

震后松弛过程的粘弹性模型在 1997 年 Mw7.6 玛尼地震中的应用研究

许才军¹ 汪建军¹ 温扬茂¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:采用麦克斯韦体模型、标准线性体模型和伯格斯体模型,具体研究了 1997 年玛尼地震在衰减时间 1~100 a 间的震后位移场和库仑应力场。结果表明:① 在 1~5 a 的短期内,采用标准线性体和伯格斯体模型的震后位移场具有时空上的一致性;而在 10 a 以上的中长期内,麦克斯韦单元开始起主要作用,表现为采用麦克斯韦体和伯格斯体模型的震后位移场具有时空上的一致性。② 虽然应力阴影区和应力触发区随时间而同步扩展,但短期内,采用标准线性体和伯格斯体模型的粘弹性库仑应力场的空间结构具有一致性;而中长期内,采用麦克斯韦体和伯格斯体模型的粘弹性库仑应力场的空间结构具有一致性。为更好地解释震后形变及粘弹性库仑应力触发响应,流变模型的选择需要根据研究的时间段和观测数据源具体确定。

关键词:震后松弛;麦克斯韦体模型;标准线性体模型;伯格斯体模型;玛尼地震

中图法分类号:P227

震后松弛理论构成了涵盖诸如冰后回弹、大地水准面和重力变化、极移和震后变形等多种地球物理课题的理论基础^[1]。在震后松弛过程中,下地壳或上地幔的流变物质起着非常重要的作用。它决定着位移场的时空演变模式、整个软流圈和地幔中的应力迁移和其他地震的触发^[2]。尽管下地壳和上地幔的流变物质非常重要,但是在解释震后变形现象中,所选择的与之对应的流变模型(如非线性流变模型^[3]、线性流变模型,最常用的有麦克斯韦体模型^[4]、标准线性体模型^[5]和伯格斯体模型^[6])并没有统一的准则。一般地,岩流圈、下地壳和上地幔等圈层的流变性质通过冰后回弹^[7]和震后变形^[8]反演,但是这和所采用的流变模型又紧密相关,因此,需要分析流变模型间的结构性差异。本文以 1997 年玛尼地震为例,从震后位移场和库仑应力两方面分析了上述三种最常用的模型间的关系,为解释震后形变及粘弹性库仑应力触发所选择的流变模型提供参考依据。

1 三种线性体模型和震后位移场公式

常用的三种线性体模型(麦克斯韦体模型、标

准线性体模型和伯格斯体模型)的类比模型如图 1 所示^[9]。图中, μ 为弹簧的剪切模量, η 为阻尼器的粘度系数,前者刻画弹性响应,后者刻画粘弹性响应。弹簧和阻尼器的串联共同构成麦克斯韦单元器件,它们的并联构成开尔文单元。考虑粘弹性问题时,通常采用对应原理^[10]:经 Laplace 变换后的粘弹性方程和弹性方程在形式上是一致的,当用经过 Laplace 变换的粘弹性介质参数替换弹性问题中的弹性介质参数后,粘弹性问题就可以直接当作弹性问题来处理。因此,粘弹性模型可以用经 Laplace 变换后的介质参数来刻画。伯格斯体模型为:

$$\mu(s) = \frac{\mu_1 s(s + \mu_2/\eta_2)}{(s + \mu_2/\eta_2)(s + \mu_1/\eta_1) + s\mu_1/\eta_2} \quad (1)$$

式中, (μ_1, μ_2) 和 (η_1, η_2) 分别为麦克斯韦单元和

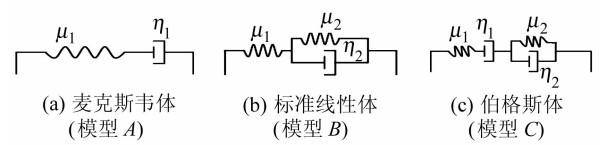


图 1 三种线性体流变模型
Fig. 1 Three Linear Rheological Models

开尔文单元的剪切模量和粘弹性系数; s 为拉普拉斯变量。

当 μ_2 、 η_2 之一逼近无穷大时,式(1)退化为麦克斯韦体模型:

$$\mu(s) = \frac{\mu_1 s}{s + \mu_1/\eta_1} \tag{2}$$

当 η_1 逼近无穷大时,式(1)退化为标准线性体模型:

$$\mu(s) = \frac{\mu_1(s + \mu_2/\eta_2)}{s + (\mu_1 + \mu_2)/\eta_2} \tag{3}$$

对于三种体模型,其统一的位移表达式为:

$$u(r,t) = \sum_i u_i(r,t,\mu(s),\rho,h,F,\varphi_i,\lambda_i) \tag{4}$$

式中,变量 u 代表位移; r 代表地球半径; t 表示震后时间段; i 代表第 i 个位移分量; $\mu(s)$ 、 ρ 、 h 分别为剪切模量、分层密度和分层厚度; F 代表震源参数; φ_i 、 λ_i 表示任意观测点的大地坐标。

若已知地球介质参数(密度、粘度系数、剪切模量、体模量)以及震源参数(坐标、方位角、断层长度、深度、倾角、滑动量及滑动角),基于式(4)可以求解任一时段的震后位移场。反之,震后位移场也可以反演地球介质参数,其反演目标函数^[11]为:

$$\begin{cases} \min \parallel \chi_k^2(t_1,t_2) \parallel \\ \chi_k^2(t_1,t_2) = \sum_i \{ [\hat{x}_k(\hat{r}_i) \cdot v_{cal}(\hat{r}_i;t_1,t_2) - \\ \hat{x}_k(\hat{r}_i) \cdot v_{obs}(\hat{r}_i;t_1,t_2)]^2 / [\sigma_{ik}(t_1,t_2)]^2 \} \\ v(\hat{r}_i;t_1,t_2) = \frac{u(\hat{r}_i,t_2) - u(\hat{r}_i,t_1)}{t_2 - t_1} \end{cases} \tag{5}$$

式中, $\hat{x}_k(\hat{r}_i)$ ($k=1,2,3;i=1,2,\cdots,N$) 为矢径为 \hat{r}_i 的测站 i 处的局部单位基; $\hat{x}_k(\hat{r}_i) \cdot v_{cal}(\hat{r}_i;t_1,t_2)$ 为测站的计算速度分量; $\hat{x}_k(\hat{r}_i) \cdot v_{obs}(\hat{r}_i;t_1,t_2)$ 为测站

的观测速度分量; $\sigma_{ik}(t_1,t_2)$ 为其对应的标准差。

2 玛尼地震震后位移场

为讨论三种模型对震后位移场的影响,本文选择 1997 年 11 月 8 日在青藏高原北部昆仑断层以西发生的 Mw7.6 玛尼地震为例进行分析。

首先选取表 1 中的卫星影像数据,利用两轨法差分干涉测量方法获取玛尼地震的同震地表位移场,然后利用该位移场结合三维半解析粘弹性模型^[12]和遗传算法^[13]反演地震源断层的参数。反演中,将发震断层作为整个 1 段(即单断层)和划分成 7 段两种情况分别进行计算,两种情况的最佳拟合断层参数见表 2。在单断层情况下,反演获得的滑动量为 5.63 m±0.38 m,闭锁深度为 13.7 km±2.3 km,该结果与 Funning 等^[14]的 5.76 m、10.1 km 吻合得比较好;而在分段断层反演情况中,发现最大滑动量发生在第 5 段断层上,其值为 6.62 m±0.57 m,闭锁深度为 13.7 km±1.2 km。这个滑动量及闭锁深度与 Funning 等^[14]的分段断层模型中的最大滑动量 6.73 m、闭锁深度 11.7 km 也比较吻合。据此估计到的大地矩为 2.27×10²⁰ (Mw=7.54),这与地震学的记录(2.23×10²⁰,哈佛 CMT 记录)也非常接近,说明反演的地震断层参数是可靠的。

表 1 研究中使用的降轨 ERS 2 卫星影像数据

Tab.1 Satellite Image of Descending Track ERS2 Data					
编号	干涉像对	垂直基线/m	时间基线/d	轨道号	帧号
IP1	970316-971116	65	245	076	2889/2907
IP2	970819-971202	9	105	305	2889/2907
IP3	970522-971218	-26	210	033	2889/2907

注:垂直基线指干涉图中心处的垂直基线长度。

表 2 1997 玛尼断层参数
Tab.2 Parameters of 1997 Manyi Fault

	纬度/(°)	经度/(°)	长度/km	走向/(°)	闭锁深度/km	滑动量/m	大地矩
1	35.060	86.192	46.0	82.8	-12.2±1.9	1.62±0.21	2.27×10 ²⁰
2	35.112	86.602	25.1	70.4	-10.8±1.0	2.60±0.58	
3	35.188	86.815	31.8	85.6	-11.3±1.4	3.26±0.51	
4	35.210	87.100	19.1	76.9	-12.9±1.8	6.14±0.67	
5	35.249	87.267	16.8	86.2	-13.7±1.2	6.62±0.57	
6	35.259	87.418	45.7	80.3	-11.8±1.7	3.54±0.39	
7	35.328	87.823	19.2	70.4	-11.2±1.2	1.15±0.19	
单断层参数	35.171	86.941	87.4	77.4	13.7±2.3	5.63±0.38	

其次,采用上面获得的地震单断层参数分别采用三种模型的震后松弛模型计算了玛尼地震的震后位移场。封二彩图 1 为地球结构模型^[6,15,16],封二彩图 2 为采用上述三种模型对应的震后松弛模型计算得到的震后位移场间的拟合

度随时间的变化情况。由封二彩图 2 可以看出,在震后短时间内(5 a),采用标准线性体模型和伯格斯特模型的位移场具有良好的空间一致性,位移拟合度不超过 1.5 cm。在 5~20 a,开尔文单元作用减弱,麦克斯韦单元作用增强,表现为采用

标准线性体模型和伯格斯体模型的位移场间的拟合度增大,而采用麦克斯韦体模型和伯格斯体模型的位移场间的拟合度减小。20 a 后,采用麦克斯韦体模型和伯格斯体模型的位移场的拟合度基本稳定在 2.8 cm 的水平。这表明,开尔文单元主要控制位移场的短期效应,麦克斯韦单元则主要控制位移场的长期效应,且流变模型选择的不同对研究震后位移场中长期的差异影响至少是 cm 量级。

3 玛尼地震震后库仑应力场

虽然库仑破裂准则已广泛用于分析发震断层的近场和远场的库仑应力时空分布,解释主震和余震、主震间的作用关系以及预测后续地震^[17,18],如 1992 Landers、1994 Northridge、1995 Kobe、1999 Hector Mine、1999 Izmit、2005 Kashmir 以及 2005 Sumatra 等,但基本上都是研究静态库仑应力触发问题,而关于粘弹性静态库仑应力的震例研究则不多。为此,本文仍然采用玛尼地震通过计算三种流变模型下震后松弛效应造成粘弹性库仑应力的变化情况来讨论粘弹性库仑应力的时空分布与流变模型的关系,分别计算了玛尼地震后 1 a、5 a、10 a、20 a 和 100 a 的粘弹性库仑应力场,其中,剪切模量取值 30 GPa,有效摩擦系数为 0.8。计算结果表明,短期内,采用标准线性体模型和伯格斯体模型的粘弹性库仑应力场在空间分布上近似一致;而长期内,采用麦克斯韦体模型和伯格斯体模型的粘弹性库仑应力场在空间分布上近似一致,且粘弹性库仑应力随衰减时间的增加而不断增强。封二彩图 3 为玛尼地震震后 1 a 和 100 a 时的粘弹性库仑应力场,图中,粗实线表示玛尼地震地表破裂迹线,实点表示震后 1 a 内的余震。

4 结 语

本文研究了 1997 年 Mw7.6 玛尼地震震后位移场与震后松弛模型中的三种线性流变模型间的关系。结果表明,流变模型选择的不同对研究震后位移场中长期的差异影响至少是 cm 量级。目前,利用 GPS 会战模式和连续跟踪站监测地震震后变形的水平精度分别约为 3 mm 和 1 mm,而 PS-InSAR 技术提取的垂直变形场的精度也可达 mm 级,由此采用现代空间大地测量技术监测所

得的震后位移场可以分辨出所选用流变模型的差异。而本文的研究结果也说明,在利用现代大地测量技术观测的震后位移场反演地球深部物质流变效应时,必须顾及震后位移场所处的地震周期中的时段性。

参 考 文 献

- [1] Piersanti A, Spada G, Sabadini R, et al. Global Post-seismic Deformation[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 120: 544-566
- [2] Freed A M, Ali S T, Burgmann R. Evolution of Stress in Southern California for the Past 200 Years from Coseismic, Postseismic and Interseismic Stress Changes [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169: 1 164-1 179
- [3] Freed A M, Burgmann R. Evidence of Power-law Flow in the Mojave Desert Mantle [J]. *Nature*, 2004, 430: 548-551
- [4] Piersanti A, Spada G, Sabadini G. Global Postseismic Rebound of a Viscoelastic Earth: Theory for Finite Faults and Application to the 1964 Alaska Earthquake [J]. *Journal Geophysical Research*, 1997, 102(B1): 447-492
- [5] Pollitz F, Peltzer G, Burgmann R. Mobility of Continental Mantle: Evidence from Postseismic Geodetic Observations Following the 1992 Landers Earthquake [J]. *Journal Geophysical Research*, 2000, 105: 8 035-8 054
- [6] Pollitz F, Burgmann R, Banerjee P. Post-seismic Relaxation Following the Great 2004 Sumatra-Andaman Earthquake on a Compressible Self-gravitating Earth [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(1): 397-420
- [7] Tamisiea M E, Mitrovica J X, Davis J L. Grace Gravity Data Constrain Ancient Ice Geometries and Continental Dynamics over Laurentia [J]. *Science*, 2007, 316(5 826): 881-883
- [8] Hammond W C, Kreemer C, Blewitt G. Geodetic Constraints on Contemporary Deformation in the Northern Walker Lane; 3, Central Nevada Seismic Belt Postseismic Relaxation [C] / Oldow J, Cashman P. Late Cenozoic Structure and Evolution of the Great Basin. *Sierra Nevada Transition: Geol Soc Am Bull*, 2007
- [9] Hetland E A, Hager B H. Postseismic and Interseismic Displacements Near a Strike-slip Fault: a Two-dimensional Theory for General Linear Viscoelastic Rheologies [J]. *Journal Geophysical Research*, 2005, 110: B10401
- [10] Peltier W R. The Impulse Response of a Maxwell

Earth[J]. Rev Geophys Space Phys, 1974, 12(4): 649-669

[11] Pollitz F. Transient Rheology of the Uppermost Mantle Beneath the Mojave Desert, California[J]. Earth Planet Sci Lett, 2003, 215: 89-104

[12] Smith B, Sandwell D. A Three-dimensional Semi-analytical Viscoelastic Model for Time Dependent Analysis of the Earthquake Cycle[J]. Journal Geophysical Research, 2004, 109:B12401

[13] Carrol D. Chemical Laser Modeling with Genetic Algorithm[J]. AIAAJ, 1996, 34(2): 338-346

[14] Funning G, Parsons B. Wright T. Fault Slip in the 1997 Manyi, Tibet Earthquake from Linear Elastic Modeling of the InSAR Displacement[J]. Geophysical Journal International, 2007, 169: 998-1 008

[15] Dziewonski A, Anderson D. Preliminary Reference Earth Model[J]. Phys Earth Planet Inter, 1981, 25: 297-356

[16] 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的粘弹性应力触发研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 787-795

[17] Stein R, King G, Lin J. Change in Failure Stress on the Southern San Andreas Fault System Caused by the 1992 Magnitude=7.4 Landers Earthquake[J]. Science, 1992, 258(1): 1 328-1 332

[18] Parson T, Toda S, Stein S, et al. Heightened Odds of Large Earthquake Near Lstanbul: an Interaction-based Probability Calculation [J]. Science, 1999, 288:661-665

第一作者简介: 许才军, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者。主要研究方向为大地测量学与地球动力学、InSAR 与 GPS 数据融合处理理论与应用。
E-mail: cjxu@sgg. whu. edu. cn

Study of Visoelastic Rheological Model for Posteismic Relaxation:
A Case Study on 1997 Mw7.6 Manyi Earthquake

XU Caijun¹ WANG Jianjun¹ WEN Yangmao¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: To quantitatively assess the differences born from rheological models on postseismic displacements and viscoelastic Coulomb stress changes, for 1997 Manyi earthquake after decay time from 1 year to 100 years when employing three linear rheological models, namely, Maxwellian model, standard linearsolid model, and Burges model. The results show that: ① During transient phase, from 1 to 5 years after Manyi event, standard linearsolid model and Burges model are nearly the same as the other two ones. While during the later phase, starting from 10 years later, Maxwell element does and so are those with Maxwellian model and Burges one. ② Similar is their influence on spatial pattern of viscoelastic Coulomb stress changes, though stress shadows and stress-triggering zones enlarge with time. Such tempo-spatial patterns of postseismic displacement field and viscoelastic Coulomb stress changes are consistent with the point that Burges rheological model is general compared with the other two. The uniqueness of rheological model should be figured out by a case-to-case study involving some kind of recursive determination of rhological model through multiple data sources such as GPS, InSAR, levelling, and those measured at different time-intervals so as to explain kinemics of displacement because of postseismic relaxation.

Key words: postseismic relaxation; Maxwellian model; standard linearsolid model; Burges model; Manyi earthquake

About the first author: XU Caijun, professor, Ph. D, Ph. D supervisor, Changjiang Scholars, majors in geodesy and geodynamics, theory and algorithm of syncretizing data of GPS and InSAR and its application.
E-mail: cjxu@sgg. whu. edu. cn