

利用 GPS 和海底基准点观测形变反演日本大地震(Mw 9.0)同震断层滑动分布

李志才¹ 张 鹏¹ 温扬茂² 廖 瑛³

(1 国家基础地理信息中心大地测量部,北京市海淀区紫竹院百胜村1号,100048)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(3 中国空间技术研究院503所,北京市海淀区知春路82号院,100086)

摘 要:收集了国际上发布的通过日本区域密集的地表观测数据获得的高精度同震形变位移,同时收集了靠近震中的5个海底基准点观测到的同震变形。基于以上结果采用分断层滑动模型,基于分层弹性半空间位错理论,采用二阶拉普拉斯平滑算子方法约束断层面上的滑动量,利用最速下降法求解模型的最优解,以期精细化该地震断层的滑动分布,进而研究其地震活动机制。研究结果表明,日本地震断层的平均滑动为6.95 m,最大滑动量为58.70 m,位于东经143.17°,北纬38.25°,地震所释放的能量为 4.48×10^{22} N·m(等效震级为 Mw 9.07),地震断裂主要集中在东经142°~143.8°,北纬37.2°~39.5°,海平面以下10~30 km之间区域。

关键词:同震变形;GPS;海底基准点;断层滑动;反演
中图分类号:P228.41; P227

2011-03-11,北京时间13时46分,日本东北部海域发生里氏9.0级地震并引发海啸,地震震中位于宫城县以东太平洋海域(北纬38.1°,东经142.6°),震源深度20 km。此次发生的大地震位于日本海沟西侧的日本东海岸,是由于太平洋板块沿日本海沟向西俯冲欧亚板块之下,致使欧亚板块向东反弹逆冲所致,导致震后数10 min 钟内日本东海岸又遭受最高浪高达10 m 的海啸袭击。地震发生后还发生了多次余震(图1)。

地震发生后,通过收集该区域已建成的GPS连续运行站网观测到的数据结果,发现该地震导致岩手县山田町向东南移动了25 cm,千叶县铍子市则移动了17 cm,宫城县牧鹿半岛向东南移动了5.3 m,同时还下沉了1.2 m(图2、图3空白箭头所示)。而对设置在宫城、福岛海域的3个海底基准点调查发现,宫城东南部120 km 海底的海底基准点发生了最大幅度变化,这里的海底向东南方向移动了24 m,海底高度也增加了3 m,而另两个海底基准点也发生了变动,设置在距离宫城70 km 海底的基准点向东南移动了15 m,设

置在福岛海域海底的基准点距离震源地较远,移动了约5 m^[1]。

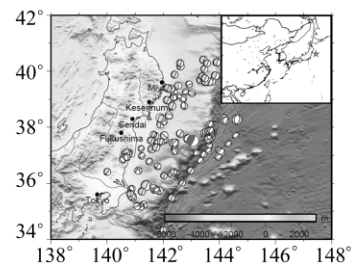


图1 日本大地震及余震示意图

Fig. 1 Main Earthquake and Post-earthquake Distribution

日本 Mw 9.0 地震发生后,国内外学者首先利用地震波进行了断层机制的初步反演,利用分布在国际不同位置的地震观测台站,反演了日本断层的活动机制及滑动分布^[2-7]。陈运泰院士研究小组在地震发生后约5 h 左右测定和发布了破裂过程快速反演结果(第二版)。反演结果显示断层面整体破裂长度为400~500 km,释放的地震矩约为 9.2×10^{22} N·m,对应的矩震级 Mw 约为

收稿日期:2012-11-10。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41074007,41021061,41274030);国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110141130010,20100141120033,20090141110055);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(114035,3101036)。

8.6。Ji Chen 教授的研究团队发现断层以走滑 198°, 倾角 10°符合得结果最好, 反演的地震矩丈量达到 0.575×10^{30} dyne。Charles 等研究表明, 释放的地震矩为 3.9×10^{22} N·m (Mw 9.0), 破裂时间持续了 71 s。

基于 GPS 观测的同震形变解析结果显示, 地震是由长约 500 km、宽约 200 km 的巨大断层出现最大 20m 的位移而引发^[1,5]。而国内外相关组织和专家均利用 GPS 观测值进行了相关反演工作^[8-10], 刁法启等利用 GPS 观测的 Mw 9.0 日本仙台地震同震形变及震后 8 h 的地表形变, 反演了主震及震后 8 h 的断层的位错分布^[10]。

就本人前期的研究工作来看, 基于地震波反演的断层滑动分布具有较大的误差, 其计算出来的同震形变场与实际观测的结果有较大的差别^[11-13]; 而国外相关学者的研究成果从形变场的模拟来看已经具备较好的符合性, 但是仍然有局部不符合性。本文基于这些研究的不足, 提出利用分断层滑动模型^[14], 采用二阶拉普拉斯平滑算子方法约束断层面上的滑动量^[15], 利用最速下降法求解模型的最优解, 以期精化该地震断层的滑动分布, 进而研究其地震的活动机制。

1 反演模型及方法

为简化反演过程, 本文采用文献^[6]的研究结果作为初始值, 将发震断层走向固定为 194.4°, 埋深固定为 7.5 km。此外, 通过对余震分布特征的分析^[7], 研究中将发震断层的最上端的倾角固定为 10°, 并逐渐线性增加到深部最下端的 20°, 同时将断层面的长度和宽度分别拓宽至 620 km 和 260 km。其后将该断层面沿走向和倾向划分成 10 km×10 km 大小的 1 612 个格网来进行断层面上的滑动量反演。反演的目标函数为:

$$\min [\| d - Gm \| + \beta^2 H(\tau)]$$

式中, G 为基于矩形位错模型^[14]的格林函数矩阵; m 为断层面上的待求滑动量; d 为 GPS 观测数据; τ 为断层面上分布式滑动所造成的剪切应力降; β^2 为确定平滑尺度的权比因子, H 为平滑算子, 本文采用二阶拉普拉斯平滑算子来约束断层面上的滑动量。确定好目标函数后, 采用最速下降法来求解模型的最优解。

2 反演结果及分析

图 2 为基于上述反演模型及方法反演出的模

型参数计算出的模型形变场与实际观测的形变场拟合示意图, 其中空心箭头代表实际观测值, 实心箭头代表反演的模型计算值。从反演结果来看, GPS 和海底基准点观测的同震形变场(水平与垂直形变场)与反演模型计算的形变场结果拟合得较好, 观测其 3 个方向(北、东、垂直方向)的 rms (即观测的形变值与模型参数计算的形变值差值平方和开根号)分别由反演前的 0.249 7 m, 0.616 8 m, 0.079 4 m 下降到 0.013 8 m, 0.018 m, 0.026 1 m, 主要原因在于利用地震信息给出的断层参数模拟出的地震破裂变形结果与实际 GPS 观测变形的差值差异较大, 而通过本文方法所反演出的断层滑动参数更接近实际观测结果; 另一方面也说明本文所用的反演方法是有效的, 最终反演的断层参数给出的形变场与实际观测结果在 rms 方面减小了 10 来倍。

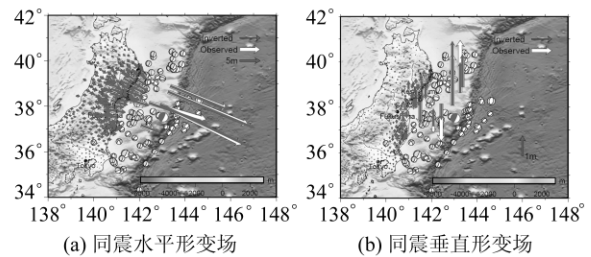


图 2 反演的同震水平、垂直形变场

Fig. 2 Compared Horizontal and Vertical Deformation from Inversion and Observed Information

而从反演的形变场来看, GPS 观测形变场拟合结果较好, 而海底基准点水平形变场拟合的结果较垂直形变场拟合的好, 特别是海底基准点观测的距震中左下方的两个点, 明显拟合得不是很好, 可能因为靠近震中, 所接收的形变信息比较复杂; 或者断层模型不够完全反演形变信息, 需要深入研究。

从图 3 可以看出, 日本地震断层反演的分布结果显示主要滑动集中在距震中 30~150 km 处, 滑动量最大在距震源 30~120 km 处, 量级达到 60 m 左右, 而深度从 10~30 km, 说明日本地震的破裂面主要为震源附近。而从两个滑动分量来看, 倾滑分量主要表现为正, 说明断层破裂方式为逆断层, 断层以向上逆冲为主, 量级最大达到 60 m, 主要集中在震中附近, 距震中 30~120 km; 走滑分量主要表现为震中附近左旋走滑, 量级达到 15 m, 主要集中在距震中 30~120 km 区域; 此外, 在距震中 270 km 处及震中下方 40 km 处有两段右旋分量, 量级大约在 5~10 m 左右。整体来说, 此次地震断层破裂以逆冲为主, 兼具左旋

走滑。

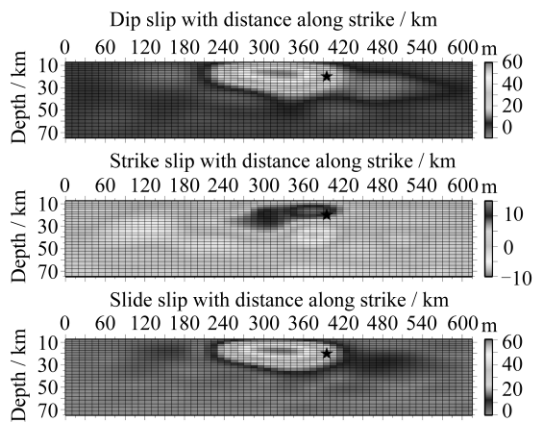


图3 日本地震断层滑动反演分布图
Fig. 3 Inverted Fault Slip Distribution

最终反演的断层滑动结果表明,断层的平均滑动为 6.95m,最大滑动量为 58.70 m,位于东经 143.17°,北纬 38.25°,海面以下 18 km 处,地震所释放的能量为 4.48×10^{22} N·m(等效震级为 Mw 9.07)。基于反演结果本文将反演出的断层滑动分布分别在水平和垂直方向投影画出(图 4),从图 4(a)可以看出,将近 1 612 个格网的断层面投影到水平方向,断层滑动最大处位于震中东偏北方向,大致在 50~60 m 之间;而从图 4(b)垂直方向看来,断层最大滑动处位于海平面以下 20 km 左右,地震断裂主要集中于东经 142°~143.8°,北纬 37.2°~39.5°,海平面以下 10~30 km 之间区域。

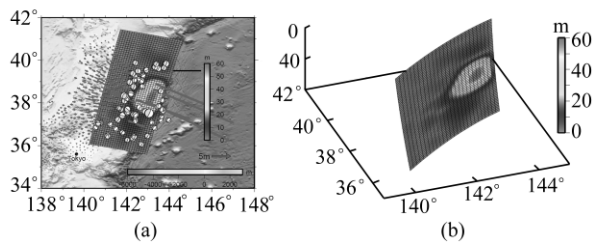


图4 反演的发震断层滑动分布
Fig. 4 Seismic Fault Slip Distribution Inversion

本文反演的结果与目前国际上主流杂志发表的结果非常接近,如 Takeo 等^[9]基于大地测量观测数据,采用了 900 km×400 km 区域作为模型源,并将其分成 35×15 的矩形,采用预处理共轭梯度法进行反演,反演的结果显示地震矩为 4.1×10^{22} N·m,等效震级 9.0,断层破裂最大滑动达到 60 m;而 Simons 等^[5]基于 GPS 和地震波联合反演结果也证明了地震断层破裂最大处达到 50 m。

3 结 语

本文利用日本 GPS 连续观测的形变数据加上 5 个海底基点数据,采用断层滑动模型,基于分层弹性半空间位错理论,采用二阶拉普拉斯平滑算子方法约束断层面上的滑动量,利用最速下降法求解模型的最优解,以期精化日本地震断层的滑动分布。反演的结果与国际上最新结果基本相符,说明本文反演方法和算法还是比较切实可行的。反演结果表明,断层的平均滑动为 6.95 m,最大滑动量为 58.70 m,地震所释放的能量为 4.48×10^{22} N·m(等效震级为 Mw 9.07)。整体来说,此次地震断层破裂以逆冲为主,兼具左旋走滑。日本地震的破裂面主要位于东经 143.17°,北纬 38.25°,海面以下 18 km 处。

参 考 文 献

- [1] Sato M, Ishikawa T, Ujihara N, et al. Displacement Above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake[J]. Science, 2011, 332: 1 395
- [2] 张勇,许力生,陈运泰. 2011年3月11日日本本州东海岸近海地震破裂过程快速反演结果[OL]. http://ddsep.cea-igp.ac.cn/rp/2011/20115_e74367081165e565e5672c672_c5dde4_e1c6d775_cb_88_fd16d_7757309707783488c28fc77a0b5feb901f53cd_6f147_ed_3679cv2, 2012
- [3] Shao Guangfu, Li Xiangyu, Ji Chen. Preliminary Result of the Mar 11, 2011 Mw 9.1 Honshu Earthquake[OL]. http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2011/03/0311_v3/Honshu.html, 2012
- [4] Charles J, Thorne L, Hiroo K. A Rupture Model of the Great 2011 Tohoku Earthquake[J]. Earth Planets Space, 2011, 63:693-696
- [5] Simons M, Minson S E, Sladen A, et al. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries[J]. Science, 2011, 332(6 036): 1421-1425
- [6] Hayes G. Updated Result of the Mar 11, 2011 Mw 9.0 Earthquake Offshore Honshu, Japan[OL]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/finite_fault.php, 2012
- [7] Hayes G. Subduction Zone Geometry Analysis: Preliminary SZGC Results for M 8.9 Earthquake near East Coast of Honshu, Japan[OL]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/subduction_zone/usc0001xgp/, 2012
- [8] Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al. Coseismic

- and Postseismic Slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki Earthquake [J]. *Nature*, 2011, 475 (7 356), doi:10.1038/nature10227
- [9] Takeo I, Kazuhiro O, Tsuyoshi W, et al. Slip Distribution of the 2011 Tohoku Earthquake Inferred from Geodetic Data[J]. *Earth Planets Space*, 2011, 63: 627-630
- [10] 刁法启, 熊熊, 倪四道, 等. 利用 GPS 位移反演日本 Mw 9.0 仙台地震及 Mw 7.9 强余震静态位错模型 [J]. *科学通报*, 2011, 56 (24): 1 999-2 005
- [11] 李志才, 许才军, 赵少荣, 等. 基于地壳分层的震后变形分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31 (3): 203-208
- [12] 李志才, 许才军, 张鹏, 等. 基于地壳分层的地震断层同震变形反演分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(3): 229-231
- [13] 李志才, 张鹏, 金双根, 等. 基于 GPS 观测数据的汶川地震断层形变反演分析[J]. *测绘学报*, 2009, 38 (2), 108-113
- [14] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1992, 82;1 018-1 040
- [15] Jonsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 2002, 92;1 377-1 389

第一作者简介:李志才,博士,高级工程师,现从事大地测量及地球动力学研究。

E-mail: zcli@nsdi.gov.cn

Co-seismic Slip and Rupture of the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake from GPS and Sea-floor Point Observations

LI Zhicai¹ ZHANG Peng¹ WEN Yangmao² LIAO Ying³

(1 Geodesy Department, National Geomatics Center of China, 1 Zizhuyuan, Baishengcun, Beijing 100048, China)

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

(3 Space Star Technology Co. Ltd., 82 Zhichun Road, Beijing 100086, China)

Abstract: The Mar 11th 2011 Tohoku earthquake (M_w=9.0) is located in northeastern of Japan. The surface observation data were rapidly obtained using the dense continuously GPS stations covered the island after the earthquake broking. In this paper, the reliable co-seismic deformation field is derived from GPS measurements using the highly precise data processing method and sea-floor points set near the epicenter. The co-seismic fault slip distributions are further inverted to explore the seismic mechanism using the steepest descent method to get the optimal solution. The second-order Laplace smoothing operator method had been used to constrain the fault slip amplitude based on the layered elastic half-space homogeneous model. The inversion results show that the energy released by the earthquake is about 4.48×10^{22} N·m equivalent to moment magnitude Mw 9.07. The average fault slip is about 6.05m while the maximum slip is about 58.7 m at 143.17 degrees east longitude and 38.25 degrees north latitude according the GPS and sea-floor points observed co-seismic deformation. The seismic fault characteristic is mostly thrust slip slide at the epicenter while some strike slip slide at the edge of faults.

Key words: co-seismic deformation; GPS; sea-floor point; fault slip distribution; inversion

About the first author: LI Zhicai, Ph.D. senior engineer, majors in geodesy and geodynamics research.

E-mail: zcli@nsdi.gov.cn