

文章编号: 1006-6616 (2008) 04-0320-08

断裂引起的应变计算量计算方法

许顺山, Nieto-Samaniego AF, Alaniz-Álvarez SA

(墨西哥国立自治大学, 地球科学中心, 墨西哥 76001)

摘要: 本文介绍了断裂引起的应变计算量计算方法。断裂作用可导致连续应变和非连续应变。连续应变与断裂位移/断裂长度比值及断裂面上有效应力成正相关关系。影响非连续应变的因素有: 断裂几何形态、断裂的旋转性、断裂规模。已经提出三种断裂旋转机制: 刚性旋转, 垂直剪切和斜向剪切。对于这三种机制, 我们分别建立了断裂非连续应变的计算公式。这些公式与断裂的旋转角度和位移大小相关。刚性旋转时, 断块内部没有任何塑性变形, 因此地层的长度没有变化。它引起的非连续应变最小。垂直剪切作用使断块内地层变形, 但水平方向的地层长度不变。推算的公式表明, 对于相同的原始数据, 它引起的非连续应变比刚性旋转机制引起的非连续应变大。斜向剪切也使断块内地层变形, 但水平方向的长度也不变。在同等条件下, 它引起的非连续应变比垂直剪切机制引起的非连续应变大。

关键词: 断裂; 断裂应变; 断裂旋转; 垂直剪切; 斜向剪切

中图分类号: P54

文献标识码: A

0 前言

断裂作用可导致两种不同形式应变: 连续应变和非连续应变。由断裂位移来估算的应变是非连续应变^[1~3] (图 1)。由于应变概念只能应用于连续变形, 所以 Jamison (1989)^[1] 引进了断裂应变这一词, 用来描述由一系列断裂位移导致的非连续变形。实际上, 断裂应变是非连续应变还是连续变形取决于所研究的范围和断裂位移的相对大小^[1,4]。如果所研究地区的尺度与断裂位移相比大很多, 断裂应变就可以视为连续变形。到目前为止, 断裂应变在构造地质界尤其在中国构造地质界没有得到足够重视。这主要是由于计算断裂应变必须获得每一条断裂位移大小和方向。这在野外工作中是比较困难的。因为往往缺乏合适的和足够的被错动标志体。但是对于露头条件很好的地区, 尤其是现代断裂活动区, 比较而言容易观察到断裂运动标志体。这些标志物很少经过后期的破坏和沉积物覆盖。

对于断裂应变, 有两种计算方法。一种是计算单个断裂引起的应变, 也就是垂直断裂方向的剖面上求水平方向的应变。另一种通过研究区内所有断裂数据求断裂应变椭球体, 这

收稿日期: 2008-09-16

基金项目: 墨西哥自然科学基金项目 (编号: 89867) 的部分成果。

作者简介: 许顺山 (1963-), 男, 1998 年于中国地质大学获博士学位。2000 年到 2004 年在墨西哥国立自治大学和石油研究院做博士后工作。现为墨西哥国立自治大学教授, 主要从事构造地质及石油地质工作。E-mail: xsu @ dragon.geociencias.unam.mx.

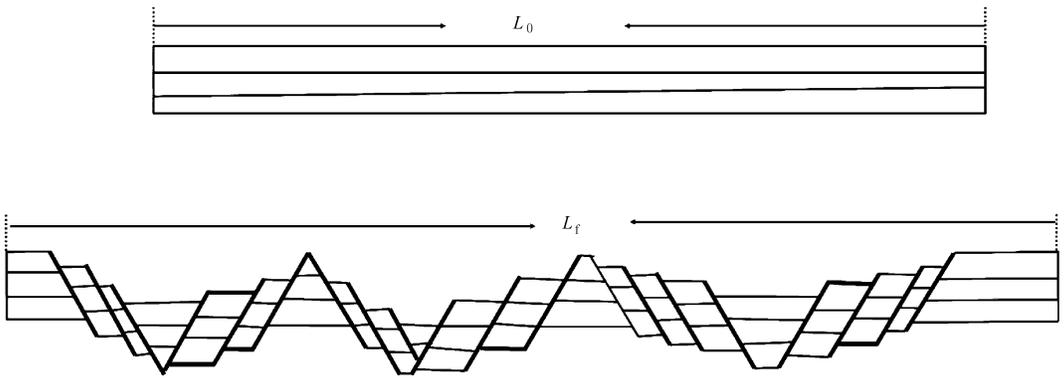


图 1 一系列地堑和地垒引起地壳水平拉伸为 $L_f - L_0$ 。
所以水平方向的应变为 $(L_f - L_0) / L_0$

Fig. 1 The horizontal extension due to grabens and horsts is $L_f - L_0$.
Therefore, the horizontal strain is $(L_f - L_0) / L_0$.

样就可以知道主应变的方向和大小。本文只介绍第一种方法。

1 断裂作用过程的连续应变

变形实验表明，在断裂发生前，有一定的弹性应变积累。在静岩应力条件下 ($\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h = \rho_{gz}$)，其表达式为：

$$\epsilon_h = \sigma_h (1 - \nu^2) / E - \rho_{gz} \nu (1 + \nu) / E \quad (1)$$

这里 ϵ_h 为静岩应力条件下的水平应变， E 是扬氏模量， ν 为泊松比， ρ_{gz} 就是垂直应力。如果岩体变形已经达到断裂阶段，这种弹性应变已不可恢复。但是它与断裂引起的塑性应变相比通常可以忽略不计。

断裂作用过程中，并不总是断块的刚性运动，而是可以引起地块一定的塑性变形。这种塑性应变与断裂最大位移量和断裂长度有关。Schultz 和 Fossen (2002)^[5] 给出了一个计算公式：

$$\epsilon = \sigma D \cos(\delta) / L \quad (2)$$

这里 D 为断裂最大位移， L 为断裂长度， δ 为断裂倾角，而 σ 为断裂面上有效应力的校正值，其具体的计算表达式见 Schultz 和 Fossen (2002)^[5]。

据 Schultz 和 Fossen (2002)，对于正断层，计算出的伸展应变为 2% ~ 3%；对于逆断层，计算出的压缩应变为 4% ~ 5%。如图 2 所示，这种应变与断裂最大位移 (D) 与断裂长度 (L) 的比值成正相关。即比值越大，应变量越大。

2 断裂作用过程的非连续应变

2.1 断裂类型

断裂应变与三个因素有关：断裂几何形态、断裂的旋转性、断裂的位移大小。这三种因素的不同组合，给出的计算方法不一样。断裂有很多的分类方法，在这里不一一列举。我们

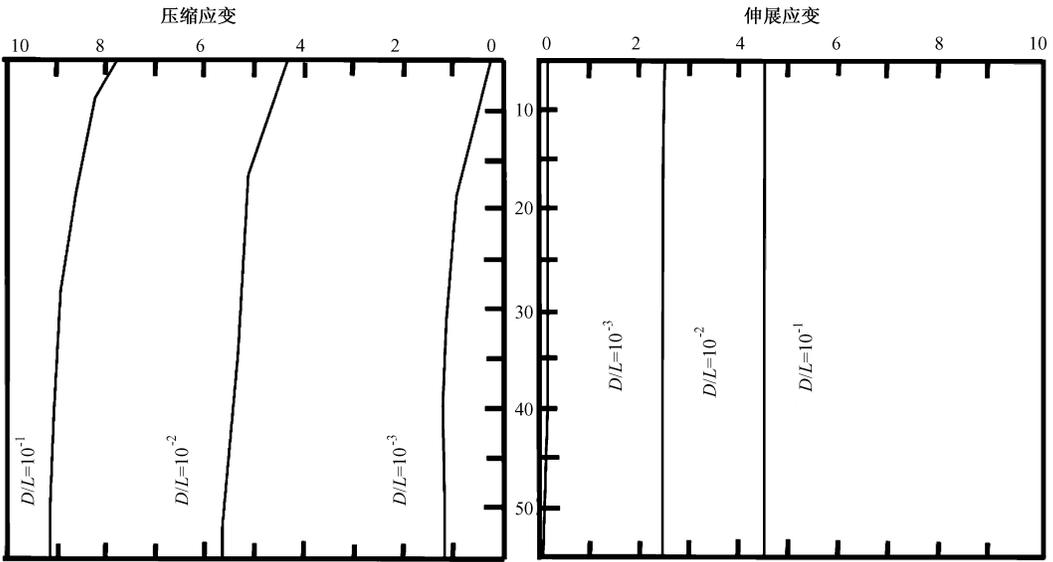


图2 断裂引起的塑性应变随深度和 D/L 比率的变化

Fig 2 Map showing the relationships between plastic strain due to faulting and D/L ratio and depth of deformation

纵坐标表示深度，深度单位为千米。横坐标表示应变，单位为%
Depth (km) is shown in the axis X and strain (%) is shown in the axis Y

只介绍 Wernicke (1982)^[6] 的分类方法。他是根据断裂形态和断裂旋转性来进行分类的(表1)。按照这个分类，只有平面状断裂不会引起地层旋转情况。铲状断裂可以引起地层旋转但本身不一定旋转。如果同时有地层和断裂旋转，可以是平面状断裂也可以铲状断裂引起。

表1 据断裂形态和断裂旋转性的断裂分类 (Wernicke, 1982)^[6]

Table 1 The types of faults based on the geometry and rotation of faults^[6]

断裂组	旋转组分	断裂几何形态
不旋转的	没有地层和断裂旋转	平面状
旋转的	地层旋转	铲状
旋转的	地层和断裂都旋转	平面状和铲状

2.2 断裂旋转机制

到目前为止，已提出了三种断裂旋转机制。最早认为，断裂旋转是刚性的，断块内部没有任何变形^[7]。这种机制存在的问题是断裂旋转产生的空隙，这些空隙没有用其他的机制加以完满解释。而且这种空隙与旋转幅度成正比(图3)。由于上述原因产生了垂直简单剪切和斜向简单剪切模型。垂直剪切机制提出断裂上盘由于断裂作用，发生垂直方向的简单剪切作用。越靠近断裂，剪切作用越强，同时认为这种剪切机制也是地层旋转的原因^[8~10]。然而有作者认为，在铲状断裂的上盘，剪切方向不一定是垂直的，它可以在任何方向进行，这取决于断裂的几何形态和远场应力作用状态。这就是所谓的斜向简单剪切机制^[11](图4)。

2.3 断裂应变的计算

当断裂和地层都不发生旋转时 ($\delta = \delta_0$)，断裂作用前后地层的长度不变(图5)。断裂

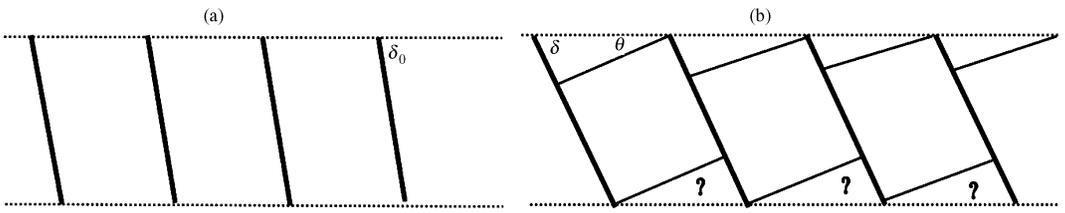


图 3 断裂刚性旋转示意图

Fig 3 Diagram of the rigid-body mechanism

(a) 表示断裂还没有位移时的状态；(b) 表示断裂发生位移同时发生旋转，断裂倾角变小。在问号处留下的空隙没有得到很好的解释。断裂旋转的角度等于地层的倾角，也就是 $\theta = \delta_0 - \delta$

(a) The initial state in which the faults are with no displacement; (b) The fault dips decrease with the rotation of faults. The spaces with interrogation marks are not well explained. The rotated angle of the bed is equal to that of the faults, that is to say, $\theta = \delta_0 - \delta$

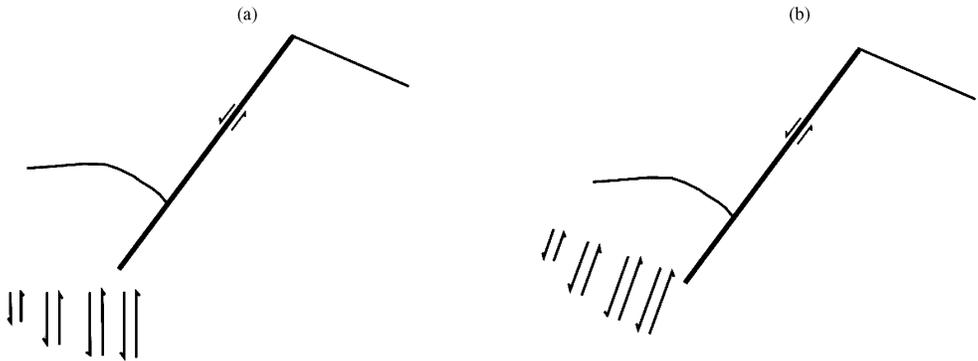


图 4 断裂旋转的简单剪切模型

Fig 4 Simple shear models for fault rotation

(a) 垂直剪切机制；(b) 斜向剪切机制。剪切强度在靠近断裂时逐渐变大

(a) Vertical shear model; (b) Oblique shear model. For two models the shear stress increases close to the fault plane

引起的伸长 CB (对正断层而言) 或缩短 (对逆断层而言) 等于断裂水平断距或平错。因为 CB 等于 $d \cos(\delta)$ ，所以应变量为：

$$e = d \cos(\delta) / L_0 \tag{3}$$

从 (3) 式可以看到，应变的大小与断裂倾角成反相关关系；也就是说，对相同的总位移，断裂倾角越大，应变越小。同时也能看到，应变与位移大小成正相关关系；也就是说，相同的断裂倾角，总位移越大，应变越大。

对于刚性旋转机制断块 (图 6)，由于在断块内部没有变形，断裂旋转的角度等于地层的倾角，即 $\theta = \delta_0 - \delta$ 断裂的平错等于 $L_0 \cot(\delta) \sin(\theta)$ ，断裂作用后的长度为 $D'C' = D'B + BC' = L_0 [\cot(\delta) \sin(\theta) + \cos(\theta)]$ ，所以应变大小为：

$$e = (D'C' - L_0) / L_0 = \cot(\delta) \sin(\theta) + \cos(\theta) - 1 \tag{4}$$

由 (4) 式可以看到，应变大小与断裂现在的倾角 δ 和地层的倾角 θ 有着很复杂的关系，而不是我们想象的那么简单。特别地，我们由断裂现在的倾角 δ 可以计算断裂形成时的倾角 δ_0 ，其表达式是：

$$\delta_0 = \delta + \theta \tag{5}$$

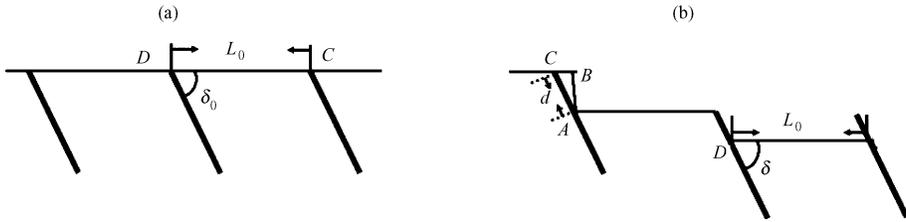


图5 断裂和地层都不发生旋转的断块示意图

Fig. 5 Diagram showing no rotation of both faults and bed

(a) 为断裂运动前的状态; (b) 为断裂运动后的状态

(a) The state before the movement of faults; (b) The state after the movement of faults

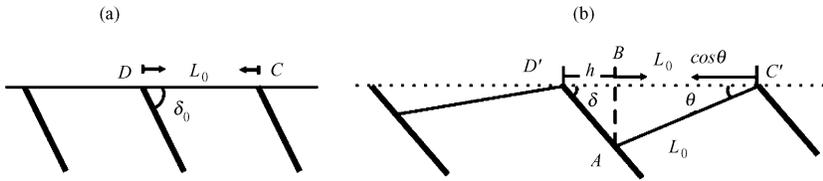


图6 刚性旋转机制断块示意图

Fig. 5 Diagram showing rigid-body rotation of faults and bed

断裂旋转以后, 地层长度不发生变化

After rotation, the length of bed did not change

对于垂直剪切机制, 断块内部发生了垂直方向简单剪切。这样一来, 断块旋转以后的地层长度比原来的要长, 但在水平方向的投影与原始的长度一致。如图7所示, 断裂平错为 $h = L_b \cot(\delta) \sin(\theta)$, 变形前的长为 $L_0 = L_b \cos(\theta)$, 所以应变大小为:

$$e = h / L_0 = \cot(\delta) \tan(\theta) \tag{6}$$

由(6)式可以推断, 应变大小与断裂现在的倾角成反相关关系, 而与地层的倾角成正相关关系。有兴趣的读者可以计算一下, 对于相同的断裂旋转角, 垂直剪切引起的水平应变要大于刚性旋转引起的应变量^[10]。

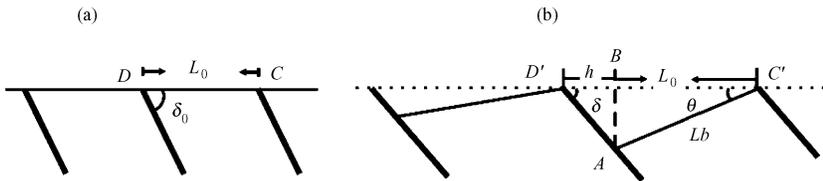


图7 垂直剪切机制断块示意图

Fig. 7 Sketch showing the vertical shear model

断裂旋转使地层的长度发生变化

The bed has changed its length after vertical shear

同样地, 由断裂现在的倾角 δ 可以计算断裂形成时的倾角 δ_0 , 其表达式是:

$$\tan(\delta_0) = \tan(\theta) + \tan(\delta) \tag{7}$$

可以看到, 对于垂直剪切机制, 变形前后的断裂倾角不是简单的代数关系。比较式(7)和式(5), 对于相同的地层倾角和断裂现在的倾角, 由垂直剪切机制得到的断裂原始倾角相

对较小。

斜向剪切机制与垂直剪切机制有些类似（图 8）。但是二者相比，斜向剪切机制引起的拉伸量比垂直剪切机制引起的拉伸量大，用等式表示为：

$$AC = h[1 + \tan(\delta)\tan(\alpha)] \tag{8}$$

其应变量为：

$$e = AC/CE = [\cot(\delta) + \tan(\alpha)] / [\cot(\theta) - \tan(\alpha)] \tag{9}$$

从这个方程可以推断，当 α 等于零时，式（9）等同于式（6）。式（9）可以进一步变为：

$$\begin{aligned} e &= [\cot(\delta)\tan(\theta) + \tan(\alpha)\tan(\theta)] / [1 - \tan(\alpha)\tan(\theta)] \\ &= \cot(\delta)\tan(\theta) / [1 - \tan(\alpha)\tan(\theta)] + \tan(\alpha)\tan(\theta) / [1 - \tan(\alpha)\tan(\theta)] \end{aligned} \tag{10}$$

该式表明，只要 $\tan(\alpha)\tan(\theta)$ 小于 1，斜向剪切机制引起的拉伸量比垂直剪切机制引起的拉伸量大。据 White 等（1986）^[11]， α 的大小一般小于 45 度， θ 的大小也小于 45 度，因此， $\tan(\alpha)\tan(\theta)$ 小于 1。

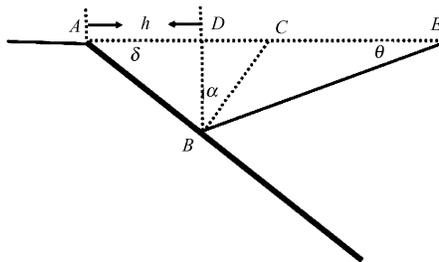


图 8 垂直剪切机制与斜向剪切机制拉伸量的对比

Fig. 8 Comparison of extension between the vertical shear and oblique shear

α 为剪切方向与垂直方向的夹角（据 Westaway 和 Kusznir, 1993^[10] 修改）

The angle α is the intersection angle between shear and vertical direction (Modified from Westaway and Kusznir, 1993^[10])

2.4 研究实例

我们考察来自于墨西哥中央桌子山 San Miguelito 地区渐新世火山岩区的断裂。该区发育有一系列的多米诺式的正断层（图 9）。通过研究认为，这些断裂经历了垂直剪切作用。

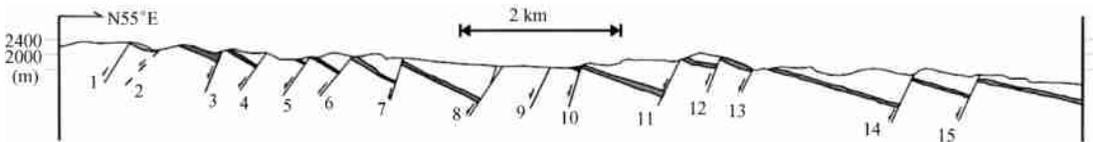


图 9 墨西哥中央桌子山 San Miguelito 地区剖面地质图

Fig. 9 Geological section from the San Miguelito of Mesa Central, Mexico

标志体为 Cantera 未熔结凝灰岩（据 Xu 等 2004^[12] 修改）

The marker bed is Cantera unwekled tuff (Modified from Xu et al., 2004^[12])

断裂参数都是通过野外质地测量所得（表 2）。测量标志体为 Cantera 未熔结凝灰岩。地层倾角为断块内的平均值。也就是通过测量一系列的倾角值，然后求得平均值。在一个断块内，可以得到 5~10 个地层数据。我们看到，每一断块的应变各不相同。各断块的地层的拉伸应变的最大值 15.5%（断块 7），而水平应变的最大值达 31.2%（断块 8）。对于整个剖面，求得的应变量为 20%。

表2 图9中各断块的断裂应变计算(据 Xu等 2004^[12])Table 2 Results of strains of the fault blocks in Fig 9 (From Xu et al., 2004^[12])

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
θ_1 (°)	24.5	26.3	25	28	30	24	18	18	22	12	18	12	14
δ (°)	63	54	64	45	75	55	58	75	65	67	64	65	66
L_b (m)	660	540	500	438	755	1120	540	400	1180	550	450	1980	790
L_0 (m)	600.5	484.1	453.2	386.7	653.8	1023.2	513.6	380.4	1094.1	537.9	427.9	1936.7	766.5
h (m)	139.5	173.8	103.1	205.6	101.2	318.9	104.3	33.1	206.1	48.5	67.82	191.9	85.1
ϵ_{bed}	0.0991	0.1155	0.1033	0.1326	0.1548	0.0946	0.0514	0.0515	0.0785	0.0225	0.0516	0.0224	0.030
ϵ_{hor}	0.2323	0.359	0.2275	0.5316	0.1548	0.3117	0.2031	0.0870	0.1884	0.0902	0.1584	0.0991	0.111

注: θ_1 = 平均地层角度, L_b = 现在地层长度, L_0 = 地层原始长度, ϵ_{bed} = 地层的拉伸应变, ϵ_{hor} = 水平方向的拉伸应变。

3 结论

(1) 断裂作用可导致连续应变即塑性变形与非连续应变。他们分别有不同的计算公式。

(2) 计算断裂的非连续应变应考虑断裂几何形态、断裂的旋转与否、断裂的位移大小等三个因素。

(3) 刚性旋转时, 没有断块内变形。它引起的水平非连续应变最小。垂直剪切作用使断块内地层变形, 即有地层的连续性应变。在相同条件下, 它引起的非连续应变比刚性旋转机制引起的非连续应变量大。斜向剪切也使断块内地层变形, 也有地层的连续性应变。在相同条件下, 它引起的非连续应变比垂直剪切机制引起的非连续应变应大。

参 考 文 献

- [1] Jamison WR. Fault-fracture strain in Wingate Sandstone [J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11 (8): 959~974.
- [2] Wojtal S. Measuring displacement gradients and strains in faulted rocks [J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11 (6): 669~678.
- [3] Peacock DCP, Sanderson DJ. Estimating strain from fault slip using a line sample [J]. Journal of Structural Geology, 1993, 15 (12): 1513~1516.
- [4] Gauthier B, Angelier J. Fault tectonics and deformation: A method of quantification using field data [J]. Earth Planet Science Letters, 1985, 74 (1): 137~148.
- [5] Schultz RA, Fossen H. Displacement-length scaling in three dimensions: the importance of aspect ratio and application to deformation bands [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24 (9): 1389~1411.
- [6] Wernicke B, Burchfiel BC. Modes of extensional tectonics [J]. Journal of Structural Geology, 1982, 4: 105~115.
- [7] Jackson JA. Active normal faulting and crustal extension [A]. In: Coward MP, Dewey JF, Hancock PL. Continental Extensional Tectonics [C]. London: Geological Society, 1987, 28: 3~17.
- [8] Gibbs AD. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics [J]. Journal of Structural Geology, 1983, 5 (2): 153~160.
- [9] Gibbs AD. Structural evolution of extensional basin margins [J]. Journal of the Geological Society, 1984, 141 (4): 609~620.
- [10] Westaway R, Kusznir N. Fault and bed "rotation" during continental extension: block rotation or vertical shear? [J]. Journal of

- Structural Geology, 1993, 15 (6): 753~770.
- [11] White NJ, Jackson JA, McKenzie DP. The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls [J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8 (8): 897~909.
- [12] Xu S, Nieto-Samaniego AF, Alaniz-Álvarez SA. Tilting mechanism in domino faults of the Sierra de San Miguelito, Central Mexico [J]. Geologica Acta, 2004, 2 (3): 189~202.

METHODS TO CALCULATE THE FAULT-RELATED STRAIN

XU Shun-shan, Nieto-Samaniego AF, Alaniz-Álvarez SA

(National Autonomous University of Mexico)

Abstract: This paper presents some methods for calculation of fault strain. The faulting can produce continuous and discontinuous strain. The continuous strain has positive relationship with the ratio of fault displacement vs fault length and with the effective stress on the fault plane. When calculating the discontinuous fault strain, we should consider three factors that affect the establishment of equations: fault geometry, fault rotation, and fault size or fault displacement. There have been three mechanisms of fault rotation: rigid-body, vertical shear, and oblique shear. For these models, the calculation equations are established, respectively. These equations are related to the rotation angle and displacement of fault. For the rigid-body model, the fault has no internal deformation, thus the bed remain its length after rotation. The discontinuous strain due to this mechanism is smallest. The vertical shear produces bed deformation, whereas the horizontal length of bed does not change. The established equation indicates that, using the same data, the discontinuous fault strain is larger than that for the rigid-body model. Similarly, the oblique shear also causes bed deformation, but the horizontal length of bed remains constant. The obtained equation implies that the discontinuous fault strain is larger than that for the vertical shear model in the same condition.

Key words: fault; fault strain; fault rotation; vertical shear; oblique shear