

板块内部层状负位错模型及其反演

伍吉仓¹ 邓康伟² 陈永奇²

(1 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号 200092)

(2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红磡)

摘要: 提出了一种层状负位错模型, 用于描述下层地壳拖带上层地壳的耦合作用所造成的上伏地壳变形, 并通过模拟计算, 给出了这种层状耦合模型的形变场特征, 以及利用模拟形变数据反演层状负位错模型参数的结果。

关键词: 形变测量; 负位错; 构造运动; GPS

中图法分类号: P312; P223.0

随着现代大地测量理论和技术的发展, 尤其是GPS观测精度的提高, 不但可以观测到地震引起的地表位移和形变, 而且可以观测到震后形变、孕震形变、构造运动形变等微小地壳形变^[1, 2]。目前, 地壳形变监测主要集中在板块的边界带和现今地壳活动活跃的地区。如横跨美国南加州圣安德烈斯断层的连续GPS观测网^[3]; 遍布日本岛弧的连续GPS网^[4]; 我国地壳形变网络工程建设的连续GPS监测网^[5-7]等。通常地壳形变的量级微小, 持续的时间很长, 应变的量级一般在 $10^{-7}/a$ 左右^[8]。板块构造运动通常在几十年乃至数百年内保持不变。通过长期持续的大地测量观测就有可能发现地壳形变的累积量以及变形分布的不均匀性。这些形变观测数据为研究地壳形变的物理机制提供了边界约束条件。一种常用的研究地壳形变的方法就是用弹性位错模型来表述活动断层运动造成的地表变形, 然后用观测得到的地壳形变数据反演断层的位错模型参数^[9, 10]。这种方法对板块边界的形变数据解释很成功。但是, 对于在像我国以板内地壳形变占主导的地壳形变数据解释中, 一些地区的活动断层不明显, 地壳形变很大程度上是下层地壳拖带上层地壳的耦合作用所造成的, 很难用断层位错来描述地壳形变。

所驱动的。在板块内部, 设想在地幔对流的驱动下, 下地壳拖带上地壳一起运动。但是由于上伏地壳的横向不均匀性以及地质构造的不均匀性, 在统一的下地壳(幔)运动驱动下, 势必有一些上伏地块运动较快(较强耦合), 有一些运动较慢(较弱耦合), 但由于惯性和周边限制的关系, 上伏地块的运动总是小于等于下地壳的运动。这样就会在上伏地壳的底面产生阻碍下地壳运动的应力累积区, 如图1中阴影所示的区域。一方面, 这种由于阻碍而引起的层间应力累积会造成上伏地壳的变形; 另一方面, 在这些不同强度的阻碍区域的边缘有可能形成剪切带, 这些剪切带很有可能是未来破裂地震的地方, 也是划分板内次一级块体的依据。

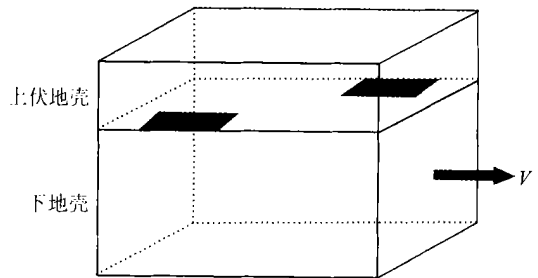


图1 板块内部构造运动模型

Fig. 1 Intraplate Tectonic Movement Model

1 层状负位错模型

根据地幔对流学, 板块运动是由于地幔对流

为了研究上述阻碍部分引起的上伏地壳形变, 笔者采用负位错来表示层间阻碍作用的形变机制, 即地表观测到的测站位移是区域构造运动

加上分布在上伏地壳底部阻碍区域构造运动的负位错造成的变形,即

$$y = V + f_{\Sigma} \quad (1)$$

式中, y 表示观测到的形变量(位移或速度); V 表示区域恒定的构造运动(位移或速度),也就是上述的下地壳运动; f_{Σ} 是负位错分布造成的地壳形变。Okada^[11,12]给出了弹性半无限空间中计算 f_{Σ} 的解析表达式,它是位错面长度、宽度、埋深、倾角及位错矢量的函数。这样,只要给定了水平负位错面长宽大小和深度,以及负位错矢量的分布,就可以按式(1)计算地表的形变。

为了了解地壳深部分片有差异的水平层状负位错分布的地表形变场特征,假定图2所示的水平负位错分布。水平负位错面位于地下15 km处。 $O-XY$ 为建立于水平负位错面内的直角坐标系。负位错分布以 $Y=0$ 为界分为两部分,负位错分布I位于 $Y>0$ 部分,大小为1.0m,方向沿 X 轴负向,与构造运动相反;负位错分布II位于 $Y<0$ 部分,大小为0.5m,方向也与构造运动相反。该两负位错面的参数列于表1中。考虑到位错面边界效应的影响,笔者集中考察图中矩形所示的中心部分(50km×50km)的地表形变。假定区域构造运动方向沿 X 轴正向,大小为1m。

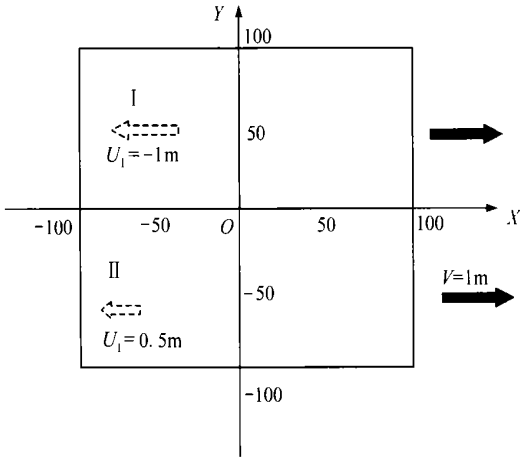


图2 水平负位错分布及区域构造运动
Fig. 2 Horizontal Negative Dislocation Tectonic Movement

表1 水平负位错层模型参数

Tab. 1 Parameters of the Horizontal Negative Dislocation Layer

负位错面	长度/km	宽度/km	深度/km	倾角/°	位错分量/m	
					U_1	U_2
I	200	100	15	0	-1.0	0
II	200	100	15	0	-0.5	0

注: U_1 为走滑位错分量; U_2 为倾滑位错分量。

通过编写相应的计算程序^[8],按式(1)计算了中心矩形区域的地表形变量,其中水平位移分布如图3所示,垂直位移分布如图4所示。

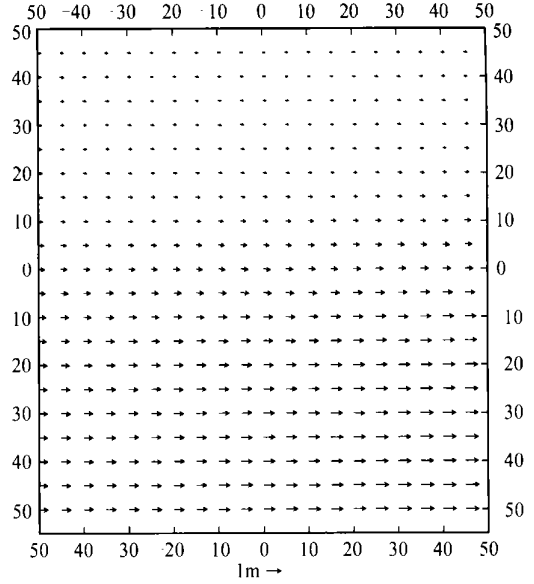


图3 水平层状负位错模型的地表水平位移分布
Fig. 3 Horizontal Ground Displacements by the Horizontal Negative Dislocation Layer

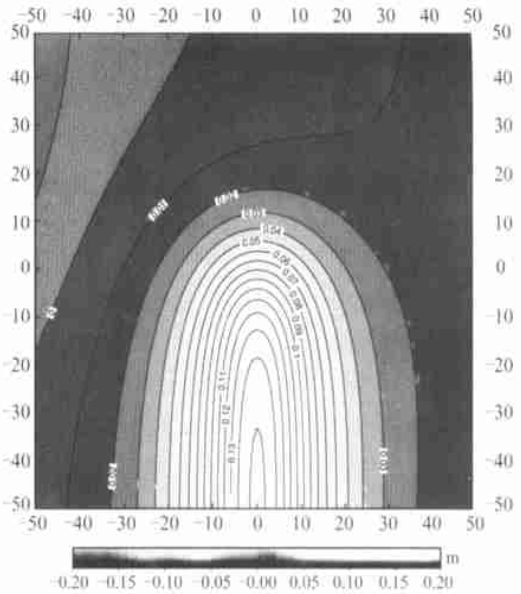


图4 水平层状负位错模型的地表垂直位移分布
Fig. 4 Vertical Ground Displacements by the Horizontal Negative Dislocation Layer

从图3可以看出,对于负位错大小与构造运动相等的上伏地壳表面,水平形变量很小($Y>0$ 部分)。地表水平位移同构造运动与负位错量的差有大致相同的量级。另外,在负位错面I和负位错面II的交界处($Y=0$ 附近),地表位移有明显差异,构成了一个剪切带。不难想像,这个剪切带一直从地表延伸到地下15 km,即直到假定的

负位错面所在之处, 而且剪切的强度随深度的增加而增加。所以, 在这种底层驱动模式下, 地震破裂通常都是在地下最大剪切处开始, 而沿剪切带或薄弱面向上下传播。

从图 4 可以看到, 大部分垂直位移的大小都在负位错量的百分之几, 最大到十分之几。另外, 在负位错量较小(岩石相对较弱)的上伏地壳表面产生与剪切带近乎正交的窄带隆起。这或许能解释板块内部存在的一些带状隆起。

2 模型参数反演

通过多期大地测量, 比如 GPS 测量, 可以得到地表测点的位移或速度。根据式(1), 可以通过这些观测到的地表位移, 来反求地下负位错量的分布, 一般称之为大地测量数据反演。如果顾及位错面的形状参数, 及位错面的长、宽、倾角等, 该反演问题是一个非线性反演问题, 其解不惟一^[8]。对于本文讨论的反演问题而言, 假定负位错面的位置及形状都已知, 则仅仅反演位错面上的位错分量。这是一个线性反演问题, 通常并不知道地下负位错分布的分片位置和位错量的大小。为此假定在研究区域的某个深度存在一个水平的负位错面, 将该负位错面按一定步长作格网划分。假定在每一个格网中负位错矢量的分布是一样的, 而在不同格网中负位错矢量可以不一样。这样, 式(1)可以写成:

$$y = V + \sum_i^N \sum_j^M f_{ij}(U_{1ij}, U_{2ij}) + \epsilon \quad (2)$$

式中, U_{1ij} 、 U_{2ij} 是第 ij 个格网的走滑位错分量和倾滑位错分量 ($i=1, 2, \dots, N$; $j=1, 2, \dots, M$), 网格总个数为 MN ; ϵ 是测量随机误差。一般来说, 在地面观测数据有限的情况下, 当网格细分时, 未知数的个数将有可能大于观测数据的个数, 式(2)反演问题的解未定。这时采用顾及参数先验信息的贝叶斯反演方法来迭代求解^[8, 13]。

将图 3 计算得到的矩形区域的地表位移加上数学期望为 0、均方差为 0.005m 的正态分布随机数, 作为模拟地表观测数据。水平负位错面也取图 2 中部所示的矩形区域, 深度为 15km, 格网的边长取 10km, 这样格网总数为 $MN=110$ 。假定所有负位错的走滑分量初值为 $-0.5m$, 倾滑分量的初值为 0, 采用笔者自行编写的贝叶斯反演程序^[8], 可以解算每一个格网中的负位错矢量, 结果绘制于图 5 中。

从图 5 可以看出, 数据残差 80% 以上小于

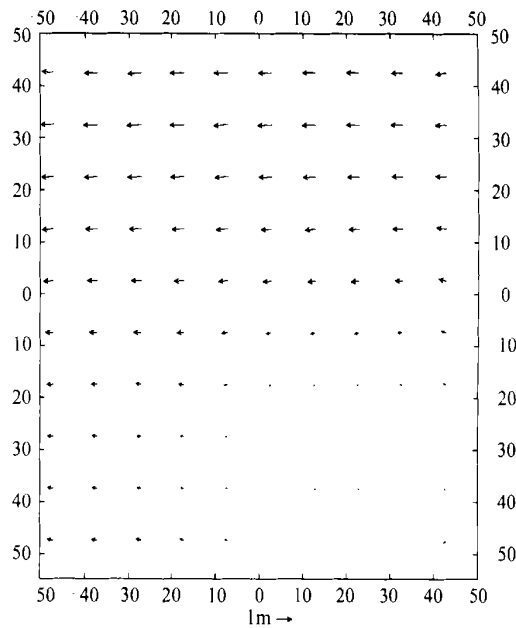


图 5 反演得到的 15km 处水平负位错分布及数据残差分布

Fig. 5 Negative Horizontal Dislocation Distribution Layer at Depth of 15km Obtained by Inversion and the Histogram of Data Residuals

0.05m, 即小于地表形变量的 5%。另外, 反演后数据残差的分布(图 5 的上方的直方图)基本上成正态分布, 反映了数据随机误差对反演结果的影响。从负位错的分布来看, 在 $Y=0$ 处存在分界, 越往 Y 轴正向, 负位错越接近理论值 ($-1.0m$); 而在 $Y<0$ 的下半部, 反演得到的结果与理论值 ($-0.5m$) 相差较大, 表明可能存在较大的模型误差。但是, 理论上在地下 15km 的层面, 负位错面沿 $Y=0$ 分区的特性在反演结果中得到了较好的体现。

3 结 语

利用地下水平负位错层分布来描述板内块体在由下而上的构造运动驱动下的形变机制, 是一种有意义的尝试。模拟算例表明, 在不同大小的水平负位错层分布的边界位置, 上伏地壳存在明显的地表位移差异, 形成形变剪切带, 其大小可以通过大地测量方法来测量。另一方面, 模拟反演结果表明, 利用地表形变观测数据, 结合区域地质构造等先验信息, 能较好地反映出深部负位错层分布的大致情况, 进而确定不同位错大小的深部水平负位错面的边界。这些边界应该是剪切应变累积的带状区, 也是未来发生地震的可能地方。本文的方法可应用于实际的板内地壳形变数据解释, 从而根据反演得到的深部负位错分布来定量

划分次一级板块, 以及确定次一级板块的边界带状区, 评估地震发生的危险区。

参 考 文 献

- 1 Shen Z K, Zhao C K, Yin A, et al. Contemporary Crustal Deformation in East Asia Constrained by Global Positioning System Measurements. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 5 721 ~ 5 734
- 2 Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements. *Science* 2001, 294: 574 ~ 577
- 3 Hudnut K W, Bock Y. The Southern California Integrated GPS Network (SCIGN). *The International Workshop on Seismotectonics at the Subduction Zone*, Tsukuba, 1999
- 4 Kato T, ElFiky G S, Oware E N. Crustal Strain in the Japanese Island as Deduced from Dense GPS Arrays. *Geophysical Research Letters* 1998, 25: 3 445 ~ 3 449
- 5 李延兴, 胡新康, 赵承坤. GPS 监测网数据处理方案研究. *测绘学报*, 1999, 28(1)
- 6 王小亚, 朱文耀. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变. *地球物理学报*, 2002, 45(2): 198 ~ 208
- 7 许才军, 董立祥, 李志才. 华北地区地壳形变的 GPS 及地震矩张量反演分析. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25: 471 ~ 476
- 8 Wu J C. *Inverse Analysis of Crust Deformation Measurements*; [Ph. D Dissertation]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1999
- 9 Matsu'ura M, Jackson D D, Cheng A. Dislocation Model for Aseismic Crustal Deformation, at Hollister, California. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91: 12 661 ~ 12 674
- 10 Wu J C, Xu C J, Chao D B, et al. Research on an Intraplate Movement Model by Inversion of GPS Data in North China. *Journal of Geodynamics* 2001, 31: 507 ~ 518
- 11 Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half Space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1985, 75: 1 135 ~ 1 154
- 12 Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Fault in Half-Space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1992, 82: 1 018 ~ 1 040
- 13 Jackson D D, Matsu'ura M. A Bayesian Approach to Nonlinear Inversion. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 581 ~ 591

第一作者简介: 伍吉仓, 副教授, 博士。研究方向: 物理大地测量等。

Negative Dislocation Layer for Intraplate Tectonic Movements and Inversion

WU Jicang¹ DENG Kangwei² CHEN Yongqi²

(1 Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai, China 200092)

(2 Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkan, Hong Kong)

Abstract: A horizontal negative dislocation layer is proposed to represent the mechanism of the intraplate crustal deformation. A simulated example is designed to show the crustal deformation pattern of a horizontal negative dislocation layer model and inverse the simulated displacements to determine the model parameters. Because of the heterogeneous geological structures and rock properties of the overlying crust, the coupling between the lower crustal movements and the overlying upper crust is not homogeneous, and the shear deformation zone will occur along the boundary of the different negative dislocation areas. On the other hand, the observed deformation data such as displacements can be used to determine the layer negative dislocation distributions inversely, so as to divide the monitoring area into different tectonic blocks and to analyze the earthquake risks.

Key words: deformation surveying; negative dislocation; tectonic movement; GPS

About the first author: WU Jicang, associate professor, Ph. D. He majors in physical geodesy, etc.

(责任编辑: 晓晨)