

# 活动断层水平位移监测数据 数值分析模型<sup>\*</sup>

张德涵

(中国武汉 430070 武汉测绘科技大学空间测量与地球科学研究所)

## 摘 要

提供了一个解释活动断裂带水平运动特征的数值分析模型. 它是以 Crouch (1976) 关于无限大弹性体上存在一个位移间断的解析解为基础, 充分利用大地测量和地质调查等资料, 通过边界元方法构成的.

在模型上实验的结果, 表明用活动断裂带上的位移矢量捕捉地震前兆信息, 必须紧密与地质调查相结合, 否则不可能得到正确结论.

该模型适用于分析走滑型断裂带, 但是对于类似的情况, 也可得到有参考价值的成果.

**关键词** 活动断层; 大地测量监测; 数值分析模型

## 1. 引 言

川西鲜水河断裂是一条闻名中外的走滑型活动断裂构造带. 在这条长达 300 多 km 的断裂带上, 四川省地震局测量大队、国家地震局地壳应力研究所和地震研究所等单位, 曾先后沿断裂带布设了大地形变观测网、跨断层的短水准、短基线和蠕变仪等多种监测场地. 多年来长期观测已积累了丰富资料, 认真地分析它们, 对于研究该地区地震活动规律、地震的发生机制以及开展板内地球动力学特征的讨论都是有积极意义的. 在分析资料中, 引出了一些值得思考的问题. 例如, 形变网上的形变量对于断层活动反映的灵敏度; 形变网与跨断层短基线及蠕变仪上各自测得的数据之间是否应存在一致性. 如果结论是肯定的, 则应如何利用这一特征; 如果结论是否定的, 又怎样解释. 笔者深信, 认真研究这些问题将有利于提高形变资料的分析水平, 有利于提高对危险地段识别的能力. 为此, 本文提出了一个对水平形变进行分析的数学力学模型.

\* 国家自然科学基金资助课题.

1991 年 12 月 1 日收到本文初稿, 1992 年 3 月 29 日决定采用.

## 2. 活动断层的数值分析模型

考虑到这条断裂带水平运动量远比垂直运动量大的特征(李建中,1986),以及回避对深部资料不确定性的困扰,笔者采用了线弹性、裂纹平板、平面应变的理论为建立模型的基础.

### 2.1 Crouch 解

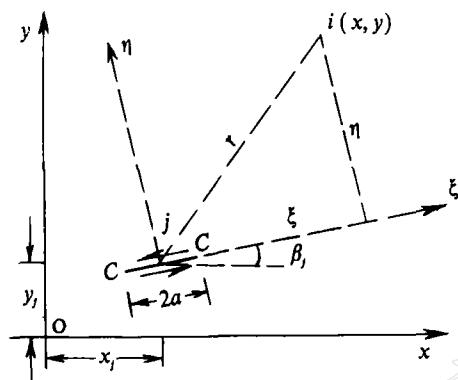


图 1 任意方向线段 CC 的位移错动

如图 1 所示,无限大弹性平面内,有任意方向直线段 CC,在外力作用下两侧面 CC^-(内侧)、CC^+(外侧)发生相对位移.

$$D_{CC} = (D_\xi, D_\eta) \quad (1)$$

其中,  $CC = 2a$ ,  $D_\xi = u_\xi^- - u_\xi^+$ ,  $D_\eta = u_\eta^- - u_\eta^+$ . 当  $D_{CC} \ll 2a$ , 且为常量时,Crouch(1976)导出了弹性平面内任意点  $i(x, y)$  的位移和应力分量的公式,其中位移分量

$$\begin{cases} u_x = D_\xi [2(1 - \mu) f_{\xi\xi} - \eta f_{\xi\xi}] \\ \quad + D_\eta [-(1 - 2\mu) f_{\xi\xi} - \eta f_{\xi\eta}] \\ u_y = D_\xi [(1 - 2\mu) f_{\xi\xi} - \eta f_{\xi\eta}] \\ \quad + D_\eta [2(1 - 2\mu) f_{\eta\eta} - \eta f_{\eta\eta}] \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$f(\xi, \eta) = \frac{-1}{4\pi(1 - \mu)} [\eta (\arctg \frac{\eta}{\xi - a} - \arctg \frac{\eta}{\xi + a}) - (\xi - a) \ln \sqrt{(\xi - a)^2 + \eta^2} + (\xi + a) \ln \sqrt{(\xi + a)^2 + \eta^2}]$$

公式说明,只要将场内任意点  $i(x, y)$  相对于 CC 线段中点  $j$  的局部坐标  $(\xi, \eta)$  代入,就可得到由于 CC 处发生位移间断  $(D_\xi, D_\eta)$  在  $i$  点引起的位移.

### 2.2 位移间断法——边界元

以上的解在弹性力学中已得到扩充,用边界元法解算时被称为位移间断法(Crouch, 1983). 扩充后的概念是在作用域的内部允许存在一些裂缝,每条裂缝允许产生不同的位移间断,全部裂缝作为边界可划分成  $N$  个单元,这些单元可以首尾相接,也可以互不相干. 因此,任意单元  $j$  的两个位移间断分量为

$$\begin{cases} \overset{\circ}{D}_\xi = \overset{\circ}{u}_\xi^- - \overset{\circ}{u}_\xi^+ \\ \overset{\circ}{D}_\eta = \overset{\circ}{u}_\eta^- - \overset{\circ}{u}_\eta^+ \end{cases} \quad (3)$$

单元  $j$  上的位移间断量对域内任一点  $i(x, y)$  处引起的位移分量为

$$\begin{cases} \overset{\circ}{u}_x = \overset{\circ}{B}_{\xi\xi} \overset{\circ}{D}_\xi + \overset{\circ}{B}_{\xi\eta} \overset{\circ}{D}_\eta \\ \overset{\circ}{u}_y = \overset{\circ}{B}_{\eta\xi} \overset{\circ}{D}_\xi + \overset{\circ}{B}_{\eta\eta} \overset{\circ}{D}_\eta \end{cases} \quad (4)$$

式中各影响系数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \overset{\mu}{B}_{\xi\xi} = -(1-2\mu)f_{\xi}\sin\beta_j - 2(1-\mu)f_{\eta}\cos\beta_j - \eta(f_{\xi\eta}\sin\beta_j + f_{\xi\xi}\cos\beta_j) \\ \overset{\mu}{B}_{\xi\eta} = -(1-2\mu)f_{\xi}\cos\beta_j - 2(1-\mu)f_{\eta}\sin\beta_j - \eta(f_{\xi\eta}\cos\beta_j + f_{\xi\xi}\sin\beta_j) \\ \overset{\mu}{B}_{\eta\xi} = -(1-2\mu)f_{\xi}\cos\beta_j + 2(1-\mu)f_{\eta}\sin\beta_j - \eta(f_{\xi\eta}\cos\beta_j + f_{\xi\xi}\sin\beta_j) \\ \overset{\mu}{B}_{\eta\eta} = -(1-2\mu)f_{\xi}\sin\beta_j + 2(1-\mu)f_{\eta}\cos\beta_j + \eta(-f_{\xi\eta}\sin\beta_j + f_{\xi\xi}\cos\beta_j) \end{array} \right. \quad (5)$$

无限平面内全部裂缝共  $N$  个单元, 在内部点  $i$  处引起的位移将是全部单元作用的总和, 可简写为

$$\left\{ \begin{array}{l} \overset{i}{u}_x = \sum_{j=1}^N \overset{j}{B}_{\xi\xi} \overset{j}{D}_{\xi} + \sum_{j=1}^N \overset{j}{B}_{\xi\eta} \overset{j}{D}_{\eta} \\ \overset{i}{u}_y = \sum_{j=1}^N \overset{j}{B}_{\eta\xi} \overset{j}{D}_{\xi} + \sum_{j=1}^N \overset{j}{B}_{\eta\eta} \overset{j}{D}_{\eta} \end{array} \right. \quad (6)$$

(6)式表明, 当已知边界单元上的位移间断量  $\overset{j}{D}_{\xi}, \overset{j}{D}_{\eta} (j = 1, 2, \dots, N)$  就可求得域内任一点  $i(x, y)$  的位移分量  $(u_x, u_y)$ .

## 2.3 新解释——活动断层的数值分析模型

十分有意义的是, 以上的讨论几乎不需要做什么改变, 就可把它同形变网监测活动断层的工作相联系. 即根据形变网上测得的位移矢量, 通过关系式(6), 解出断层带上断层的位错. 前面已提到, 在鲜水河这条高倾角、走滑型断裂带上, 沿断裂带两旁相距几 km 至十几 km 处, 已布设了构成锁、网状的三角点; 在断裂带上有有限点处已布设了跨断层的短基线和蠕变仪; 通过地质勘探和测量可得到到断层线的位置. 此外, 还可通过测量标志下的基岩以及测震资料中关于较深层处的波速资料决定岩性参数. 如果不考虑断层带两旁较远处其它断层活动的影响, 这时就可以把断裂带所在的块体作为无限大平板, 断裂带上的活动断层作为域内的裂缝, 三角点是域内的一些任意点, 这时尽管(6)式中的位移间断量  $\overset{j}{D}_{\xi}, \overset{j}{D}_{\eta} (j = 1, 2, \dots, N)$  对于我们来讲是未知量, 但是在(6)式中作为未知量的位移分量  $\overset{i}{u}_x, \overset{i}{u}_y (i = 1, 2, \dots, N)$ , 我们已通过形变监测, 在三角点上测出. 换句话说, 关系式(6)可作为一个反演公式被形变分析所利用. 由于力学条件未改变, 因此, 已不必重新证明存在性和收敛性. 根据  $N$  个三角点的位移值, 代入(6)式, 可得到  $2N$  维线性代数方程组, 用矩阵按习惯表示

$$[B]_{2N \times 2N} \{D\}_{2N} = \{u\}_{2N} \quad (7)$$

式中,  $[B]$  为根据(5)式算得的系数阵,  $\{D\}$  为边界单元上的断层错动量(未知矢量),  $\{u\}$  为各三角点的位移值组成的已知矢量. 解算这组方程, 要得到唯一解, 只要保证矩阵  $[B]$  满秩, 即满足断层带上的单元数与三角点数目一致. 当断裂带中的断层分布较复杂时, 单元数目将很大, 这时需要在三角锁(网)的分布区扩展一些具有位移矢量的点位. 对于这一要求, 下面将介绍一种特定条件下的内插来完成. 值得强调的是, 当我们在解算方程组(7)时, 还可用断层带上短基线、蠕变仪上测得的对应数据作为约束条件, 用它们来调整、修正初始的介质参数.

求解(7)式, 得到断层上的位移量, 即可根据类似于卢盛松(1990)列出的相应公式, 计

算各断层单元上的应力值,取得应力值后,即可估计发生地震的危险地段.为了强调(7)式的这些特殊意义,笔者把它称为活动断层数值分析模型.

### 3. 模型功能剖析

根据(1)至(7)式及 Crouch(1983)给出有关计算应力的公式,用 FORTRAN 语言编写程序,一组 70 个单元的模拟数据,在微机 386 上执行,CPU 的时间为 300s,现将实验情况综述如下:

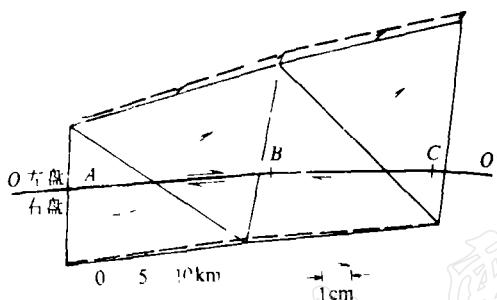


图 2 断层错动形成的位移场(正演)

虚线反映出顺断层底边各点位移成线性相关底边中点处各点位移量,如图 2 所示.

根据位移矢量图,可得到其变形规律如下:(1)右盘上三角点的位移与断层的位移在方向上有一致性,其数量随远离断层而逐渐减小;左盘由于断层的扭动,使三角点上位移矢量的方向偏离断层线,各位移矢量亦随远离断层而变小;(2)由于三角形跨断层,因此形心上的位移与三角形顶点的位移不完全相关.又因其靠近断层,所以位移量大于三顶点中的任一点,方向更接近于断层的走向;(3)通过三角形底边中点的位移矢量可判断出,在断层一侧的三角形底边上,各点的位移成线性相关.

图 3 是同一条锁相同的一个局部,但它与图 2 的区别在于三角锁中是一条具有 5 条断层的断裂带,其中各断层的位移量分别被假设为:  $AA' = 5\text{mm}$ ,  $BB' = 4\text{mm}$ ,  $CC' = 2\text{mm}$ ,  $DD' = 6\text{mm}$ ,  $EE' = 6\text{mm}$ . 在图中各三角点及形心上分别有 3 组位移矢量. 其中第一组用黑色箭头表示的为全部断层各自错动量叠加后的影响;第二组用虚线表示的矢量为断层  $DD'$  及  $AA'$  作用的结果;第三组点线为  $EE'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$  3 条断层作用的结果.

#### 3.1 断层错动

前面已详述,“模型”仅仅是弹性裂纹平板边界元法的反演. 为了深入剖析模型的功能,不妨通过一个正演(即位移间断法)模拟值的算例,考察一下从中给予我们的启示. 图 2 是一条由 12 个三角形组成的三角锁中有代表性的一个局部. 在断层线  $OO'$  上,分段假设右盘的位移量:  $OA = 6\text{mm}$ ,  $AB = 4\text{mm}$ ,  $BC = 3\text{mm}$ ,  $CO' = 2\text{mm}$ . 令  $E = 8.0 \times 10^4 \text{Mpa}$ ,  $\mu = 0.25$ . 通过位移间断法(正演),算得三角形各顶点、三角形形心及顺断层走向各三角形

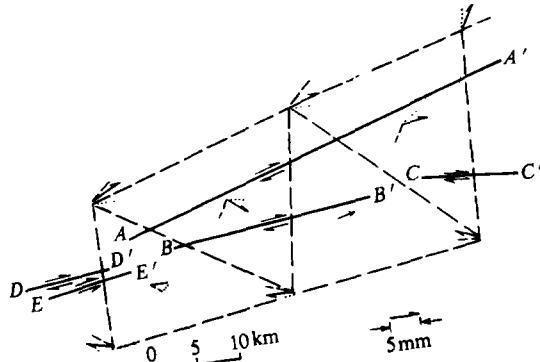


图 3 断裂带错动形成的位移场(正演)  
实线箭头表示全部断层活动的作用,虚线表示  $AA'$ ,  $DD'$  的作用;点线表示  $BB'$ ,  $CC'$ ,  $EE'$  的作用

这幅图告诉我们如下的事实:(1)各点位移矢量承受了断层带内每一条活动断层错动的影响;(2)不活动的断层对各点位移矢量没有影响;(3)只要对每条活动断层的位置有所认识,就可根据位移矢量场中的已知点,对它们进行活动性的分析;(4)在一幅杂乱无章的位移矢量图中,可能存在活动断层.

最后,将图2、图3中各组数据代入模型(即反演)中计算,结果与正演一一对应,在土0.0001m的精度范围内完全一致.

### 3.2 断层带的应力状态

由(7)式计算出各单元的错动量  $D(D_x, D_y)$ ,即可计算出各单元的应力状态( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ ),有关公式只要对Crouch(1983)给出的关系式稍加变化即可得到.

断层上每出现一次微量的错动(蠕滑),都会在模型中反映出各单元的应力大小,当应力积累到一定程度,致使岩石介质超出弹性承受能力,就会造成新的破裂或使断层闭锁段重新活动.一般讲,单纯是震前的蠕滑,其应力值都很小(几mm的位错,只能引起  $10^{-2}$  Mpa量级的应力变化).因此,根据应力值推估危险地段的关键,在于对初始应力场的估计.关于初始应力场的模拟,可通过该地区近期地震资料进行设计.以地震释放的能量所对应的断层状态为基础,每发生一次地震就在相应的断层部位作一次零应力的设置,直至最近一次为止.然后把断层位移造成的应力增量叠加到初始场,即可得到一个危险地段的参考值.

### 3.3 试验与分析

试验数据取自李建中(1986)提供的矢量图.首先将断层分为7段,各段又划分几个单元,目的是使三角点距断层单元不小于单元长.为了弥补已知三角点个数的不足,所以在顺断层走向的三角形底边上,按两点间等间隔内插三点的办法,补足方程的个数.对于这些点的位移,按线性变化规律读取.

表1列出了部分计算数据.其中A组考虑了全部三角点的位移矢量,B组删去了A,B,C,D四点及有关的内插点,C组是在B组的基础上又删去L点,并把各点的位移投影到平行于断层走向的方向.表中给出的都是位于各段中单元错动量最大的错动值.

表1 段内单元错动的最大值 单位:m

组号	段(单元号)				
	$S_1(1)$	$S_2(3)$	$S_3(1)$	$S_4(4)$	$S_5(3)$
A	926.800	160.300	121.600	11.800	9.100
B	5.200	14.600	4.100	6.400	4.500
C	1.900	1.875	1.207	0.791	0.368

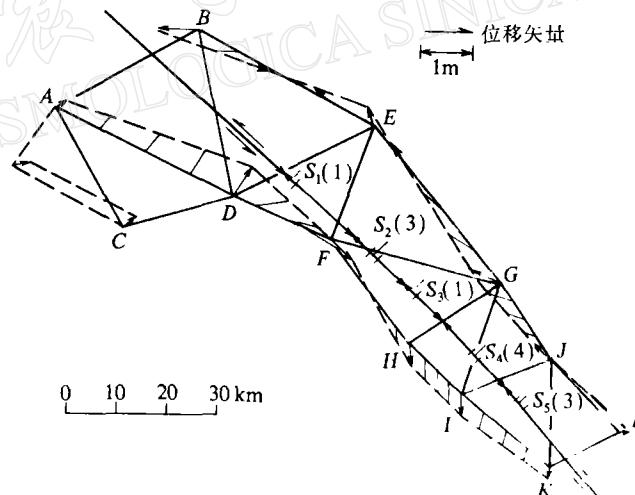


图4 分段与内插示意图

原图据李建中等“炉霍地震水平形变图(1960—1975)”

显然,  $A, B$  组数据都不可信赖, 因为一次炉霍地震在实际上不可能有如此巨大的错动,  $C$  组与邓天岗 (1989) 给出的调查数据在多数点上相接近. 可以预料, 如果采用原始数据 (包括断层位置和三角点的位移矢量) 情况会更好, 而且也没有必要进行投影.

对于表中  $A, B$  组的反常现象, 经过分析, 判断为  $A, B, C, D$  及  $L$  点的位移矢量相对于断层运动方向不一致, 从而在方程组系数阵的特征向量中, 相应项出现了负值和极小的量. 从地区的构造特征来分析, 它却向人们暗示了以下的情况: (1) 在该地区尚有未被发现的活动断层 (包括已发现, 但未参加计算的断层); (2) 在 1960—1979 年两期观测数据之间出现过两期以上不连续的断层活动; (3) 在形变资料中可能尚存在没有被排除的外界干扰.

#### 4. 初步结论

(1) “模型”的特点表现在, 对活动断裂带运动状态的分析是以断层的真实位置及大地测量在断裂带两旁所测得的位移矢量为依据, 以跨断层的有关手段 (短基线、蠕变仪) 的观测数据为边界条件. 从而把作为整体控制的大地测量方法和局部监测的定点方法有机地统一到数值分析之中, 使二者构造了名符其实的相辅相成的统一体; (2) 通过正、反演结果一致的事实, 表明“模型”在数值分析上是可信的. 为了提高断层错动量计算的精度, 将断层单元细分, 用顺断层走向的三角形底边有限点作直线内插, 以保证方程组有唯一解的方法是可行的; (3) “模型”作出的数值分析, 指出三角点上的位移与断层上的位错有相关性, 但不相似. 特别是断裂带上存在着复杂的断层结构面时, 差异更大, 从而暗示在一般情况下, 不能根据位移矢量直观地解释断层位移; (4) 三角点上的位移矢量出现不规则变化时, 可首先在“模型”上试算、分析, 拟定出野外踏勘方案, 然后再通过野外调查, 以判断是否有隐伏断层, 从而大大地节省了外业工作量.

笔者感谢在本项工作中给予帮助和支持的国家地震局地壳应力研究所赵国光研究员、我校大地系吴俊昶教授, 以及我所晁定波教授.

#### 参 考 文 献

- 邓天岗 (主编), 1989. 鲜水河活动断裂带, 96—97. 四川科学技术出版社, 成都.  
 李建中, 1986. 鲜水河断裂带的现今构造形变. 地壳形变与地震, 6, 3, 181—191.  
 卢盛松, 1990. 边界元理论及应用, 32—41. 高等教育出版社, 北京.  
 Crouch, S. L. and Starfield, A. M., 1983. *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, 72—96. George Allen & Unwin, London.