的边坡振动等,下一步将研究地震动加速度及地貌对滑坡分布的影响。

致谢 成文过程中与胡才博进行的有益讨论,及杨家英同学在图件整理方面辛勤劳动,在此一并表示感谢。

References

- Abrahamson N. A., Somerville P. G. Effects of the Hanging Wall and Footwall on Ground Motions Recorded during the Northridge Earthquake. *Bull. Seimol. Soc. Am.*, 86(1B):93~99
- Oglesby, D.D., R. J. Archuleta, and S.B. Nielsen (2000a). The dynamics of dip-slip faults: Explorations in two dimensions, *J. Geophys. Res.* 105, 13643~13653
- Oglesby, D. D., R. J. Archuleta, and S. B. Nielsen (2000b). The three dimensional dynamics of dipping faults, *Bull. Seimol. Soc. Am.* 90, 616~628
- Oglesby, D. D., Mai P. M. Fault geometry, rupture dynamics and ground motion from potential earthquakes on the North Anatolian Fault under the Sea of Marmara. *Geophysical Journal International*, 188(3): 1071~1087
- Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nature Geoscience*, 2009,2:718-724

附中文参考文献

- 陈晓利, 邓俭良, 冉洪流. 2011. 汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征. *地震地质*, 33 (1): 191-202
- 何宏林, 孙昭民, 王世元等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带. *地震地质*, 2008, 30 (2): 359~362
- 胡才博, 周一杰, 蔡永恩. 2009. 如何用有限元新模型研究地震触发他应力场连续演化. *中国科学.D 辑: 地球科学*: 39 (5): 546-555
- 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (12): 2585~2592
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华等. 5.12 汶川地震地表破裂基本参数的再认证及其构造内涵分析. *地球物理学报*, 2010, 53 (10): 2321-2336
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及发震构造. *地震地质*, 2008, 30 (3): 31~55
- 许冲, 徐锡伟, 于贵华, 吴熙彦. 玉树地震滑坡影响因子敏感性分析. *科技导报*, 2012, 30 (01): 18~24
- 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述. *地质评论*, 2010, 56 (6): 860~874 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析. *工程地质学报*, 2009, 17 (1): 29~38
- 张冬丽, 周正华, 陶夏新. 震源破裂方式和断层性质对近场强地震动特征的影响. *西北地震学报*, 2009, 31 (4): 311~318
- 赵永红, 杨家英, 惠红军等. 地震预测方法 I: 综述. *地球物理学进展*, 2014, 29 (1): 0129~0140