

应用边界单元法研究活动断裂的分段性^{*}

——鲜水河断裂带实例分析

张超 陈连旺 赵国光 贺群禄

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

摘 要

根据鲜水河断裂带构造几何和运动学特征及地貌的新近考查研究结果,应用边界单元法分析了该断裂带某些断层和特征地貌的成因机制,并讨论了该断裂的分段性及相应的地震破裂分布特征. 主要结论为:作为一级分段,鲜水河断裂可分为3段:(1)西北的炉霍—乾宁段;(2)中部的破裂连结区;(3)南东的康定段. 各段之间不仅存在几何和构造上的差异,其力学性质和动力学特征也有所不同. 该断裂带的某些特征地貌反映了断层长期运动积累的形变效应,并显示了断裂带在不同级次上的分段性. 这种地貌在一定程度上控制着地震破裂的发育与分布.

关键词 边界单元法; 断层分段性; 鲜水河断裂带; 特征地貌

1 引 言

地质和测地资料以及相关研究结果表明,活动断裂不同段落之间,既可能存在有几何和结构差异,还可能显示出不同的运动学和动力学特征. 这几方面的差异共同影响着断裂带不同部位的稳定性,并在一定程度上控制着该地区地震的时、空、强度分布. 因而近年来,活动断裂分段性研究已经成为地震预测、潜在震源判定和工程地震危险性评估的一个重要课题.

鲜水河断裂是我国西南地区主要活动构造带之一. 其地震活动具有很高的频度和强度. 因而受到国内外学者的广泛关注. 近年来,Allen 等(1991)根据地质考查、地震活动性分析和地面破裂分布,研究了该断裂带的分段性,他们把鲜水河断裂划分为两段(一级分段):西北的炉霍—乾宁段和南东的康定段(包括色拉哈断层). 本文则参照该断裂新近的地质考查分析结果(Zhao *et al.*, 1992),应用边界单元模型数值分析了鲜水河断裂带断层几何展布、滑动方式、近场应力和位移之间的关系;在此基础上,讨论了该断裂带某些特征地貌的成因和断层分段性及其对地震破裂展布和发育的影响.

^{*} 本研究由国家自然科学基金项目和国家地震局“八五”重点项目共同资助.
1992年11月30日收到初稿,1993年5月14日决定采用.

2 典型构造的边界单元模型

自 60 年代起,许多学者即应用位错理论分析断层运动学和动力学以及构造变形的有关问题.位错理论可以给出断层运动伴生的应力、应变场的解析解,因而为有关问题的定量分析和反演提供了便利.但由于断层位错模型把活动断层的滑动作为唯一的动力源而不考虑构造块体外边界的力学条件,因而它一般适用于地震震时和震前、震后短时间尺度内的模拟研究.其原因在于,在这种时间段内,地震断层力学状态的改变明显大于远边界力学状态的变化.对于必须考虑构造块体外边界作用的问题,如长时期、大范围的构造应力应变场分析,边界单元模型则更为适用.

边界单元法是一种数值分析方法.该方法与广泛应用于构造力学和工程问题分析的有限单元法相比,具有数学上的优越性.即由于边界单元法把所考察区域的控制微分方程经格林公式变换为区域边界上的积分方程,这就降低了模型的维数,从而大大提高了运算效率并精简了数据的输入量.此外,边界单元模型便于综合考虑外边界力学状态和内部复杂形态断层上的非均匀滑动,因而,对于复杂的构造地质问题分析具有明显的应用价值.

近来,Bilham 和 King(1989)应用 Crouch 和 Starfield (1983)的边界元程序模拟了圣安德列斯断裂的地貌,其中计算了均匀矩形滑动分布的断错(Fault offset,即两条平行非共线的断层)和断层拐点的应变场.本文则参照鲜水河断裂带的几何形态和滑动分布,采用并修改 Brebbia (1978)的边界单元程序,计算了三种非均匀滑动的边界单元模型:Ⅰ.包含大尺度非破裂区的非平行段模型(Non-Parallel segments with a large unfractured region in between);Ⅱ.非平行段膨胀断层节模型(Dilatational fault jog with non-parallel segments);Ⅲ.弯折断层模型(Fault bend).

模型Ⅰ如图 1 所示.在模型上下边界上作用着均匀反对称分布的切向位移,它们与构造块体整体的左旋性畸变相对应.两条断层的交角为 15° .其左旋滑动量呈椭圆分布.左方断层滑幅为右方断层的 1.3 倍.模型几何参数和边界条件的数学表达式为

$$a : b : a_m : b_m : a_n : b_{n1} : b_{n2} : U_a : U_b : U_m : U_n \\ = 22 : 20 : 5 : 10 : 14.5 : 9 : 11 : 0.15 : -0.15 : 0.13 : 0.1 \quad (1)$$

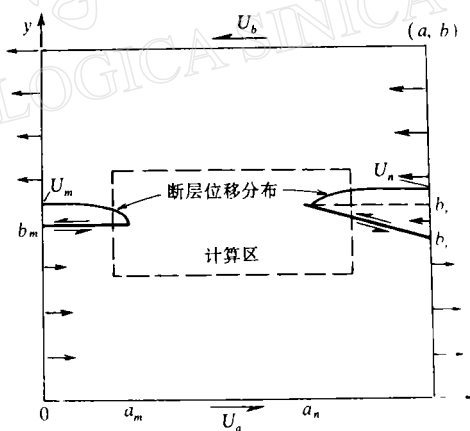


图 1 包含大尺度非破裂区的非平行断层边界单元模型

$$\left. \begin{aligned}
 & a > x > 0 \quad y = 0: & u_x &= U_z & u_y &= 0 \\
 & a > x > 0 \quad y = b: & u_x &= U_b & u_y &= 0 \\
 & a_m > x > 0 \quad y = b_m \pm "0": & u_x &= \mp U_m \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_m}\right)^2} & u_y &= 0 \\
 & a > x > a_n \quad y = \frac{b_{n1} - b_{n2}}{a - a_n}(x - a_n) + b_{n2} \pm "0": & u_x &= \mp U_n \sqrt{1 - \left(\frac{x - a}{a - a_n}\right)^2} \cos \theta \\
 & & u_y &= \pm U_n \sqrt{1 - \left(\frac{x - a}{a - a_n}\right)^2} \sin \theta \\
 & x = 0 \quad b_m > y > 0: & u_x &= U_n - \frac{U_a - U_m}{b_m} y & u_y &= 0 \\
 & x = 0 \quad b > y > b_m: & u_x &= \frac{U_m + U_b}{b - b_m}(y - b_m) - U_m & u_y &= 0 \\
 & x = a \quad b_{n1} > y > 0: & u_x &= U_a - \frac{U_a - U_m}{b_{n1}} y & u_y &= 0 \\
 & x = a \quad b > y > b_{n1}: & u_x &= \frac{U_a + U_b}{b - b_{n1}}(y - b_m) - U_n & u_y &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, θ 为两条非平行断层的交角, U_m 和 U_n 分别为左右两断层上的最大位移, u_x 和 u_y 为内外各边界位移在 x 和 y 轴方向的分量.

取介质弹性模量 $E = 5 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.25$, 模型厚度为 H , 则由边界单元法计算的非破裂区及其附近的应力和位移场(图 1 中虚线范围)如图 2 所示.

模型 II 中断层节的几何展布如图 3 所示. 两断层均作椭圆分布的左旋滑动, 左下方断层滑幅 5 倍于右上方断层. 非平行段断层斜交角为 11° . 模型外边界位移分布与模型 I 在总体上相似. 取介质参数同模型 I, 则断层节附

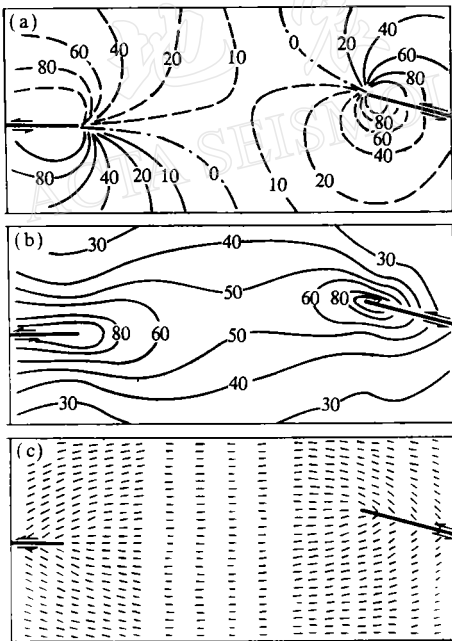


图 2 包含大尺度非破裂区的非平行断层(斜交角 $\theta = 15^\circ$)左旋非均匀滑动(椭圆分布, 左方断层滑幅为右方断层的 1.3 倍)的计算结果. (a) 垂直位移等值线图. 其中实线代表上升, 虚线代表下沉, 数值单位为 $10^{-5} H$; (b) 最大剪应力等值线图. 数值单位为 MPa; (c) 最大剪应力方向(右旋剪切面)分布

近的垂直位移场如图 3 所示.

模型Ⅲ如图 4 所示,构造块体尺寸为 $a \times a$, 断层弯折角为 10° . 断层为左旋, 其位移在断层端点和拐点处取相对低值. 给定这种位移边界条件是考虑到断层端点及其附近应变值的收敛性, 以及断层弯折部位对走向滑动的阻抗一般高于拐点两侧附近的平滑段, 见公式(3).

仍取模型介质参数如前, 则由边界单元法计算的拐点附近(图 4 中虚线范围)垂直位移场如图 5 所示.

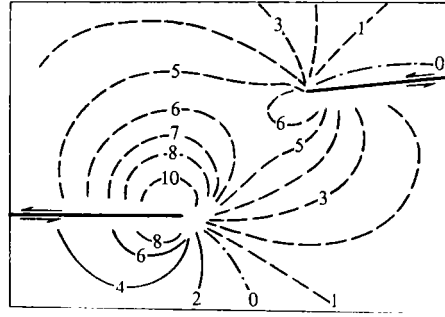


图 3 非平行段膨胀断层节不对等左旋滑动产生的垂直位移等值线. 左下方断层滑动幅 5 倍于右上方断层. 实线代表上升, 虚线代表下降. 数字单位为 $10^{-4}H$

$$\left. \begin{aligned}
 & a > x > 0 \quad y = 0: \quad u_x = U_0 = 2.5 \times 10^{-3}a \\
 & a > x > 0 \quad y = 1: \quad u_x = U_0 \\
 & x = 0 \quad a > y > 0: \quad u_x = U_0 \left(\frac{2y}{a} - 1 \right) \\
 & x = a \quad a_2 > y > 0: \quad u_x = -U_0 \left(\frac{2y}{5a} - 1 \right) \\
 & x = a \quad a > y > a_2: \quad u_x = -\frac{U_0}{5} \left(\frac{2y}{a} - 3 \right) \\
 & a > x > \frac{5}{8}a \quad y = \frac{a}{2} \pm "0": \quad u_x = \mp \frac{4}{15}U_0 \left(\frac{4x}{a} - 1 \right) \\
 & a_2 > x > a_1 \quad y = \frac{x}{10} + \frac{7a}{16} \pm "0": \quad u_x = \mp \frac{6x}{5a}U_0 \cos\theta \\
 & \quad \quad \quad u_y = \mp \frac{6x}{5a}U_0 \sin\theta \\
 & \frac{5}{8}a > x > \frac{a}{2} \quad y = \frac{x}{10} + \frac{7a}{16} \pm "0": \quad u_x = \mp \frac{U_0}{5} \left(\frac{8x}{a} - 7 \right) \cos\theta \\
 & \quad \quad \quad u_y = \mp \frac{U_0}{5} \left(\frac{8x}{a} - 7 \right) \sin\theta
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 鲜水河断裂带实例分析

鲜水河断裂带自松林口至磨西段的主要构造如图 6 所示. 该断裂带的北西段(炉霍—乾宁段)和南东段(康定段)在本区内由一个破裂连接区(Linking fracture region)连接. 该区包含雅拉河、色拉哈和折多塘三条断层. 近年的地质考查和研究(Zhao *et al.*, 1992)表明, 乾宁断层近 3 万年的平均滑动速率为 13 ± 5 mm/a, 其运动为左旋, 而滑动量自龙灯坝至惠远寺有逐渐衰减的趋势. 康定断层近 2 万年的左旋滑动平均速率为 10 ± 3 mm/a. 可以看出, 康定断层和乾宁断层的几何展布、两条断层的作用方式以及滑动量之间的比例均与

模型 I 相似.

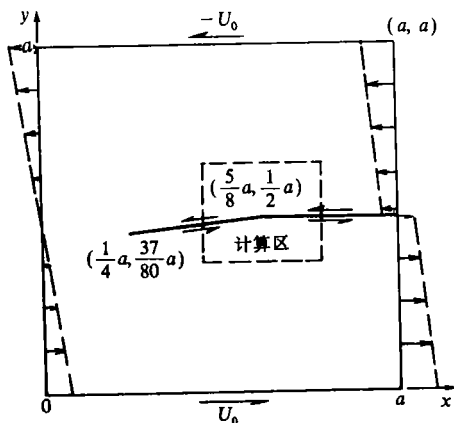


图 4 弯折断层的边界单元模型

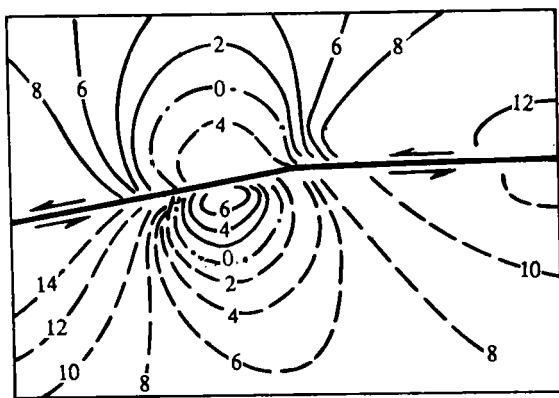


图 5 断层拐点附近的垂直位移等值线.

弯折角 $\theta=10^\circ$, 断层呈非均匀左旋滑动. 图中实线为上升, 虚线为下降. 数字单位 $10^{-4}H$

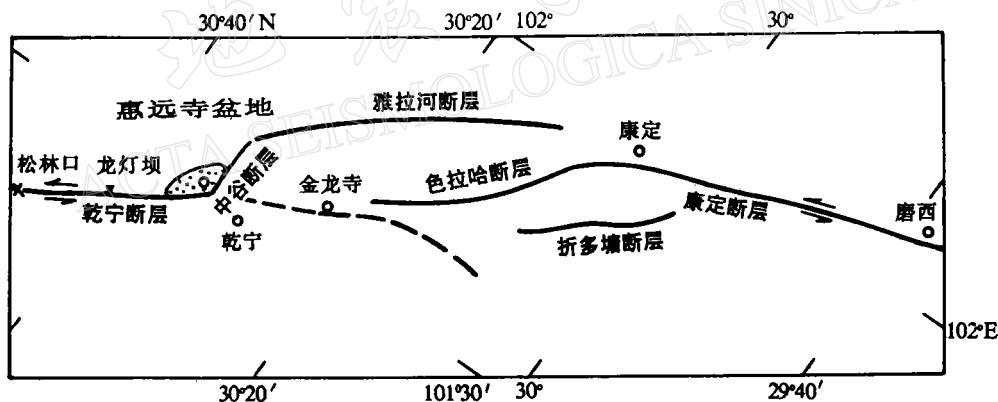


图 6 鲜水河断裂松林口至磨西段的构造略图

对比图 2 的场图象和图 6 的断层展布可以发现: (1) 雅拉河、色拉哈和折多塘三条断层的轨迹与最大剪应力方向基本重合; (2) 三条断层均位于高剪应力带; 断层端点大都位于剪应力集中区; (3) 三条断层均位于下沉区, 这种下沉在二维平面应力模型中与水平合应力的引张区相对应; (4) 这些断层的端点多位于引张应力的集中区. 根据岩体剪切破裂机理, 张性应力将导致岩体内摩擦阻抗降低而诱发剪切破裂, 这种破裂大体沿着最大剪应力方向的轨迹发育, 且破裂的起点往往位于剪切应力和张性应力集中的部位. 由此可以推断, 雅拉河、色拉哈和折多塘三条断层的形成与乾宁和康定断层作用所产生的应力场密切相关. 因而它们是乾宁、康定断层次生的、时序较晚的断层. 资料分析还表明, 色拉哈断层在全新世的平均滑动量为 7 mm/a , 明显高于雅拉河断层. 这一现象可以由模型结果作如下解释, 即前者位于相对强的剪应力区和引张应力区, 因而断层具有较强的活动

性.此外,色拉哈断层东段出现逐渐增大的正滑分量,折多塘断层呈现出较明显的正断层作用,这些现象都可能与康定断层西端出现的张性应力集中有关.由此可见,这些次生断层形成后,其运动方式和滑动分布仍在一定程度上受制于主干断层作用.

除了断层生成的原因、时序和运动学特征外,破裂连接区的断层力学性质还与鲜水河断裂其它段落有明显差异.其主要表现是具有较高的“地震效率”,即较短的断层破裂长度和较小的错距对应较大的地震.如 1955 年折多塘 $7\frac{1}{2}$ 级地震,其破裂延伸仅为 27 km,水平垂直错距不超过 2 m.而在鲜水河断裂的康定段和炉霍—乾宁段,相近规模地震的破裂长度可达 70 km,错距约为 2.5 m.这种现象显示了破裂连接区具有独特的力学性质和动力学特征.

如图 6 所示,乾宁断层和雅拉河断层之间构成了非平行段的膨胀断层节,其构造几何展布与模型 II (图 3) 相似.图 3 模型中两条断层的运动方式、滑幅比例与乾宁断层和雅拉河断层的地质考查结果相符.图 3 的形变场显示,在两条断层之间靠近滑动量较大的断层一侧,存在一个形变下沉区,其位置和形态与图 6 中惠远寺盆地相似.这意味着该盆地的生成是乾宁和雅拉河两断层作用的综合效应,即它是断层运动在地壳中产生的水平拉伸应力所引起的.此外,位于这两条断层之间的中谷断层表现出明显的正滑分量.由此可以推测,中谷断层的形成及其运动方式与这种拉伸作用密切相关.因而中谷断层应是比雅拉河断时序更晚的次级断层.

鲜水河断裂西北段的旦都附近,断层发生弯折,如图 7 所示.其拐角与图 4 模型相近.地质资料分析(Zhao, *et al*, 1992)表明,旦都附近存在一构造隆起,它曾使鲜水河改变轨道而转向北东,再沿隆起的边缘环绕而形成现今的鲜水河弯道.故道则变为一段 4 km 左右的盲谷.此育谷现已被明显抬升.图 7 模型结果显示,弯折断层左旋滑动产生的上升区与旦都隆起的位置相吻合,更改后的鲜水河河道大致落在模型中的凹陷区.这表明,旦都隆起的成因是地壳水平应力集中作用,而这种应力集中则由断层拐点对左旋滑动的障碍所引起.

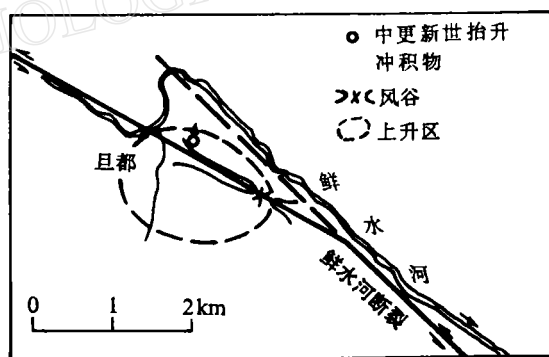


图 7 旦都附近的鲜水河构造地貌示意图

需要指出,惠远寺拉分盆地和旦都构造隆起,除了反映断裂带的几何与运动学分段性外,还对地震破裂的发育具有某种控制作用.例如,旦都隆起往往是地震破裂的起始点(1973 年炉霍 7.6 级地震),其原因可能是这一地区在断裂带运动过程中往往率先积累起较高的应力而诱发初始地震破裂.位于地壳水平拉伸区的惠远寺盆地,则通常成为地震破裂的终端(如 1973 年乾宁 7 级地震),其原因可能是这种低应力区难以产生伴有突发性大应力降的地震破裂.

4 结论与讨论

以上分析表明,位于乾宁断层和康定断层之间的 3 条连接断层(雅拉河断层、色拉哈断层和折多塘断层),其生成机制、时序、运动学特征以及“地震效率”均与鲜水河断裂其它段落有明显差异.因而作为一级分段,鲜水河断裂应划为 3 段,即北西的炉霍—乾宁段,中间的破裂连接区和南东的康定段.

鲜水河断裂带的某些特征地貌反映了断层长期运动所积累的形变效应,并在一定程度上显示了断裂带在不同级次上的分段性.这种分段性对地震能量的积累、地震破裂发育和展布具有控制作用.研究这种控制作用对于地震灾害预测及地震危险性评估具有重要意义.

本文所采用的模型系线弹性边界单元模型.严格地讲,研究中长时间尺度的构造变形,需要考虑介质的非弹性及流变学的本构关系.然而,正如 Bilham 等所指出的(Bilham *et al*, 1988),应用线弹性理论对某些地质问题作适度的(modest)分析还是可行的,它至少可以作为问题的一级近似.此外,本文未将模型的形变幅度与构造变形量作定量对比,是考虑到目前尚难以对地质时期构造变形的多种控制因素作详细的评估.

边界单元法是一种数值算法,其结果的精度在较大程度上依赖于单元划分的密度.试算结果表明,当单元密度较高(如断层上的单元长度为断层的 1/50)且远边界位移取为零时,其场图象与相应边界条件位错模型的结果十分相近,此时仅在离断层相当近(约一个单元长度以内)的区域有明显的误差.对于特定的区域,只需局部加密单元,即可得出符合精度要求的结果.本文在计算中已考虑到误差问题,即根据所考察的区域的位移边界条件的梯度,采用了不等密度的单元划分法,即在断层端点、拐点以及边界条件梯度较大的段落上加大了单元密度,从而保证了数值结果的精度.

参 考 文 献

- Allen, C. R., Luo, Z. L., Qian, H., Wen, S. Z., Zhu, H. W., Huang, W. S., 1991. Field study of highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **103**, 9, 1178—1199.
- Bilham, R., King, G., 1980. The morphology of strike-slip faults; Examples from the San Andreas fault. *J. Geophys. Res.*, **84**, B8, 204—216.
- Brebbia, C. A., 1978. *The boundary element method for engineers*, 354pp. Pentech Press, London.
- Crouch, S. L., Starfield, A., 1983. *Boundary element method in solid mechanics*, 332 pp. Allen and Unwin, Winchester, Mass.
- Zhao, G. G., Liu, D. Q., Wei, W., Zhang, H. X., He, Q. L., Su, G., Guo, G. Y., Zhang, J. F. and Tang, W. N., 1992. *Proceedings of the PRCUSA bilateral symposium on the Xianshuihe fault zone*, 41—57. Seismological Press, Beijing.