

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

张冬丽^{1,2}, 陶夏新^{1,3}, 周正华¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150083;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150083)

摘要:断层面上某一点的滑动时间函数需要用三个参数来表达: 断层的平均位错量、上升时间和破裂传播的时间延迟。本文基于有限断层模型, 根据断层面上每个子源的位错量时、空不均匀分布特征, 采用 Brune 模型系统确定了相应滑动时间函数的三个参数, 构建了位错量呈时、空不均匀分布的有限断层滑动模型。该方法可以表现破裂面上断层位错量在时间和空间上分布的不均匀特征, 既能够表现震源的复杂性同时又能够简化震源模型的构建过程, 为考虑断层附近的强地震动数值模拟计算提供了有效的途径。

关键词:位错量; 有限断层; 滑动时间函数; 震源参数

中图分类号: P315.3⁺3; P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)03-0193-06

Study on Finite Fault Model for Calculation

——Considering Slip-Time Function of Heterogeneous Displacement Distribution in Temporal and Spatial Domain

ZHANG Dong-li^{1,2}, TAO Xia-xin^{1,3}, ZHOU Zheng-hua¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin, 150083, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150083, China)

Abstract: For a point on fault, the slip-time function can be described by three parameters, the average displacement, rising time and time delay of wave propagation. In this paper, based on finite fault model, according to heterogeneous displacement distribution in temporal and spatial of the sub-source, the parameters of slip-time function are determined and the finite fault model with uniform displacements is presented. The method not only described the complexity of earthquake source but also simplified the finite fault model, which provided an effective input for numerical simulation of near-field strong ground motion.

Key words: Displacement; Finite Fault; Slip-time function; Source parameters

0 引言

在工程地震领域, 地震波输入一直是近场强地震动数值模拟、地震反应分析的重要组成部分。从震源或发震断层激发的地震波经过地壳传播到地表是一个复杂的过程。对地震波的输入有两种处理方

法: 在远场或震级相对低(一般认为 5 或 5.5 级以下)的地震, 可以将整个地震震源处理为一个点源, 此时从点源到达地面的地震波可以看作垂直入射的平面波处理; 但是, 对于大震级的浅源地震点源无法描述震源的复杂性, 地震破裂是沿着断层而传播的,

收稿日期: 2004-12-15

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA601B02-02-03); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20050049

作者简介: 张冬丽(1974—), 女(汉族), 河南叶县人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事黄土动力学及地震工程与工程抗震研究。

在近场强地震动模拟中通常将震源简化为一个破裂面,在此破裂面上断层错动量在时间和空间上呈现不均匀分布特征,它引起的地震反应是一个不均匀场。

有限断层模型较为完美地表达了断层面上位错量分布的空间不均匀性^[1-2],它可以充分考虑当场点逐渐接近震源体时,取得记录的台站只受到整个错动面距台站较近处的局部有限断层的影响,其它较远处的断层影响较小,有效降低了模拟预测的近场地震动值。在有限断层模型中,常常将震源简化为长方形破裂面,沿走向和下倾方向将发生地震的断层面划分为若干子源,每个子源赋予相应的错动量。破裂从起始点开始以一定的破裂速度呈辐射状向外传播,依次触发破裂面上的其它子源。震源的复杂性可以通过每个子源的错动模式、破裂在断层面的传播以及子源的滑动时间函数(震源时间函数)的随机性来体现。从有限断层源激发的地震波可以作为强地震动数值模拟的输入波^[3]。

1 Brune 滑动时间函数

确定震源时间函数是建立震源模型的重要工作之一。破裂面上位错的不均匀分布和破裂传播的时空不均匀性决定了震源时间函数是与子源上位错量大小、上升时间、破裂传播时间延迟相关。震源时间函数也称为滑动时间函数或滑动时程,滑动时间函数的微商为远场震源函数,是用于描述断层面上某一点的滑动历史^[4],它既是位置 X 是 t 的函数,具有位移或速度的量纲,表示断层面上滑动量或滑动率随时间和空间的变化。它们具有相同的时间历史。

平均位错量 \bar{D} 的大小和上升时间 T 是决定震源时间函数(滑动时间函数)宽度和高度的两个主要参数。不同的有限断层模型理论可以有不同的确定方式。本文以 Brune 模型^[5]描述滑动时间函数并对所涉及的参数确定作了具体的界定。

断层面上位错量的空间不均匀分布和破裂起始点可以根据近场、远场的地震反演得到。根据所有子源的位错量分布,断层面上质点的位移时程可用 Brune 模型表达

$$u(t) = u(\infty) \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T} \right) e^{-t/T} \right] \quad (1)$$

式中 $u(\infty)$ 是指 $T \rightarrow \infty$ 时断层的平均位错量,等同于 \bar{D} ; t 是地震波传播时间。

采用 Brune 远场滑动时间函数比以前研究所用

的单位数值脉冲、三角形时间函数、余弦时间函数和 erf 时间函数更符合地震发生的实际情况^[6]; 对于一个滑动时间历程,在滑动起始的时刻加速度不为零,滑动时间函数的上升和下降曲线也不是完全对称的,而是上升时间相对较短,地震应力消散的时间较长,最大滑动速率发生在较早的上升段。图 1 是归一化后余弦时间函数、erf 时间函数和 Brune 时间函数的滑动量、滑动速率的对比曲线。

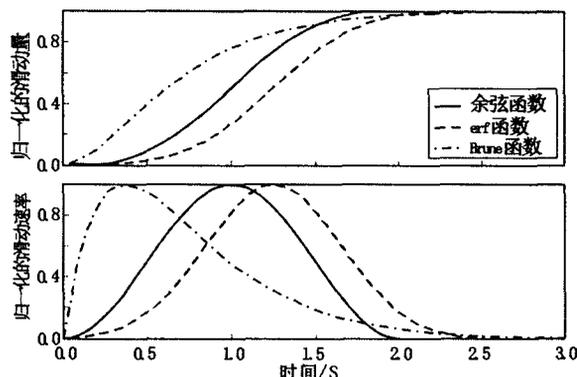


图1 三种滑动时间函数形状(据 Aagaard, 1999)

Fig. 1 The shapes of three slip-time functions (Aagaard, 1999).

2 滑动时间函数的参数确定

2.1 上升时间

上升时间的确切定义是指破裂面上某一点发生错动达到一个稳定值所经历的时间,此时应力值降到零。它直接影响着地震动的幅值:上升时间越短,地震动峰值越大。对于一个给定事件,子源滑动的上升时间是难于测量的。

基于地震破裂的随机性,断层破裂过程的均匀程度可用破裂开始位置的随机性、滑动矢量的随机性、子源上升时间的随机性表示^[7]。在一个长为 L 、宽为 W 的矩形有限断层面上,共划分 $m \times n$ 个子源,构建一个在 -1 和 $+1$ 之间不均匀分布的系列随机数 $\xi(k)$,第 (i, j) 个子源的上升时间可表达为

$$T(i, j) = \bar{T} + \xi(k) \times 0.3 \bar{T} \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$$

\bar{T} 是断层面上所有点的平均滑动时间值,可以根据上升时间与地震矩 M_0 的经验关系确定。用这种方法得到的滑动函数是一个高斯白噪声系列的随机函数。

王国新^[8]将上升时间定义为

$$\tau = \frac{\Delta L}{2V_r} \quad (3)$$

事实上,由上升时间的定义可以知道,当应力降

为一定值时,地震上升时间与破裂面上的位错分布不均匀性直接相关。这与破裂以一定的破裂速度从一个子源传到另外一个子源所经过的时间在概念上有本质的区别,换句话说,上升时间与破裂传播速度的相关性不大。假设大震断层与子震断层的几何尺寸相似,应力降相同,则当应力趋近于零时,第*(i, j)*个子源位错的理论上升时间可用介质刚度 μ 、介质的剪切速度 V_s 、子源的平均位错量 $\bar{D}(i, j)$ 和平均应力降 $\Delta\sigma$ 的相关性来表达:

$$T(i, j) = \frac{\mu \bar{D}(i, j)}{V_s \Delta\sigma} \quad (4)$$

2.2 破裂传播的时间延迟

破裂在断层面上的传播模式的假设主要有两种,随机破裂模式和方向性破裂模式。随机破裂模式强调了子源破裂位置的随机性和子源破裂半径的随机性,破裂位置和半径不同的子源具有相同的应力降和破裂速度,它们以圆盘形破裂面向周围传播并在地面叠加成地震图。但更多的研究将地震破裂在断层面上的传播设为单侧破裂、双侧破裂、或在有限断层面上沿一定方向的破裂模式,如圆盘形破裂面、矩形走滑性断层、矩形倾滑性断层等。

对于矩形有限断层,给出破裂开始的子源(i_0, j_0),则其它子源开始破裂的时间延迟 $delt(i, j)$ 可由下式计算

$$delt(i, j) =$$

$$\frac{\sqrt{(L_s \times (i - i_0))^2 + (W_s \times (j - j_0))^2}}{V_R} \quad (5)$$

破裂起始点的位置和破裂速度 V_R 可以根据经验关系估计,如破裂速度一般取剪切波速的 80%~85%。

2.3 归一化的滑动时间函数

确定了地震上升时间和破裂时间延迟,根据断层面上位错量的分布特征,就可以确定滑动时间函数和滑动速率时间函数。对式(1)求导得出滑动速率时间函数

$$u(t) = u(\infty) \left(\frac{t}{T} \right)^2 e^{-t/T} \quad (6)$$

上式描述破裂面上质点的速度,它控制了地震能量的释放模式,与地震动时程包络的波形接近,可作为基本的震源时间函数去控制子源的辐射速度。在离散域内,归一化后的震源时间函数可写为

$$so(i, j, it) = \left(\frac{it \times \Delta t - delt(i, j)}{T(i, j)^2} \right) e^{-(it \times \Delta t - delt(i, j))/T(i, j)} \quad (7)$$

$it=1, 2, \dots, nt, nt$ 为计算循环中的总的时间数。上

式可简写为

$$sum = \sum_{it=1}^{nt} so(i, j, it) \quad (8)$$

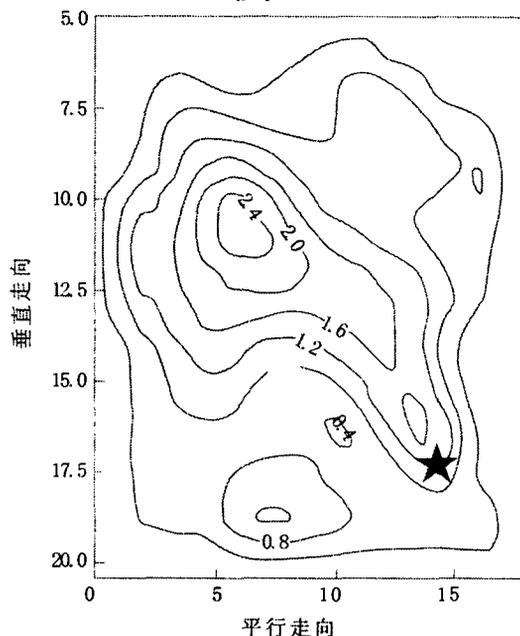


图 2 断层错动等值线图(据 Wald, 1996)

Fig. 2 The contour of dislocations on the fault.

表 1 北岭地震断层子源的滑动时间函数参数

子源编号 /i, j	平均滑动量 /cm	上升时间 /t	破裂时间延迟 /t
1,1	40	0.812 549	5.396 045
1,2	60	1.218 824	4.769 476
1,3	40	0.812 549	4.265 948
1,4	80	1.625 098	3.933 01
1,5	80	1.625 098	3.815 58
1,6	40	0.812 549	3.933 01
2,1	100	2.031 373	4.769 476
2,2	240	4.875 294	4.047 034
2,3	240	4.875 294	3.439 318
2,4	100	2.031 373	3.016 481
2,5	100	2.031 373	2.861 685
2,6	40	0.812 549	3.016 481
3,1	120	2.437 647	4.265 948
3,2	240	4.875 294	3.439 318
3,3	240	4.875 294	2.698 023
3,4	160	3.250 196	2.132 974
3,5	120	2.437 647	1.907 79
3,6	40	0.812 549	2.132 974
4,1	40	0.812 549	3.933 01
4,2	100	2.031 373	3.016 481
4,3	80	1.625 098	2.132 974
4,4	100	2.031 373	1.349 011
4,5	160	3.250 196	0.953 895
4,6	60	1.218 824	1.349 011
5,1	40	0.812 549	3.815 58
5,2	60	1.218 824	2.861 685
5,3	80	1.625 098	1.907 79
5,4	80	1.625 098	0.953 895
5,5	80	1.625 098	0
5,6	40	0.812 549	0.953 895

注:i为沿断层下倾方向的序号,i=1,5;j为沿断层的走向的序号,j=1,6.

籍此,所有的震源时间函数的参数确定之后,对应于每个子源不同位错量分布的震源时间函数的形状也可准确表达出来。

3 数值试验:无限均匀介质的位移场

本文以 1994 年 1 月 17 日发生于美国西部北岭地区的 M_w 6.7 地震的震源参数为例,计算了在无限均匀介质内,断层的不均匀错动在地下 4 km 深度引起的位移反应的解析解,其有效性和可靠性在与数值解的比较中已得到了论证^[3]。通过部分点的结果可以直接观察到此位移场的不均匀特征。

有限断层源引起的位移场,是所有子源引起的三阶格林函数和于源滑动时间函数在一定深度和范围内的卷积按适当的时间延迟进行叠加。位移场的解析解可以用下式表达:

$$U_n = M_{pq} G_{np,q} \quad n, p, q = 1, 2, 3 \quad (9)$$

M_{pq} 为三维与位错量有关的地震矩张量; $G_{np,q}$ 为格林函数。

计算模型的大小沿断层走向、倾向为 30 000 m × 60 000 m, $V_s = 3\ 600$ m/s, 密度为 2 800 kg/m³。积分时步长取 0.02 s, 计算持时 40 s, 模拟的长周期可以达到 5 s。

3.1 1994 年北岭地震断层的滑动时间函数

1994 年 1 月 17 日发生的美国北岭地震产生了很大的地震动,地震带来的破坏是历史地震中前所未有的。震中位于 34°12.80'N, 118°32.22'W, 震源深度约 18.4 km。发震断层属于典型的逆冲断层,顶面埋深 5 km, 断层走向 122°, 倾角 40°, 向南西方向倾斜, 滑动角为 101°, 平均滑动量为 1.3 m, 而最大滑动量可达到 3 m 左右。地震矩为 $1.3 + 0.2 \times 10^{26}$ dyne-cm, 平均应力降为 74 bar。断层的长 × 宽为 18 km × 15 km。Wald^[9] 通过强地面运动、远震记录、大地测量等方法综合确定了北岭地震断层面上的位错量的分布(图 2)。遵循所有子源的地震矩之和与断层面上总的地震矩相等的原则及子源长度与震级的关系, 可将断层沿长、宽方向离散为 6 × 5 共 30 个子源, 子源的尺度平均为 3 km, 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, 断层破裂从第(5,5)个子源开始。由本文的震源时间函数模型, 可以确定出相应于位错量大小的子源破裂的上升时间和破裂时间延迟(表 1)以及每个子源破裂滑动时间函数和滑动速率时间函数的图形

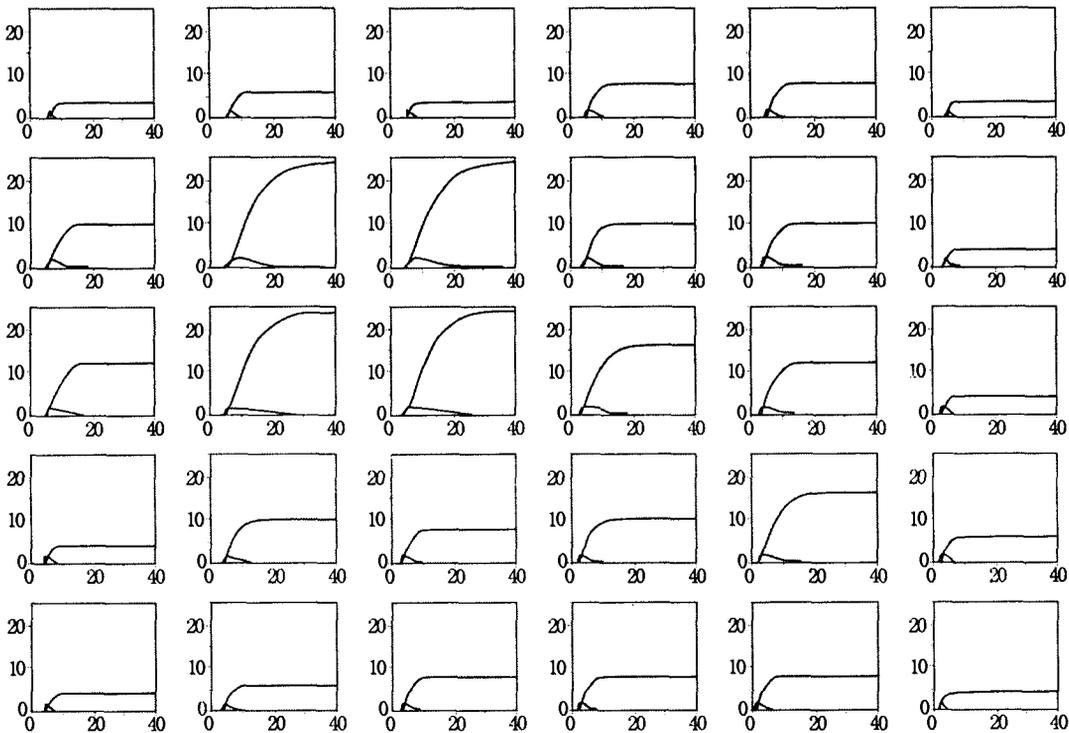


图 3 Northridge 地震 30 个子源的滑动时间函数(实线)和滑动速率时间函数(虚线)

(横轴为时间轴,纵轴为滑动量或滑动速度,相应单位为 s,m,m/s)

Fig. 3 The slip-time functions (solid line) and slip velocity-time functions (dashed) of 30 sub-sources in Northridge earthquake. In the figure, the horizontal axis is time (/s) and the vertical axis is slip (/m) or slip velocity (m/s).

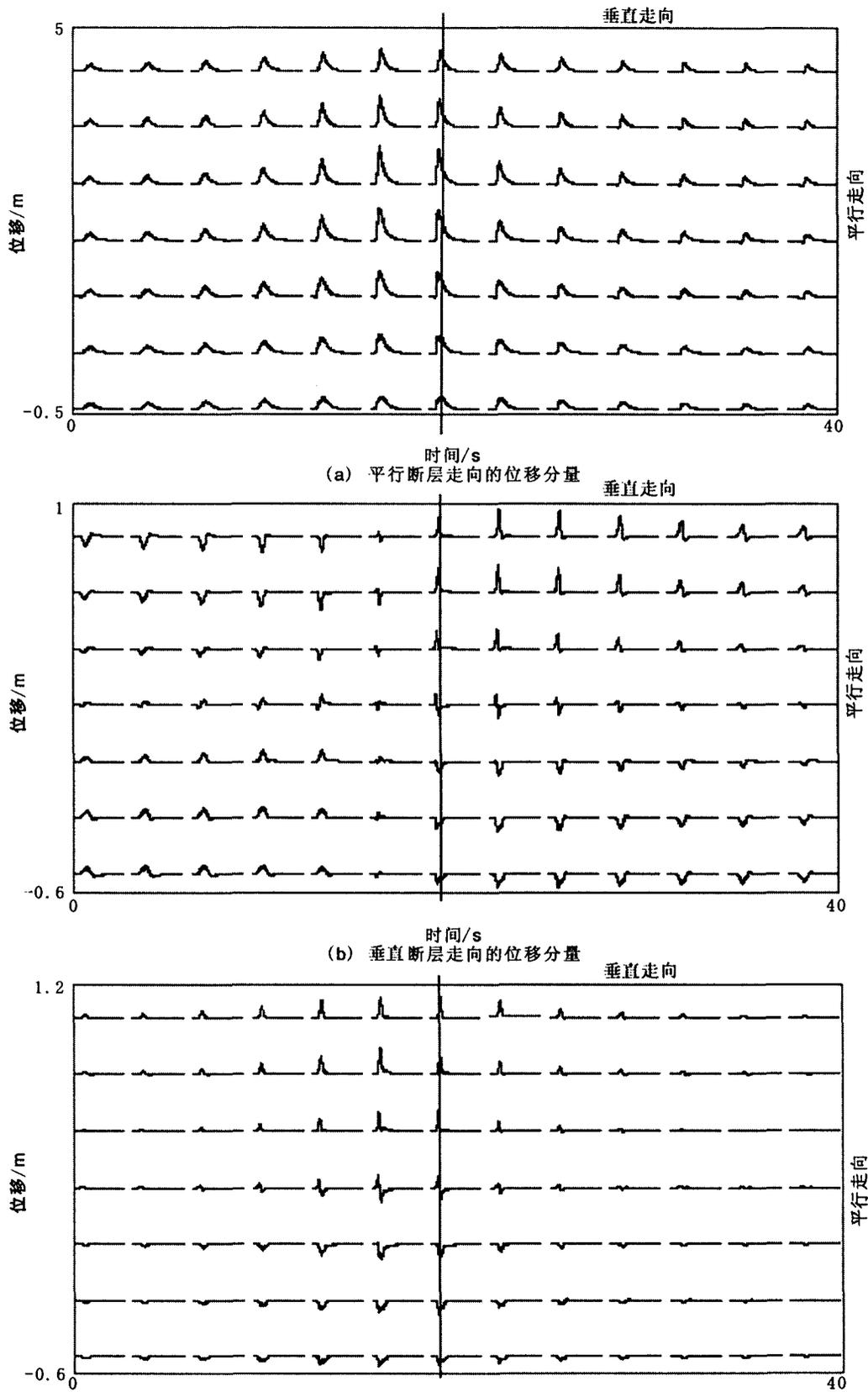


图 4 覆盖层底面 91 个点的三分量位移时程

Fig. 4 Three displacement components of 91 points on the overlays bottom.

表达(图 3)。由图 3 可以看出,最大滑动速率在整个断层面上相同,可以达到 20 cm/s,断层子源相对于破裂起始点有不同的时间延迟,但随着上升时间和位错量的增大或减小,滑动速率时间函数的宽度也随之增大或减小。

3.2 解析解位移场

图 4 展示了用解析方法得到的 30 个子源在覆盖层底面 91 个点上引起的三分向位移时程。以断层上缘在水平面上的投影为对称轴,如图中竖向直线所示,采样点间距为 6 km,沿垂直断层走向和平行断层走向共选取 13×7 共 91 个点。图中直线左侧为上盘,右侧为下盘,横向排列的是垂直断层走向观测点的位移时程,竖向排列的是平行断层走向观测点的位移时程,第七列代表断层迹线上观测点的位移时程。图中充分表达了整个面上位移时程强度空间分布的不均匀性,同时也可以表达出地震波的到时差:距断层水平距离相等的点,位于断层上盘的比位于下盘的到时早,平行断层走向分量和竖向分量的位移幅值也较后者大;平行断层走向的位移分量均为朝向断层破裂传播方向的单项脉冲,垂直断层走向的位移分量和竖向位移分量为双向脉冲,且位于破裂前方的点的位移脉冲方向与破裂后方的相反。

4 结论

本文采用 Brune 模型,系统确定了滑动时间函数的相关参数,构建了位错量呈时、空不均匀分布的有限断层滑动模型。并参考 1994 年北岭地震的震源参数,用解析方法计算了一定深度范围内的位移场,分析了位移的三个方向分量在空间和强度上的

分布特征。该有限断层计算模型可以作为一种有效的震源输入模型,广泛用于近场的强地震动数值模拟。

[参考文献]

- [1] Somerville P, K Irikula, R Grave, et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motions[J]. *Seism. Res. Lett.*, 1999, 70(1): 59-80.
- [2] Haiyun Wang, Xiaxin Tao. Relationship between moment magnitude and fault parameters: theoretical and semi-empirical relationships[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 2(2): 201-211.
- [3] 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.
- [4] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology Theory and Methods*, Vols. 1, 2[M]. San Francisco Freeman: 1980. 1-932.
- [5] Brune. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *Journal Geophysical Research*, 1970, 75(26), 4997-5009.
- [6] Brad T, Aagaard. *Finite-Element Simulation of Earthquake*. In Partial fulfillment of requirements of the degree of philosophy, 2000. California Institute of Technology, Pasadena, California.
- [7] Wang G Q, Boors 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.
- [8] 王国新. 强地震动衰减研究[D]. 中国地震局工程力学研究所, 2000.
- [9] 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.