

黄建平, 石耀霖, 李文静. 从跨断层短基线观测计算地应变的方法探讨——以唐山台地形变数据为例. 地球物理学报, 2010, **53**(5): 1118~1126, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.012

Huang J P, Shi Y L, Li W J. Method of strain calculation based on the cross-fault short-baseline observation—taking the Tangshan deformation data as an example. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(5): 1118~1126, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.012

从跨断层短基线观测计算地应变的方法探讨 ——以唐山台地形变数据为例

黄建平^{1,2}, 石耀霖¹, 李文静³

1 中国科学院研究生院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3 中国地震局第一监测中心唐山台, 唐山 063001

摘 要 跨断层测量是研究断层活动特征的重要手段之一. 本文介绍了一种利用台站短基线观测, 通过刚体模型、弹性体模型和组合模型确定断层或断裂带附近应变的方法, 并以唐山地形变台资料为例进行对比分析. 通过对比同时时间段的位移和应变时间序列的变化幅度和趋势特征, 认为组合模型更符合实际情况. 同时, 分析了多条测段不同组合情况下的模型计算结果, 探讨了跨断层观测资料与区域 GPS 数据计算结果之间差异的原因. 并提出了基线过渡桩更可能位于断层东侧的认识.

关键词 断层模型, 弹性模型, 唐山台, 地形变

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.012

中图分类号 P315

收稿日期 2009-10-22, 2010-02-05 收修定稿

Method of strain calculation based on the cross-fault short-baseline observation —taking the Tangshan deformation data as an example

HUANG Jian-Ping^{1,2}, SHI Yao-Lin¹, LI Wen-Jing³

1 *Lab of Computational Geodynamics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2 *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

3 *Tangshan Deformation Station of the First Crust Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tangshan 063001, China*

Abstract Cross-fault observation is one of the important methods in fault movement study. Here a method for strain calculation using a fault model, elastic model, and combination model is introduced based on the cross-fault short-baseline observation, and the crustal deformation data from Tangshan station is taken as an example. By comparison of the amplitudes and trends of the displacement and strain within the same period, the combination model is taken as the best. Meanwhile, different kinds of segment combinations are used for those models and the reason of the difference between cross-fault observation and GPS is also discussed. And it may be more likely that the connection bench should be on the east side of the fault.

Keywords Fault model, Elastic model, Tangshan station, Crustal deformation

1 引言

大地形变测量测定的地壳形变是地壳运动的一种外部表象,而地震则是地壳运动的一种特殊形式.一般认为地震的孕育和发生是地壳内应力应变能量的逐渐积累和快速释放过程,这一过程必然导致地壳内部和外表的形状变化.因此,地壳形变与地震之间必定存在某种形式的必然联系.跨断层观测是获取震前断层活动信息的重要方法.断层形变测量是通过直接测定活动断层两侧参考点水平距离和相对高差的微小变化来推断断层两侧介质的三维运动,从而确定断层的运动方式、运动速率以及两者随时间演变的过程^[1].

1966 年邢台地震以来,我国对地形变观测和研究进行了不懈的努力,初步建成了具有相当规模的地形变监测系统,包括断层形变台网在内共 8 大台网.截至到 2006 年底,仅跨断层形变观测台站有 32 个,跨断层形变观测场地约 150 处^[1].然而,对这些数据的利用仍然很不充分.在许多台站仅仅给出原始观测结果,即短基线长度变化或短水准高差变化,利用它们的形态变化试图预报地震^[2,3].实际上,这些观测蕴含了区域和断层带地球动力学过程和地震孕育发展变化的宝贵信息.我们应该充分地挖掘这些物理信息,才能使我们从地震的经验预报逐步发展为物理预报.同时,GPS 测量给出的是较大范围内应变的平均结果^[4~7],而跨断层短基线测量可以反映断层两侧或断裂带内的应变状况,这两种数据的综合分析,无疑可以大大提高我们对地震孕育发展过程的认识.

本文将以唐山台站数据为例,介绍一种利用台站短基线观测确定断层或断裂带附近应变的方法,分析不同模型对台站资料的适用情况,并将结果与区域 GPS 资料计算结果进行对比和讨论.

2 唐山地震台区域概况

1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震后,主破裂

带的中部次级地裂缝带在唐山十中院内发育数条走向北东 40°~50°的地裂缝,将围墙、小路等右旋错断,最大错距 1.3 m,据中国建筑科学研究院勘察技术研究所探槽资料^[1],地裂缝为紧密束状,高角度西倾,呈挤压性质,东南侧阶梯状下降,累计垂直错距 0.3 m^[8,9].据谢觉民等^[10]研究结果认为,台站观测到的地震后形变基本上可以代表 5 号断层(见图 1 中 F5)在地震后的活动,也在一定程度上揭示了深部隐伏断裂在地震后的形变信息.唐山台位于唐山市路南区原第十中学院内,测量场地示意图及所处区域地质构造环境见图 1.

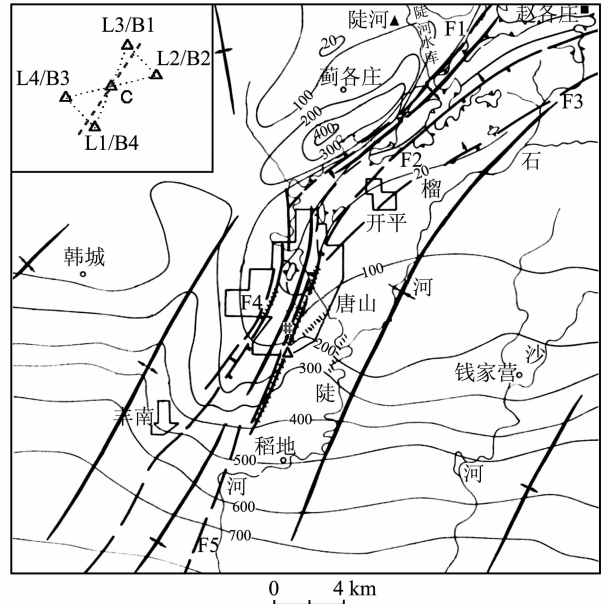


图 1 唐山台位置及区域构造、测量场地示意图
三角表示唐山台地形变台站,井号表示山西水 2 井,方块表示赵各庄体应变台.地质构造底图来自尤惠川等^[9].左上角图中:L 表示水准,B 表示基线,C 代表过渡桩,虚线表示台站所跨 5 号断层.

Fig. 1 Regional tectonics and observation site map of Tangshan station

Triangle means the Tangshan station, # means the Tangshan well and rectangle is the Zhaogezhuang volume-strain station. The tectonic map is from You et al. ^[9]. In the top-left corner, L: Leveling, B: Baseline, C: Connection, Dashed line: Fault 5 which crosses the Tangshan station.

表 1 给出了台站使用的仪器情况.台站先后使用过 3 种不同类型的 ZEISS 系列的水准仪,仪器测量精度不断提高.图 2 给出了 1984 年以来 4 个测段基线观测值时间序列.

3 计算模型

断层附近的变形十分复杂,但不妨简化为三种

1)方鸿琪,王锺琦,赵树栋等.唐山强震区地震工程地质研究.

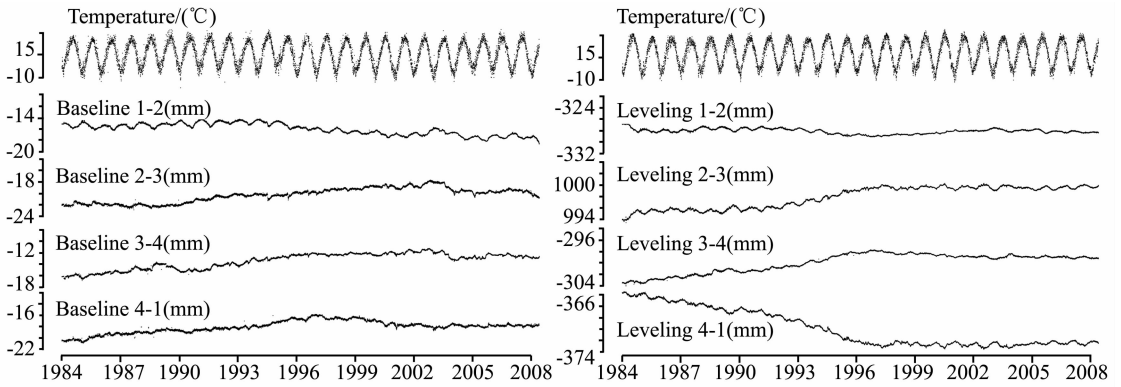


图 2 唐山地形变台气温及短基线、短水准时间序列

Fig. 2 Air temperature, short baseline and leveling time serials at Tangshan station

表 1 唐山地震台观测项目及仪器情况一览表

Table 1 Observations and instruments used at Tangshan station

观测项目	仪器名称	仪器精度	测量方法
气温	自计温度计	0.1 °C	模拟记录
降雨	量筒	0.1 mL	每日记录一次
	Ni007	0.07 mm	人工扶尺, 仪器读数
短水准	Ni002	0.05 mm*	上午往测, 下午返测, 求平均
	DiNi11	0.01 mm	人工拉尺, 人工读数
短基线	钢钢基线尺 (24 m 长)	0.01 mm	早晨往测, 返测, 中间不间断, 求平均

注: * 根据上海隆强检测仪器设备有限公司(西安公司) <http://www.lqxa.com/doc/pro.asp?ParentID=8>

模型, 见图 3. (1) 两个刚性块体被一个断层切割. (2) 台站位于均匀形变场内, 这又包括两种可能的情况: 一是周围的地块是刚性的, 应变集中发生在一个断裂带内, 断裂带内应变可以近似为均匀应变场; 另一种可能是断层已经完全愈合, 与周围地块一同处于一个均匀弹性应变场内. 这两种情形均可用弹性模型计算应变. (3) 台站位于均匀应变场内(可以是均匀应变的断裂带内或整个都是弹性地块), 同时,

线状断裂也有错动.

本研究简化断层性质为走滑断层, 对该条件下用三种模型做一简单的分析.

3.1 刚性块体被断层切割模型

假定断层两侧都是刚性块体, 那么台站观测数据的变化就纯粹反映的是断层错动的信息. 两个刚性块体被一条断层切割, 则需要测定的量为断层右侧相对左侧的错动矢量 $U(U, V, W)$. U 是沿着断层走向的水平位移, V 是垂直断层走向的水平位移, W 是垂直方向的位移. 根据唐山台的场地条件, 可忽略垂直方向的变化. 为此, 需要起码两条跨断层基线测量 AB 和 AC . 则可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta AB &= U \cos \alpha + V \sin \alpha, \\ \Delta AC &= U \cos \beta + V \sin \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

α 和 β 分别为 AB 和 AC 与断层走向的夹角. 进而可以得到

$$\begin{aligned} U &= -\frac{\Delta AB \cos \beta - \Delta AC \cos \alpha}{\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha}, \\ V &= \frac{\Delta AB \sin \beta - \Delta AC \sin \alpha}{\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha}. \end{aligned} \quad (2)$$

在唐山台, 共有 4 条基线测段, 则可以联合建立

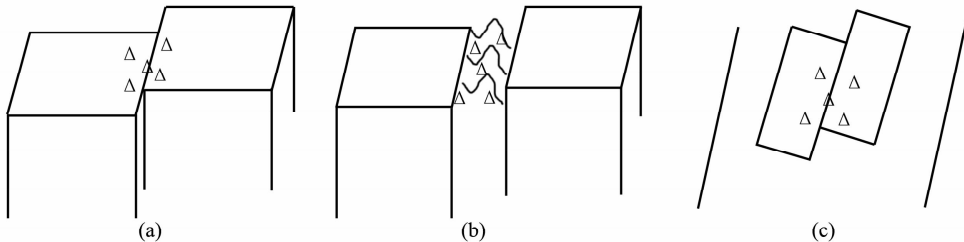


图 3 三种不同模型的示意图

(a) 刚性块体为断层切割模型; (b) 测点位于均匀形变场内; (c) 测点位于弹性地块上, 同时存在线性断裂错动.

Fig. 3 Sketch of three models

(a) Model of rigid blocks crossed by one fault; (b) Model of observation points in the uniform deformation field; (c) Model of observation points on the elastic block combined with linear fault movement.

方程组,如公式(3),通过最小二乘求解 U 和 V ,可得断层运动状态的时间序列。再根据计算的 U 和 V 代入(1)式与实际各测线观测值比较,可以计算各条测线的残差。

$$\begin{pmatrix} \Delta b_{12} \\ \Delta b_{23} \\ \Delta b_{34} \\ \Delta b_{41} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 \\ \cos\alpha_2 & \sin\alpha_2 \\ \cos\alpha_3 & \sin\alpha_3 \\ \cos\alpha_4 & \sin\alpha_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix}. \quad (3)$$

由于台站日常观测值是两点间的距离,在公式(3)的应用计算中,等号左边的距离变化取的是后面的观测值与第 1 个数据点的差值,各个角度分别为各个基线测段与断层走向的夹角,依次为 $66^\circ, 126^\circ, 66^\circ$ 和 6° 。这里的坐标系为断层坐标系,即 U 正方向为沿着断层走向,指向东北, V 正方向为垂直断层走向,指向西北。假定断层的东南盘为不动盘,则 U 为正时表明断层呈右旋运动, V 为正时表明断层呈张性运动。

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta b_{12}}{b_{12}[1]} \\ \frac{\Delta b_{23}}{b_{23}[1]} \\ \frac{\Delta b_{34}}{b_{34}[1]} \\ \frac{\Delta b_{41}}{b_{41}[1]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1 + \cos(2\alpha_1)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_1)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_1)}{2} \\ \frac{1 + \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_2)}{2} \\ \frac{1 + \cos(2\alpha_3)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_3)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_3)}{2} \\ \frac{1 + \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_4)}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma \end{pmatrix}. \quad (5)$$

在实际计算中,公式(5)中的数据意义同公式(3)。

为方便与其他数据计算结果的比较,还把断层坐标系下的计算结果转化为地理坐标系下,依据公式(6)计算得到东西和南北两个方向的应变结果。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{ew} \\ \epsilon_{ns} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中 θ 为断层坐标系旋转为地理坐标系时旋转的角度, -76° 。

3.3 组合模型——断裂带有变形,断层也有错动

实际观测资料的解释,需要既考虑断层的位错活动,又考虑区域的弹性体活动。假定断层一侧只发生了弹性变形,断层另一侧既有弹性变形又有断层错动。这时,断层位移和弹性应变的计算如公式(5)

3.2 断裂带内均匀连续变形模型

假设该地区没有可见明显的断层活动,而是在一定宽度的断裂带内连续变形,而且变形在测网范围内是均匀的,地形变测量主要反映的是断裂带内连续变形,即沿着断层走向的应变 ϵ_x ,垂直断层走向的应变 ϵ_y ,剪切应变 γ 均为常量。根据公式(4)可以计算出沿着不同方向测线的线应变。

$$\frac{\Delta L}{L} = \epsilon_a = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos(2\alpha) + \frac{\gamma}{2} \sin(2\alpha), \quad (4)$$

其中, ΔL 为基线长度相对于第 1 个观测时间的变化值, L 为第 1 个观测时间的变化值, ϵ_a 为线应变, α 为断层与测线夹角。

同第一模型,把四条测量基线联立起来,根据公式(5)可以得到台站观测反映的不同方向的应变时间序列。

所示。这里也同样采用断层坐标系。

$$\frac{\Delta L - U \cos\alpha - V \sin\alpha}{L} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos(2\alpha) + \frac{\gamma}{2} \sin(2\alpha), \quad (6)$$

若测段在断层的一侧,则 U 和 V 的系数均为零。

如果这样,就有 5 个待求参量,至少需要 5 个测段的观测数据。为解决这一问题,本研究挖掘了原始的基线测量记录,整理了通过过渡桩 C 的分段测量结果,从而得到了 6 个测段的原始记录,问题得以解决。

另外,由于断层不可能是一条细线,则过渡桩 C 应该处于断层的某一盘上。在实际计算中,分别考虑了 C 点在断层西侧和断层东侧两种情形。当 C 点在断层西侧时,

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta b1C}{b1C[1]} \\ \frac{\Delta b3C}{b3C[1]} \\ \frac{\Delta b2C}{b2C[1]} \\ \frac{\Delta b4C}{b4C[1]} \\ \frac{\Delta b12}{b12[1]} \\ \frac{\Delta b34}{b34[1]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1 + \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_4)}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1 + \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_2)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_4}{b2C[1]} & \frac{\sin\alpha_4}{b2C[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_4)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_2}{b4C[1]} & \frac{\sin\alpha_2}{b4C[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_2)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_1}{b12[1]} & \frac{\sin\alpha_1}{b12[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_1)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_1)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_1)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_3}{b34[1]} & \frac{\sin\alpha_3}{b34[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_3)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_3)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_3)}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (7)$$

当 C 点在断层东侧时,

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta b4C}{b4C[1]} \\ \frac{\Delta b2C}{b2C[1]} \\ \frac{\Delta b3C}{b3C[1]} \\ \frac{\Delta b1C}{b1C[1]} \\ \frac{\Delta b12}{b12[1]} \\ \frac{\Delta b34}{b34[1]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1 + \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_4)}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1 + \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_2)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_4}{b3C[1]} & \frac{\sin\alpha_4}{b3C[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_4)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_4)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_2}{b1C[1]} & \frac{\sin\alpha_2}{b1C[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_2)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_2)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_1}{b12[1]} & \frac{\sin\alpha_1}{b12[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_1)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_1)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_1)}{2} \\ \frac{\cos\alpha_3}{b34[1]} & \frac{\sin\alpha_3}{b34[1]} & \frac{1 + \cos(2\alpha_3)}{2} & \frac{1 - \cos(2\alpha_3)}{2} & \frac{\sin(2\alpha_3)}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

为了便于不同数据计算的结果能够进行比较,将 x 和 y 两个方向的应变时间序列转变为地理坐标系下的结果.

4 结果与分析

图 4 给出了刚性模型假设下计算得到的断层位移时间序列. 沿着断层走向的位移 U ,基本上为正,说明断层一直是右旋状态运动,最大变化幅度约 3 mm,其阶段性的变化趋势比较明显. 从 1985 年初到 1988 年底为第 1 次快速增长期,年变速率约 0.475 mm/a,之后从 1989 年初快速衰减到 1990 年 3 月份左右,变化幅度 0.64 mm/a,然后经历了 2 年多的时间开始了第 2 次快速上升期,一直到 1996 年底,年变速率约 0.40 mm/a,从 1997 年初开始快速下降直到 2003 年 6 月份左右,年变速率达到 -0.369 mm/a,经历了 2 年左右大幅年变的振荡和 2 年左右的平稳过渡,从 2008 年初似乎又开始了第 3 次的快速上升期.

而垂直于断层走向的位移 V ,也基本上为正,说明断层一直是张性活动,最大变化幅度为 3 mm,该

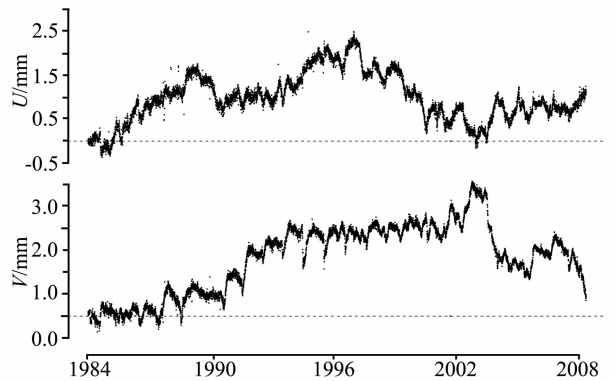


图 4 刚体模型计算得到的断层位移序列

Fig. 4 Displacement time series from the rigid model

序列表现出来的阶段变化的趋势性特征又不同于断层走向上的位移序列. 从 1984 年开始到 1987 年中,位移 V 基本上在零线左右震荡,说明断层处于张-压的调整期. 之后经历了近 3 年的大幅年变跳动,开始了大幅度的增长至 1993 年底,年变速率为 0.533 mm/a,从 1994 年开始到 2001 年初,保持稳定,在之后突然的大幅增加后(2003 年中期),大幅度快速下降,经过了 2 年稍微的回升后从 2007 年初又开始大幅下降.

从弹性体模型看东西、南北及旋转应变的时间序列变化(图 5a),可以发现:东西向应变从 1984~1990 年左右,以张性应变为主(正值),从 1991 年开始至今,基本上是压性应变(负值),最大变化幅度达到 10^{-4} 。从 1991~1994 年,压应变快速增加,经过了约 8 年左右的平稳期,在 2002 年又出现了一次快速增加,在 2003 年下半年快速反向变化,目前处于稳定变化状态。南北向应变主要是张应变(正值),最大变化幅度约 10^{-4} ,该变化趋势在 1997 年以前以平稳上升为主,之后是小幅度下降(至 2005 年),目前处于平稳变化状态。剪应变的变化波动特征比较显著,最大幅度为 10^{-4} ,从 1985~1988 年底,剪应变由顺时针变为逆时针(负变为正),说明断层受到逆时针方向的旋转作用。从 1989~1997 年底,剪应变基本为逆时针方向,从 1999 年至今又变为顺时针方向。这说明断层受力状态处于不断的调整之中。同

时,从图 5b 看到:沿着断层方向的应变为张性(正值),有显著的 3 个趋势性变化,即从 1984~1993 年左右应变缓慢增加,1994~1996 年快速增加,经历 2 年多时间稳定后,从 1998~2003 年快速下降,中间也有些许波动,从 2005 年至今保持在一个稳定水平;垂直断层方向的应变大部分为张性,其趋势性变化与平行断层方向的应变有显著不同,在 1984~1993 年应变是阶梯式的增加,从 1993~2001 年保持稳定在一个水平,2002~2003 年有大幅度波动,之后开始快速下降,在短期(2004~2006 年)的稳定后,又快速下降,目前处于回升阶段。

在组合模型计算中,由于 2003 年之前的原始观测结果没有数字化且已进入档案库,台站只能提供之后的数字化数据,因此只计算了 2003 年以来的时间序列特征。针对过渡桩的位置,本研究考虑了基线中间过渡桩在断层西侧(图 6a)和断层东侧(图 6b)

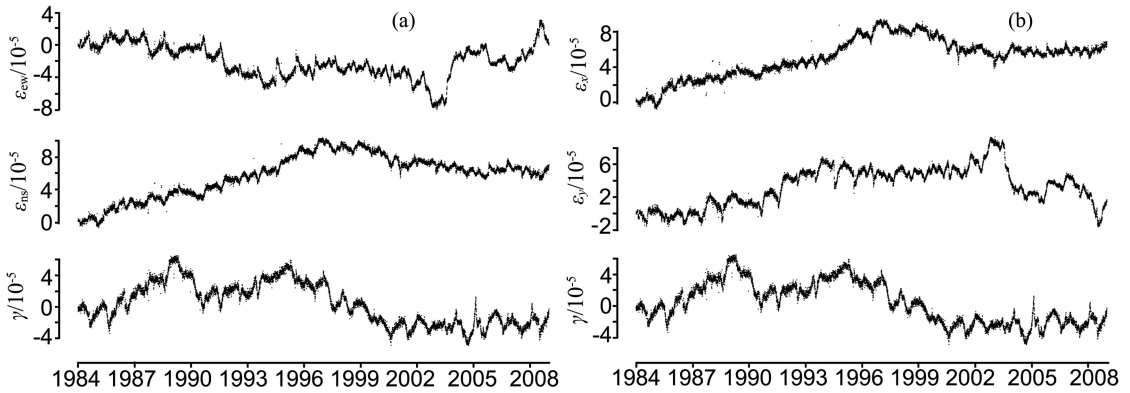


图 5 弹性体模型计算得到的应变序列

(a)地理坐标系下的应变;(b)断层坐标系下的应变。

Fig. 5 Strain time series from the elastic model

(a)Strain at the geographical coordinate;(b)Strain at the fault coordinate.

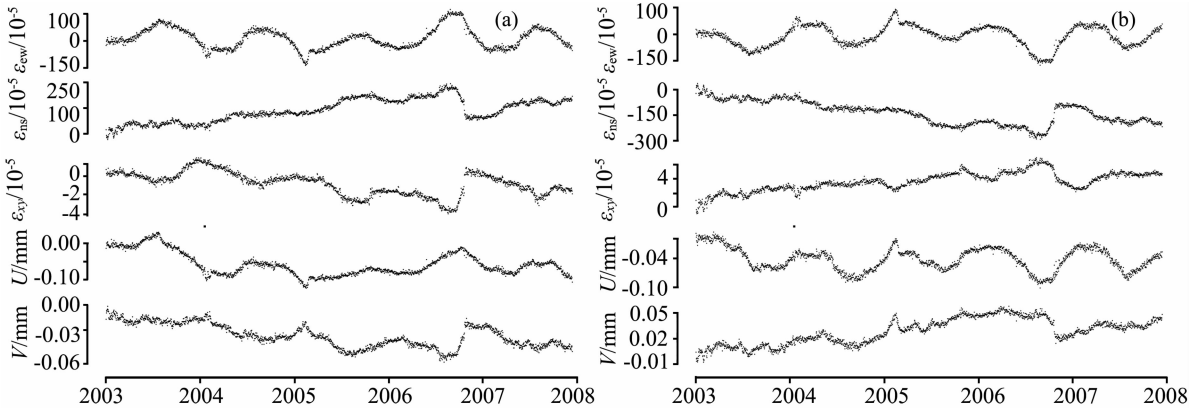


图 6 组合模型计算得到的应变及断层位移序列

(a)假定过渡桩在断层西侧;(b)假定过渡桩在断层东侧。

Fig. 6 Strain and displacement time series from the combination model

(a)Assumed that the connection point is located at the west side of the fault;

(b)Assumed that the connection point is located at the east side of the fault.

两种情形,分别进行了模型计算.在图6中,应变序列的坐标是地理坐标系下的结果,位移序列采用的是断层坐标系的计算结果.

从图6对比可以看出,对过渡桩C不同位置,对应的计算结果基本上呈相反的变化趋势.对 ϵ_{ew} 序列,年变特征比较显著,整个的变化幅度 3.0×10^{-3} ,总体在2004年和2005年初出现了一个小小的扰动,但又迅速恢复到趋势变化中.对 ϵ_{ns} 序列,共同的特征是在2003~2006年下半年段是线性同向变化,之后出现了大幅度的转折,之后又慢慢恢复到原来的变化趋势中.两种不同结果的 ϵ_{xy} 序列,变化有共同特征,即在2003~2006年下半年段是线性同向变化,之后出现了大幅度的转折,之后又慢慢恢复到原来的变化趋势中.但也有所区别,即若过渡桩C在断层西侧,该 ϵ_{xy} 序列年变幅度较小,2006年底到2007年有较大的变化特征;若过渡桩C在断层东侧,该 ϵ_{xy} 序列年变幅度较大,2006年底到2007年没有显著的变化特征.

沿着断层方向的位移U,两种情形下的结果基本反向,最大幅度约0.1 mm,区别在于一个年变幅度较小(C点处于断层西侧),一个年变幅度较大(C点处于断层东侧).而垂直断层方向的位移V,计算结果基本相反,最大幅度约0.06 mm,但在2005年初有一个同方向较为显著的变化.

5 讨论

5.1 不同方向测段组合得到的结果的差异

以刚体模型为例,2个待求参量,2个方程即可

以求解.而实际上有4个测段的数据,可以有多种组合方式,进行联立求解.本研究共计算了10种组合情况,包括4个测段同时使用(1种),其中3个测段组合(4种),其中2个测段组合(5种,平行的2个测段组合没解).图7给出了不同测段组合的联立计算结果.

从趋势变化上看,U序列中,第2、6和10三种组合的结果和其他结果相差较大,V序列中,第3、6和9三种组合和其他结果相差较大.在这些变化较大的测段中,几乎都有测段B12的存在.进一步分析台站的观测环境发现,测段B12所处的位置,有树木遮挡,而其他几个测段均处在太阳能够直射的位置,这种环境的差别是否可以造成这样的差异呢?有待于进一步研究分析.

5.2 三种模型比较

根据已有研究结果显示,台站监测的是倾向NWW的右旋逆冲断层活动特征.在此基础上,可根据短基线和短水准测量结果(图3),依据每条测线在每个时间段的首尾数据变化对台站地裂缝的运动状态进行描述,见表2.

表2基本上可以说明,台站观测结果应该既反映了断层刚性位移,也有弹性应变的结果,因此组合模型应该更符合实际情况.

比较同时时间段内(2003年至今)刚体模型和组合模型计算的断层位移结果可以发现,刚体模型计算的断层位移量幅度(U为0.7 mm,V为1.5 mm)远远大于组合模型计算的位移量幅度(U为0.1 mm,V为0.06 mm),而且得到的沿着断层走向和垂直断层走向的方向上的位移幅度也有显著的大小区别.而

表2 1984年以来唐山台形变序列反映的断层活动状态

Table 2 Fault activity since 1984 based on the time series at Tangshan station

测段	1984-01~1989-01		1989-01~1997-01		1997-01~2002-01		2002-01~2009-01		
	形变/mm	断层性质	形变/mm	断层性质	形变/mm	断层性质	形变/mm	断层性质	
基线	1-2	-0.07	压性	-0.74	压性	-1.38	压性	-1.25	压性
	2-3	-0.23	右旋	2.47	左旋	1.19	左旋	-2.09	右旋
	3-4	2.25	张性	1.79	张性	0.68	张性	-1.18	压性
	4-1	1.81	右旋	2.85	右旋	-1.87	左旋	-0.01	左旋
水准	1-2	-0.43	逆	-1.67	逆	0.92	正	-0.54	逆
	2-3	1.18	逆	4.46	逆	0.04	逆	0.12	逆
	3-4	1.93	逆	3.73	逆	-0.99	正	-0.69	正
	4-1	-2.71	逆	-6.50	逆	0.12	正	1.07	正

注:水准1-2倾向东北,3-4倾向西南,断层走向北东,倾向西北.逆:逆断层活动;正:正断层活动.对于断层面同侧的测段,将靠近断层面的测点近似为在断层面上(实际距离在1 m以内).

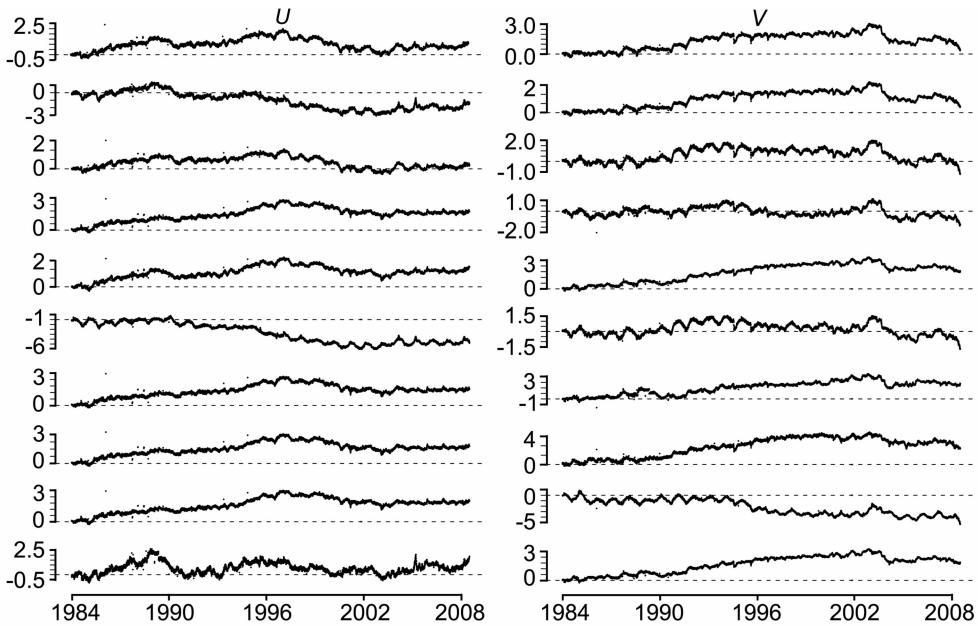


图7 刚体模型中不同个数的测段联立计算位移结果

从上到下依次的组合顺序是:4个测段的组合,3个测段的组合(12-23-34,12-23-41,12-34-41,23-34-41),2个测段的组合(12-23,34-41,23-41,12-41,23-41)。

Fig. 7 Displacements based on different kinds of observation segments in rigid model

From top to bottom, they are different combinations: 4 segments, 3 segments (12-23-34,12-23-41,12-34-41,23-34-41) and 2 segments (12-23,34-41,23-41,12-41,23-41)。

根据实际的短基线观测,垂直断层的两个测段的变化幅度(2~4 mm)小于与断层大角度交叉的两个测段的变化幅度(6~10 mm),即沿着断层走向的位移幅度应该大于垂直断层走向的位移幅度。而且,2003年以来各个测段的观测曲线变化平稳。由此可以推断,与刚体模型计算的结果相比,组合模型计算的结果更接近实际的变化,即刚体模型可能将部分弹性应变的变化归结到断层位移了。

弹性体模型计算的2003年至今的东西向应变幅度为 9×10^{-5} ,南北向应变幅度为 2×10^{-5} 。组合模型计算的东西向应变幅度为 10×10^{-5} ,南北向应变幅度为 6×10^{-5} 。即组合模型得到的弹性应变比纯弹性模型计算的应变要稍大一些。这可能反映出断层的刚性位移作用会抵消弹性变形的部分作用。

根据表2的结果可以发现该断层的受力状态在不断地调整,断层不同部位的受力特征也不尽相同。断层从整体受压的逆断层活动慢慢变化为整体受拉伸作用呈正断层活动特征,同时伴随着一定的扭动变化。在断层的东北部一直表现为压型逆断层活动,在断层的西南部表现为张型由逆到正的活动。进一步比较过渡桩的两种位置假设下的计算结果,可认为断层受到东西向力的作用大于南北向力的作用,断层应该是右旋活动状态,则 U 应该是正值,因此

中间过渡桩处于断层东侧的可能性更大一些。

5.3 局部应变与大面积应变的比较

根据已有的GPS研究结果^[11,12],华北地区的区域年应变速率在 10^{-9} ,而本文利用台站计算的结果为 10^{-5} ,远远大于GPS的计算结果。这一方面可能与华北地区应变率相对较小有关。朱守彪等^[13]研究结果表明,在变形小的中国东部地区目前GPS的观测精度还不能完全满足地应变率精确计算的要求。这可能也适用于台站的短水准和短基线观测数据。可能台站仪器观测的数据是气温变化导致的结果,并非反映的是断层信息,这有待于进一步的研究分析。另一方面可能说明,位于断层附近,或者断层破碎带内的应变变化的确很大,但随着距离断层距离的增加,应变幅度快速衰减。由于华北地块相对整体性的运动,使得局部的应变集中无法体现。

6 结论

本研究通过三种不同动力学模型对唐山台短基线数据的分析,可以得到以下认识:

(1)三种不同模型的对比分析结果可以说明组合模型最符合实际观测结果。在唐山台所处的断层附近区域,在发生弹性形变的同时,也有断层错动的

作用. 通过台站短基线数据计算的应变序列表明, 处于断层附近或者破碎带内的应变变化远大于远离断层的地区的应变变化. 断层目前的活动状态是处于压型的正断层右旋活动.

(2)通过对基线过渡桩不同位置的假设得到的结果分析, 初步判断该过渡桩位于断层东侧的可能性更大一些.

致谢 感谢中国地震局第一监测中心黄立人、谢觉民老师的宝贵意见.

参考文献(References)

- [1] 中国地震局监测预报司. 地震监测预报 40 年. 北京:地震出版社, 2007
Department of Monitoring and Prediction, CEA. Earthquake Monitoring and Prediction in the Past 40 years (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007
- [2] 李 华, 黄声明, 陈新泽. 福建天马定点形变台形变异常特征研究. 大地测量与地球动力学, 2008, **25**(4):59~62
Li H, Huang S M, Chen X Z. Study on characteristics of deformation anomaly at Tianma station of Fujian. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2008, **25**(4):59~62
- [3] 周如品. 短水准、短基线测量与道孚地震. 四川地震, 2005, **3**:34~37
Zhou R P. Leveling and short baseline observation data and Daofu earthquake in 1981. *Earthquake Research in Sichuan* (in Chinese), 2005, **3**:34~37
- [4] 郭良迁, 马 青, 杨国华. 华北地区主要构造带的现代运动和应变. 国际地震动态, 2007, **7**:67~75
Guo L Q, Ma Q, Yang G H. Contemporary motion and strain of major tectonic zones in North China. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2007, **7**:67~75
- [5] 李延兴, 徐 杰, 陈聚忠等. 邢台、渤海、海城和唐山大地震震中区现今应变场的基本特征. 华北地震科学, 2006, **24**(2):36~39
Li Y X, Xu J, Chen J Z, et al. Basic characteristics of current strain field in the epicentral area of Xingtai, Bohai, Haicheng and Tangshan strong earthquake. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 2006, **24**(2):36~39
- [6] 杨国华, 张风霜, 韩月萍等. 华北地区现今水平运动场的动态特征. 地震, 2007, **27**(2):1~8
Yang G H, Zhang F S, Han Y P, et al. Dynamic characteristics of nowadays horizontal movement field in North China region. *Earthquake* (in Chinese), 2007, **27**(2):1~8
- [7] 唐方头, 张培震, 邓志辉等. 华北地区主要断裂带的现今运动特征. 煤田地质与勘探, 2005, **33**(1):4~6
Tang F T, Zhang P Z, Deng Z H, et al. Present motion character of main fault zones in North China. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2005, **33**(1):4~6
- [8] 梅世蓉主编. 一九七六年唐山地震. 北京:地震出版社, 1982. 4~23
Mei S R chief editor. The Tangshan Earthquake of 1976 (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 4~23
- [9] 尤惠川, 徐锡伟, 吴建平. 唐山地震深浅构造关系研究. 地震地质, 2002, **24**(4):571~582
You H C, Xu X W, Wu J P, et al. Study on the relationship between shallow and deep structure in the 1976 Tangshan earthquake area. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2002, **24**(4):571~582
- [10] 谢觉民, 华彩虹. 唐山地震发震断层动态及其与较强晚期余震的关系. 地震地质, 1999, **21**(1):18~20
Xie J M, Hua C H. Study on seismogenic fault's behavior of Tangshan earthquake and its relation with stronger late aftershocks. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1999, **21**(1):18~20
- [11] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 2001, **294**:574~577
- [12] 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑), 2003, **33**(增刊):12~20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Strong earthquakes and activity in China mainland. *Science China (Series D)*, 2003, **33**(Suppl.):12~20
- [13] 朱守彪, 石耀霖. 由 GPS 站点速度观测误差引起的应变率计算结果的误差分析. 大地测量与地球动力学, 2007, **27**(6):51~57
Zhu S B, Shi Y L. Error analysis of strain rates resulted from errors of GPS measurement. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2007, **27**(6):51~57

(本文编辑 何 燕)