

动态库仑破裂应力变化的模拟计算及断层类型影响研究^{*}

虎雄林^{1,2}, 吴小平¹, 崔建文², 卢吉高², 李正光²

(1. 云南大学 地球物理系, 昆明 650094; 2. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 对走滑断层、逆断层破裂产生的动态库仑破裂应力变化进行了模拟计算, 得到了动态库仑破裂应力变化的空间分布图像。分析结果显示, 不同类型断层破裂所产生的动态库仑破裂应力变化, 其分布图像有很大区别。

关键词: 离散波数法; 地震断层; 动态库仑破裂应力变化

中图分类号: P315.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)03-0250-05

0 引言

地震产生的应力变化对后续地震具有触发作用已被不少观测研究证明 (Steph 1999)。1992 年美国 Landers 地震发生后, 地震应力触发问题成了国际地震学界的研究热点之一, 研究分为静态应力触发和动态应力触发两类。前者研究的是地震的断层位错在附近产生的静态应力变化对后续地震的触发作用 (Pernikow 等, 2004; Sebastian 等, 2004; Wang 等, 2001; King 等, 1994, 2001; Harris 等, 1992, 1995); 后者研究的是地震破裂扩展与地震波通过时产生的动态应力变化对后续地震的触发作用 (Tibi 等, 2003; Andrea 等, 2002; Belardinelli 等, 2003; Gombert 1997, 2001; Brodsky 等, 2000; Anderson 等, 1994; Kib 等, 2000; Tong 2005)。国内对地震的静态应力触发也有不少研究 (邱泽华等, 2003; 石耀霖, 2001; 沈正康等, 2003; 万永革等, 2002; 刘桂萍等, 2002), 但动态应力触发方面的研究尚未开展。由于不像静态库仑破裂应力变化的计算那样有现成的、统一的计算程序可循, 动态库仑破裂应力变化的计算问题给动态应力触发研究带来了一定困难, 使得国内目前这方面的研究受到阻碍。

由 Bouchon (2003) 发展的离散波数法 (DWN) 在许多弹性动力学计算问题中由于能够精确地求解出完全格林函数而得到广泛的应用。离散波数法的一个重要特点是可以计算全波场, 包

括动态和静态的贡献。笔者采用 DWN 法首先计算了地震破裂在周围介质中产生的位移时程, 然后通过弹性动力学转换求得应力时程, 最后计算得到动态库仑破裂应力变化, 并对不同类型地震断层产生的动态库仑破裂应力变化的空间分布进行了研究。

1 原理与方法

1.1 DWN 法原理

DWN 法的原理在 Bouchon (2003) 的研究中有详细描述。它首先用复合源问题代替单一源问题。任何类型的弹性震源都可以用一组点源的组合来代替。地震学中的点源通常用它的矩张量 m_{ij} 表示, 其中 m_{xx} , m_{yy} , m_{zz} 为沿笛卡尔坐标轴方向的三个力偶极子, $m_{xy} = m_{yx}$, $m_{xz} = m_{zx}$, $m_{yz} = m_{zy}$, 均为双力偶。

设有一剪切断层, 用 (ξ, ξ, ξ_z) 表示沿断层滑动方向的单位矢量, 用 (η, η, η_z) 表示断层面法线方向单位矢量, 相应的矩张量分量为

$$m_{ij} = -\mu \text{slip}(\omega) \Delta S (\xi_i \eta_j + \xi_j \eta_i), \quad (1)$$

其中, μ 是刚度, ΔS 是发生剪切滑动的断层面的面积元, $\text{slip}(\omega)$ 是滑动矢量。将地震断层面离散成小面元上位错点源组成的二维阵列, 在频率一波数域内对所有点源的贡献进行求和, 最后将在频率域中解决的复合源问题恢复到单一源问题。

* 收稿日期: 2007-07-15.

基金项目: 云南省中青年学术技术带头人后备人才培养计划 (2004PY01-26) 和国家地震局地震联合基金 (605014) 联合资助.

1.2 计算模型

图 1 a)为 (1°×1°) 计算范围, 其中小方格表示接收点即场点, 共 (11×11) 个; S₁、S₂、S₃、S₄表示研究区域内不同方向上的接收点; 中间箭头代表地震断层的位置和走向。本文选取双侧破裂矩形断层模型, 根据上述原理, 将震源断层面分离成 (17×6) 个双力偶点源组合, 其中小圆圈表示点源 (图 1 b)。建立的地壳速度分布模型如表 1 所示。

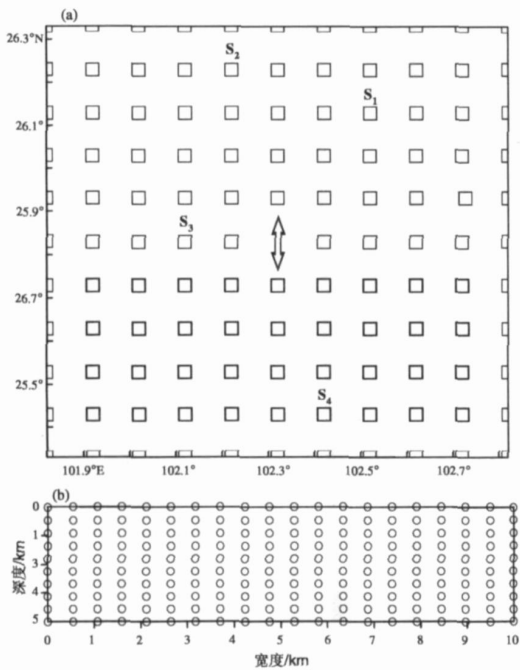


图 1 模拟计算的研究区域 (a) 及断层模型 (b)

表 1 介质波速模型

分层序号	层厚 / km	VP / km·s ⁻¹	VS / km·s ⁻¹
1	2	4.30	2.50
2	16	5.98	3.50
3	12	6.26	3.60
4	8.5	6.88	4.00
5	∞	8.0	4.70

1.3 动态库仑破裂应力的计算

首先用 DWN与反射率法合成位移理论地震图计算程序, 计算地震断层破裂在附近介质中某点及其邻近 3 个点处产生的地震波位移 $u_i(\vec{x}, t)$, 然后应用差分法原理由位移计算出该点的应变分量, 再采用虎克定律将应变转换成应力张量, 可得到

地震断层破裂在该点产生的动态应力变化分量 $\Delta\sigma_{ij}(\vec{x}, t)$ 。

设接收点假想断层面的法向单位矢量为 $\vec{n}(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$, 滑动方向单位矢量为 $\vec{s}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$, 由柯西公式可得接收点断层面上的动态应力变化矢量:

$$\Delta T_i(\vec{x}, t) = \Delta\sigma_{ij}(\vec{x}, t) \eta_j$$
 (2)

将应力矢量分别投影到接收点断层面的法线方向和滑动方向上, 可得到正应力变化和切应力变化

$$\Delta\sigma(\vec{x}, t) = \Delta\sigma_{ij}(\vec{x}, t) \eta_j \eta_i$$
 (3)

和切应力变化

$$\Delta\tau(\vec{x}, t) = \Delta\sigma_{ij}(\vec{x}, t) \eta_j \xi_i$$
 (4)

根据定义 (万永革等, 2002), 可得到动态库仑破裂应力变化

$$\Delta CFS(\vec{x}, t) = \Delta\tau(\vec{x}, t) + \mu' \Delta\sigma(\vec{x}, t)$$
 (5)

其中, μ' 为接收点断层面处介质的视摩擦系数, 一般取 0.4~0.6 本文取 $\mu'=0.5$ 下文中用符号 $\Delta CFS(t)$ 表示完全库仑破裂应力变化时程。

2 不同类型断层产生的动态库仑破裂应力变化空间分布

2.1 走滑断层产生的动态库仑破裂应力变化及空间分布图像

设断层为走向正北、直立的双侧破裂走滑断层。通过上述计算步骤得到了走滑断层产生的动态库仑破裂应力变化及空间分布图像 (图 2、3)。

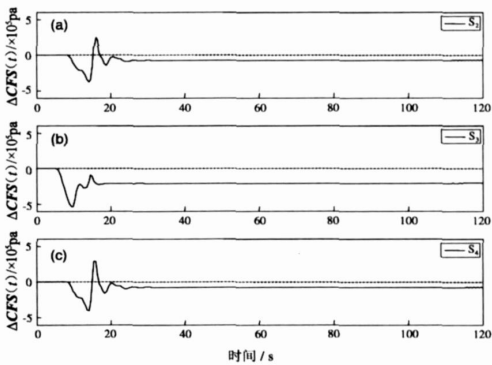


图 2 走滑断层在接收点 S₂ (a)、S₃ (b)、S₄ (c) 处产生的动态库仑破裂应力变化 ΔCFS 时程

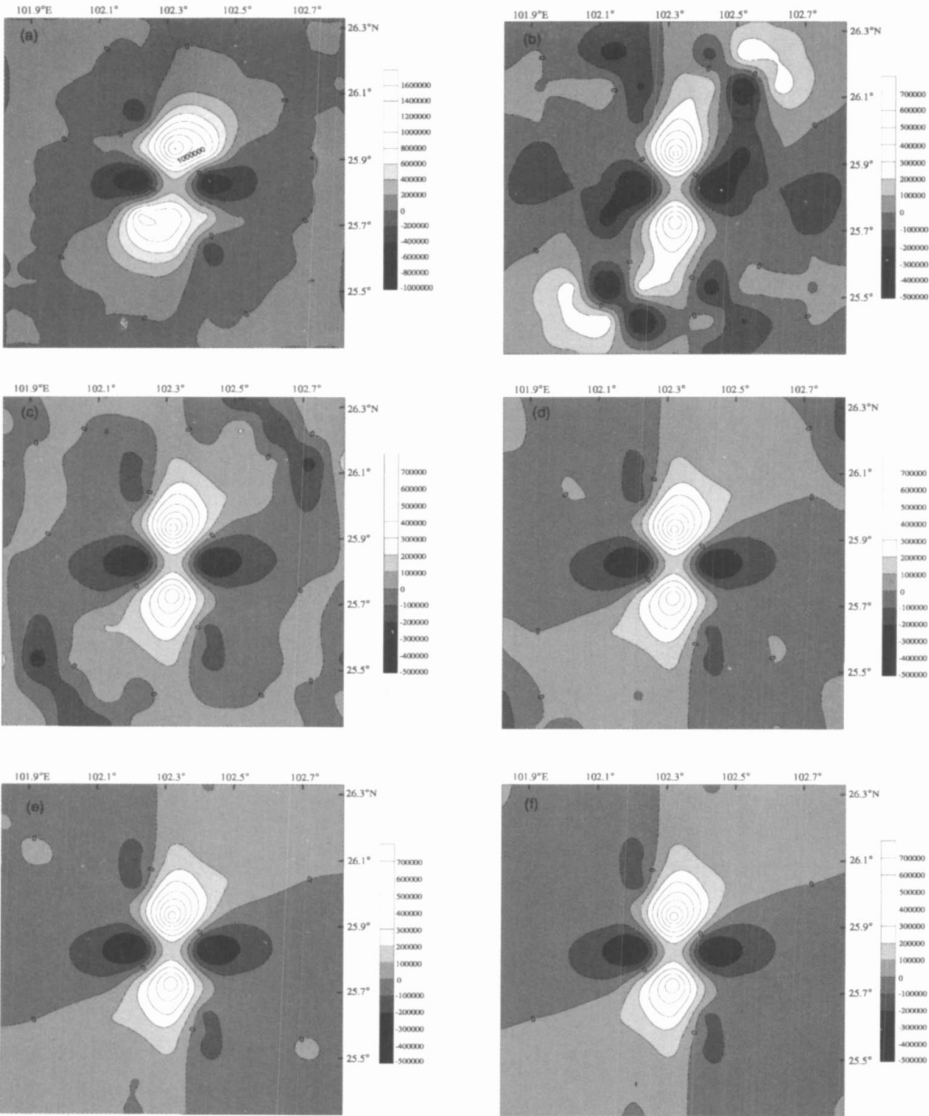


图 3 走滑断层产生的动态库仑破裂应力变化 ΔCFS 在不同时刻的空间分布
(a) $t=8.0\text{ s}$; (b) $t=15.06\text{ s}$; (c) $t=20.24\text{ s}$; (d) $t=25.41\text{ s}$; (e) $t=30.12\text{ s}$; (f) $t=35.29\text{ s}$

2.2 倾滑断层产生的动态库仑破裂应力变化及空间分布图像

设断层为走向正北、倾角 30° 的两侧破裂逆冲断层。通过上述计算步骤得到了逆冲断层产生的动态库仑破裂应力变化及空间分布图像 (图 4、5)。

3 讨论和结论

从走滑断层和倾滑断层产生的动态库仑破裂应力时程曲线 (图 2、4) 可以看到, 在由明显起伏和相对稳定的两部分所组成的库仑破裂应力时程中, 起伏部分幅值大但持续时间短; 动态库仑

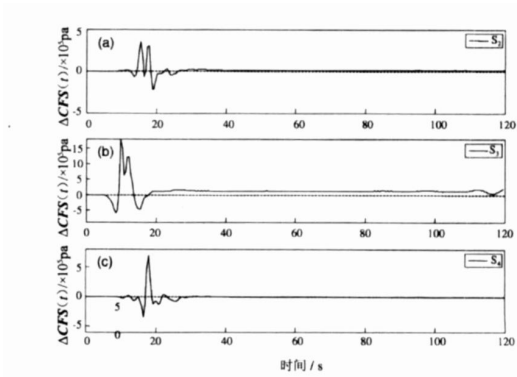


图 4 逆冲断层在接收点 S_2 (a)、 S_3 (b)、 S_4 (c) 处产生的动态库仑破裂应力变化 ΔCFS 时程

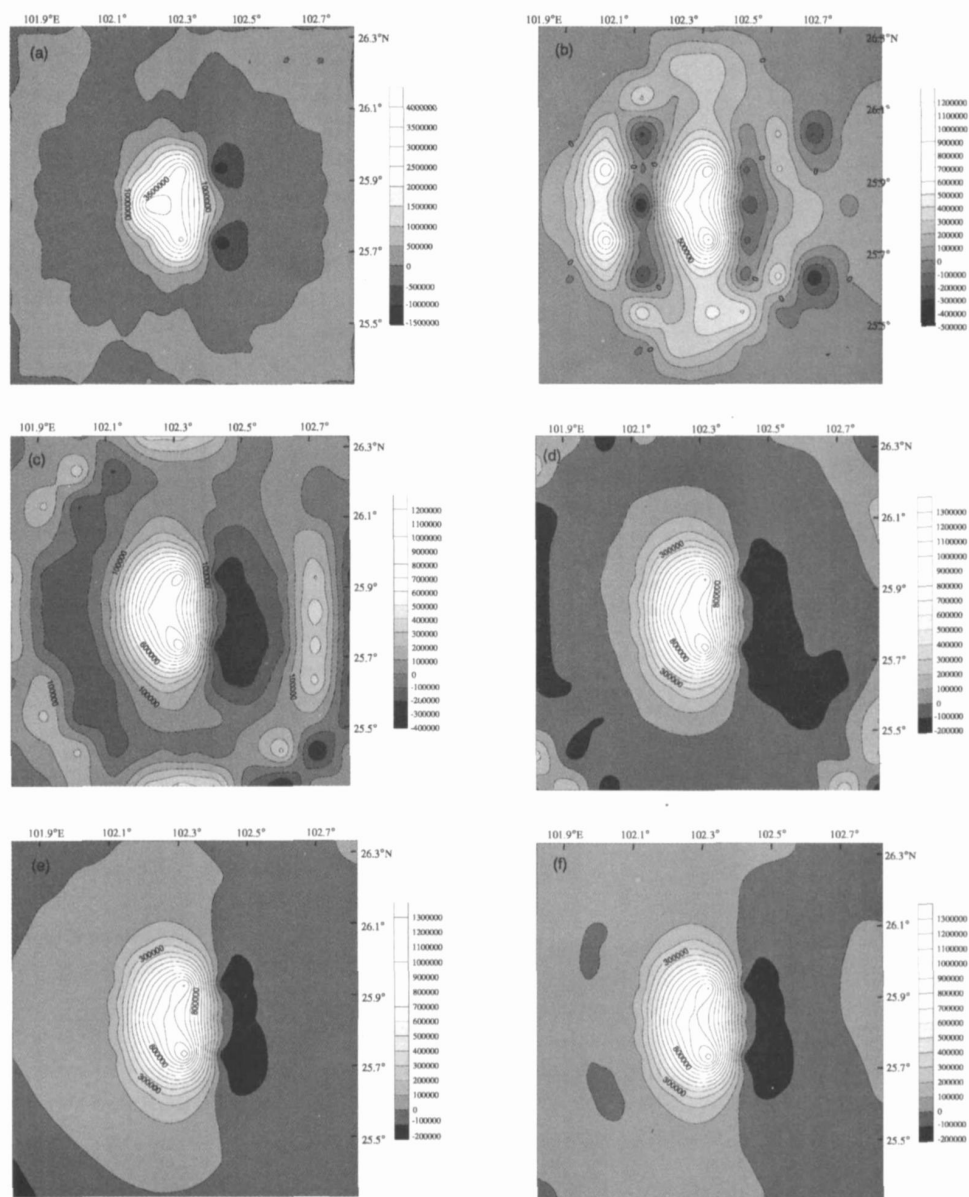


图 5 逆冲断层产生的动态库仑破裂应力变化 ΔCFS 在不同时刻的空间分布
(a) $t=8.0\text{ s}$; (b) $t=15.06\text{ s}$; (c) $t=20.24\text{ s}$; (d) $t=25.41\text{ s}$; (e) $t=30.12\text{ s}$; (f) $t=35.29\text{ s}$

破裂应力在时间 30 s 左右进入相对稳定状态, 稳定阶段的幅值小但持续时间长。

从图 3 可以看到, 走向正北的直立走滑断层产生的动态库仑破裂应力变化在不同时刻的空间分布图像均具有较好的对称性。图中显示, 动态库仑破裂应力变化的正值区域 (浅色区域) 基本分布在断层破裂扩展的前方, 正值的库仑破裂应力变化略大于负值的库仑破裂应力变化。随着时间的增加, 动态库仑破裂应力扰动由震源向四周传播, 辐射图案和强度均从 30 s 后趋于稳定, 这表明动态库仑破裂应力变化经过瞬态传播阶段逐渐转变成稳定场。

从图 5 可以看到, 走向正北、倾角 30° 的逆冲断层产生的动态库仑破裂应力变化的空间分布图像完全不同于走滑断层, 其库仑破裂应力变化正值区域 (浅色区域) 分布在断层的左侧, 负值区域 (深色区域) 分布在断层的右侧, 正值的库仑破裂应力变化大于负值的库仑破裂应力变化。随着时间的增加, 动态库仑破裂应力扰动由震源向四周传播, 辐射图案和强度也是从约 30 s 后趋于稳定。

由离散波数与反射率法得到的以地震波位移为基础的库仑破裂应力变化的计算, 不仅可以得到动态库仑破裂应力变化, 同时还可以得到稳态

(静态)库仑破裂应力变化,这不仅解决了动态库仑破裂应力变化的计算问题,也为以后的动态应力触发和静态应力触发两者结合的研究开辟了一条途径。

参考文献:

刘桂萍,傅征祥. 2002. 1973年炉霍大地震 ($M_s=7.6$) 最大余震 ($M_s=6.3$) 的库仑破裂应力触发 [J]. 中国地震, 18 (2): 175—182.

邱泽华,石耀霖. 2003. 地震造成远距离应力阶变的观测实例 [J]. 中国科学, 33 (增刊), 60—64.

沈正康,万永革,甘卫军,等. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究 [J]. 地球物理学报, 46 (6): 786—795.

石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考 [J]. 地震, 21 (3): 1—7.

万永革,吴忠良,周公威,等. 2002. 地震应力触发研究 [J]. 地震学报, 24 (5): 533—551.

Anderson J G, Brune J N, Louie J N et al. 1994. Seismicity in the western Great Basin apparently triggered by the Landers, California earthquake 28 June 1992 [J]. BSSA, 84: 863—891.

Andrea A M, Cocco D S et al. 2002. Dynamic Stress Triggering During the Great 25 March 1998 Antarctic Plate Earthquake [J]. BSSA, 92: 896—903.

Belardinelli M E, Bizzarri A, Cocco M. 2003. Earthquake triggering by static and dynamic stress changes [J]. JGR, 108 (B3): 2135.

Bouchon M. 2003. A Review of the Discrete Wavenumber Method [J]. Pure Appl Geophys, 160: 445—465.

Brodsky E E, Karakostas V, Kanamori H. 2000. A new observation of dynamically triggered regional seismicity: Earthquake in Greece following the August 1999 M7.4 Turkey earthquake [J]. Geophys Res Lett, 27: 2741—2744.

Gomberg J, Benjapet M L, Beeler N M. 1997. Transient triggering of

near and distant earthquakes [J]. BSSA, 87: 294—309.

Gomberg J, Reasenberg P A, Bodin P et al. 2001. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes [J]. Nature, 411: 462—466.

Harris R A, Simpson R W, Reasenberg P A. 1995. Influence of static stress changes on earthquake location in southern California [J]. Nature, 375: 221—224.

Harris R A, Simpson R W. 1992. Changes in static stress changes on southern California faults after the 1992 Landers earthquake [J]. Nature, 360: 251—254.

Kilb D, Gomberg J, Bodin P. 2000. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses [J]. Nature, 408: 570—574.

King G C P, Cocco M. 2001. Fault interaction by elastic stress changes: new clues from earthquake sequences [J]. Adv Geophys, 44: 1—38.

King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. BSSA, 84: 935—953.

Parsons T. 2005. A hypothesis for delayed dynamic earthquake triggering [J]. Geophysical Research Letters, 32: 104302.

Pernola B, Bressan G, Pondrelli S. 2004. Changes in failure stress and stress transfer during the 1976—77 Friuli earthquake sequence [J]. Geophys J Int, 156 (2): 297—306.

Sebastian H. 2004. Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering [J]. Geophys J Int, 159 (3): 1090—1096.

Stein R S. 1999. Stress transfer in earthquake occurrence [J]. Nature, 403: 605—609.

Tibi R, Wlens D A, Houe H. 2003. Remote triggering of deep earthquakes in the 2002 Tonga sequences [J]. Nature, 424: 921—925.

Wang W H, Chen C H. 2001. Static stress transferred by the 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake effects on the stability of the surrounding fault systems and aftershock triggering with a 3D fault slip model [J]. BSSA, 91: 1041—1052.

Numerical Simulation of Dynamic Coulomb Rupture Stress Changes Induced by Earthquake Fault and Its Relationship with Pattern of Fault

HU Xiong-lin², WU Xiao-ping², CUI Jian-wen², LU Ji-gao², LI Zheng-guang¹
(1. Department of Geophysics, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)
(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Through calculating the dynamic Coulomb rupture stress changes caused by strike-slip fault and reversed fault we obtained the space distribution image of dynamic Coulomb rupture stress changes. The analytical result indicates that the distribution image of dynamic Coulomb rupture stress change produced by different types of faults is very different.

Key words: discrete wavenumber method, earthquake fault, dynamic Coulomb rupture stress change

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net