

黄軫详,尹弘植,黄鹤等. 2011 年日本东北地区太平洋近海地震对亚洲板块及韩国大地控制网的影响分析. 地球物理学报, 2012, 55(6):1884-1893, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.009.

Hwang Jin-Sang, Yun Hong-Sik, Huang H, et al. The 2011 Tohoku-Oki earthquake's influence on the Asian plates and Korean geodetic network. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(6):1884-1893, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.009.

## 2011 年日本东北地区太平洋近海地震对亚洲板块及韩国大地控制网的影响分析

黄軫详<sup>1</sup>, 尹弘植<sup>1</sup>, 黄鹤<sup>2,3</sup>, 郑泰俊<sup>1</sup>, 李东河<sup>1\*</sup>, 魏枕栽<sup>1</sup>

1 成均馆大学 社会环境系统工程学科, 韩国水原 440-746

2 北京建筑工程学院 测绘与城市空间信息学院, 北京 100044

3 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室, 北京 100044

**摘 要** 本研究分析了 2011 年 3 月 11 日发生的  $M_w$ 9.0 日本东北地区太平洋近海地震对亚洲地区和韩国国内 GPS 卫星常年跟踪站的位移影响. 为此, 利用了日本东北地区太平洋近海地震发生前后两周(2011 年 3 月 4 日到 3 月 18 日)的 GPS 站点数据, 包括震中附近地区(韩国, 中国, 中国台湾地区, 日本和俄罗斯)55 个 GPS 卫星常年跟踪站和 284 个 IGS 全球跟踪站, 并采用 GAMIT/GLOBK 软件进行处理和平差, 估算出所有 GPS 站点的同震形变. 结果显示, 日本东北地区太平洋近海地震引起的同震形变影响在亚洲地区比较明显, 包括日本和附近国家, 距离震中 2702 km 的中国武汉(WUHN)站也观测到同震形变. 为精确分析日本东北地区太平洋近海地震对韩国国家大地控制网的影响, 通过 GAMIT/GLOBK 软件计算出韩国 GPS 卫星常年跟踪站之间的基线长度变形, 并分析出弹性变形量. 结果表明: 大部分 GPS 站点均向震中方向膨胀, 且向震中的垂直方向收缩. 由日本东北地区太平洋近海地震导致的最大剪应变达到韩国国家大地控制网年均变形率的约 7 倍, 对韩国的地壳产生 14.5~57.7 mm 的水平位移, 并导致韩国国家大地控制网产生弹性变形. 因此, 在不及时更新维护韩国国家大地控制网的情况下, GPS 测量成果将会发生最大 20 mm 的位置误差.

**关键词** 日本东北地区太平洋近海地震, 同震形变, 弹性变形, 大地控制网

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.009

中图分类号 P228

收稿日期 2011-08-14, 2012-05-20 收修定稿

### The 2011 Tohoku-Oki earthquake's influence on the Asian plates and Korean geodetic network

HWANG Jin-Sang<sup>1</sup>, YUN Hong-Sik<sup>1</sup>, HUANG He<sup>2,3</sup>, JUNG Tae-Jun<sup>1</sup>,  
LEE Dong-Ha<sup>1\*</sup>, WE Kwang-Jae<sup>1</sup>

1 Department of Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Republic of Korea

2 School of Surveying and Mapping Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

3 Key Laboratory for Urban Geomatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 100044, China

**Abstract** In this study, we analyzed the effects of seismic displacements due to the megathrust

**基金项目** 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室开放课题项目(201111205N)和北京建筑工程学院科学研究基金项目(101101905)共同资助.

**作者简介** HWANG JinSang, 男, 1975 年生, 韩国人, 博士, 主要从事 GPS 数据处理和地壳变动等方面的研究. E-mail: gpsboy@skku.edu

**\* 通讯作者** LEE DongHa, 男, 1976 年生, 韩国人, 博士, 主要从事 GPS 数据处理和地球重力场等方面的研究.

E-mail: dhlee.skku@gmail.com

earthquake occurred near Tohoku-Oki area on 11 Mar. 2011 with  $M_w$  9.0 magnitude in the context of evaluation of position change by the earthquake on the Asian and Korean GPS permanent stations. For this, two weeks GPS data observed around the event of Tohoku-Oki earthquake (4 Mar—18 Mar. 2011) were obtained from 55 GPS permanent stations in the vicinity of epicenter (Korea, Japan, Russia, China and Taiwan) and 284 IGS global stations. All available GPS data were processed and adjusted by GAMIT/GLOBK software to estimate the co-seismic horizontal displacements at each station. As the results of GPS analysis, the co-seismic displacements by Tohoku-Oki earthquake were clearly revealed in the GPS stations of Asian region, Japan and its neighboring countries, and even the change of horizontal position of GPS station (WUHN in China) which was about 2702 km away from the epicenter. Also, we performed the elastic deformation analysis using the deformation lengths of baselines between Korean GPS stations estimated from GAMIT/GLOBK analysis, in order to analyze the effects of Tohoku-Oki earthquake more precisely on the Korea geodetic network. Most GPS baselines of Korean geodetic network expanded in the direction of epicenter, whereas those perpendiculars to the direction of epicenter contracted. The size of maximum shear strain rate calculated during the event of Tohoku-Oki earthquake is 7 times greater than annual result of the Korean geodetic network. In conclusion, it was found that the Tohoku-Oki earthquake had resulted in the horizontal displacements, ranging from 57.7 mm to 14.5 mm in Korea. So, these irregular displacements caused the elastic deformations in Korean geodetic network and may cause a maximum error of 20 mm in GPS geodetic positioning results without updating the Korean geodetic network.

**Keywords** Tohoku-Oki earthquake, Co-seismic deformation, Elastic deformation, Geodetic network

## 1 引言

2011 年 3 月 11 日 14 时 46 分(当地时间),日本东北地方太平洋近海发生  $M_w$  9.0 的大型地震(Tohoku-Oki Earthquake),震中位于北纬  $38.1^\circ$ ,东经  $142.6^\circ$ ,震源深度约为 10 km. 据统计,自有观测记录以来,除 1960 年发生的智利  $M_w$  9.5 地震、1964 年阿拉斯加  $M_w$  9.2 地震和 2004 年苏门答腊—安达曼  $M_w$  9.1 地震外,此次地震属全世界第四大地震<sup>[1]</sup>,造成了重大的人员伤亡和财产损失.

大型地震的影响范围通常可达离震中数千公里,并诱发地壳的瞬间形变<sup>[2-3]</sup>,直接影响国家大地控制网的精度<sup>[4-5]</sup>. 因此精确计算地震引起的地壳形变一直是地球物理学与大地测量学的主要研究对象<sup>[6-8]</sup>. 分析同震形变(Co-seismic Displacement)和震后位移(Post-seismic Displacement)可解释地震的发生原因、地壳板块的移动方向,以及地壳边界的断层分布<sup>[1-2,9]</sup>,对于大地测量研究领域,有必要精确分析大型地震对国家大地控制网的直接影响,以确保控制点坐标的高精度和各种地理信息的准确度,

这也是很多地球物理学者与大地测量学者关注每次大型地震的主要原因. Johnson 等<sup>[3]</sup>和 Yu 等<sup>[4]</sup>对 1999 年台湾集集地震进行了研究,利用 45 个 GPS 卫星常年跟踪站与 150 个站点的 GPS 观测数据计算出同震形变以及震后位移量,并进行了对地下断层几何构造的模型化. Vigny 等<sup>[2]</sup>和 Subaraya 等<sup>[9]</sup>则计算出 2004 年苏门答腊—安达曼地震所引起的同震形变,并进行了弹性模拟,推断出破裂带的分布、地震力矩和地震动量矩等参数. 对于日本东北地区太平洋近海地震, Ozawa 等<sup>[10]</sup>利用日本 GPS 卫星常年跟踪站网(GEONET)<sup>[11]</sup>观测数据计算出同震形变量,发现沿着东北(Tohoku)地方海岸线发生了向东 5.3m 的位移和 1.2m 的沉降. 考虑到地壳变动导致的控制点相对坐标成果的变化,日本国土地理院 3 月 14 日宣布停止提供包括 364 个电子控制点、4.4 万个三角点和 1500 个水准点的成果,同时着手这些控制点成果的重新计算<sup>[12]</sup>.

本研究利用 284 个 IGS 全球跟踪站和韩国及周边地区 46 个 GPS 卫星常年跟踪站 15 天(地震当天和地震前后各 7 天)的观测数据,通过 GAMIT/GLOBK 软件处理并计算出日本东北地方太平洋近

海地震所引起的同震形变和震后位移,分析了地震对亚洲地区地壳和韩国国家大地控制网的影响.本研究的特点在于:(1)由于利用了所有的 IGS 全球跟踪站数据,因此可在全球的角度分析地震的影响;(2)利用韩国境内密集分布的 GPS 卫星常年观测站数据,详细分析了由于日本东北地方太平洋近海地震而导致的韩国地区的同震形变量及其分布.

## 2 GPS 数据处理与分析

利用 GPS 跟踪数据分析同震形变与震后位移的研究中,国际上已有采用不同处理软件和方法的诸多研究成果. Yu 等<sup>[4]</sup>在采用 Bernese 4.0 软件分析 1999 年集集地震产生的同震形变量时,利用 ADDNEQ 模块将计算出的单日解进行了组合.首先选择一个没有受到地震影响的站点作为固定点,再计算出其余点位的移动量后,去除长周期地壳变动的影响以及震后位移量.利用上述定位方法分析地震形变研究时,具有无需把地震发生附近区域的控制点作为固定点,而使用位于全球稳定地壳上的站点的优点. Subarya 等<sup>[9]</sup>利用 GAMIT/GLOBK 软件<sup>[13]</sup>分析了 2004 年苏门答腊—安达曼地震的影响,由 GLOBK 软件提供整体平差模块, Vigny 等<sup>[2]</sup>利用了 GIPSY-OASIS II 软件的精密单点定位(PPP)方法计算了苏门答腊—安达曼地震波的到达时间.

本研究采用 GAMIT/GLOBK 软件进行 GPS

观测资料处理,使用的 IGS 精密星历,UT1、极移、岁差、章动及太阳月亮位置表均取自 IERS 公报.首先,利用 GAMIT 软件<sup>[14]</sup>计算出每日单日解,再利用 GLOBK 软件<sup>[15]</sup>进行了整体平差,以此获取同震形变量与震后位移量.共利用了全球 330 个 GPS 卫星常年跟踪站数据,其中包括 284 个 IGS 全球跟踪站和韩国国土地理研究院(NGII)所属的 46 个 GPS 卫星常年跟踪站.每个站点采用 15 天的观测数据,分别为地震前 7 天、地震当天和地震发生后的 7 天数据.

GPS 数据处理分为基线解算及整体平差两个部分.在基线解算部分,首先利用 GAMIT 软件按每日单日解计算出包括中国、韩国和日本的 55 个 GPS 卫星常年跟踪站的成果,然后结合 SOPAC 提供的全部 IGS 全球跟踪站的基线解算结果,利用 GLOBK 进行整体平差,整体平差以位于稳定地壳板块上的 21 个 GPS 卫星常年跟踪站坐标和运动速率为约束基准.图 1 表示了研究中所利用的 GPS 卫星常年跟踪站(黑点)与作为整体平差约束固定点(红点)的站点位置.固定点的位置是采用 GLOBK 软件的 glorg 模块经过评价站点的稳定性计算而确定的,因此计算地震前后所利用的固定点有所差异,如距离地震区域比较近的韩国的水原(SUWN)站与大田(DAEJ)站在地震前被利用为固定点,但地震后的处理中就被排除.

观测网平差分两种方式进行.首先,以时间序列

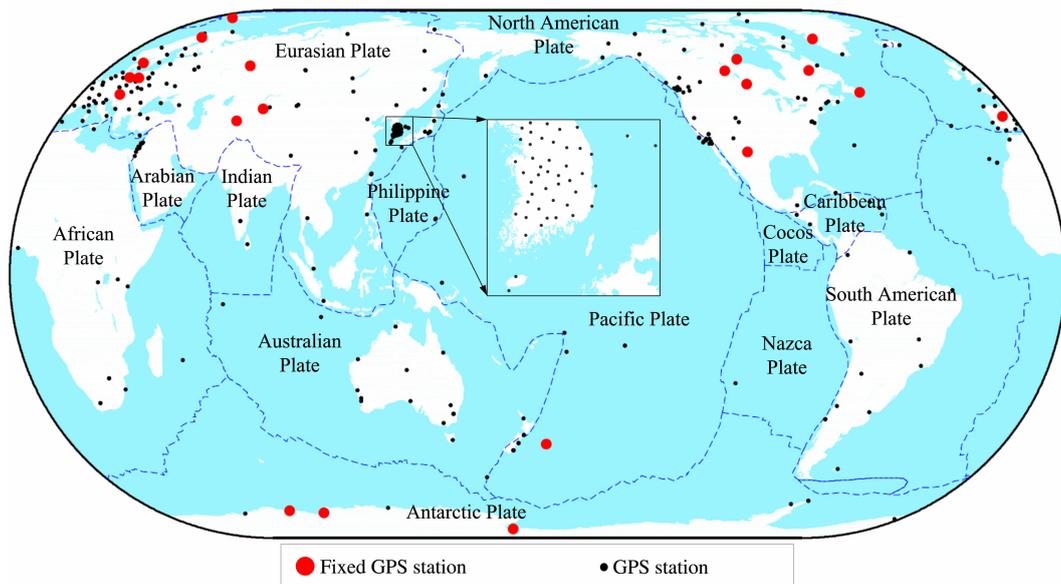


图 1 IGS 全球跟踪站站点及全球网平差固定点分布

Fig. 1 The distribution of IGS global stations and fixed points of global network adjustment

分析为目的,对 15 天的观测数据逐日网平差;第二种方式为,利用地震发生前后各 7 天的数据计算出单一坐标,分析了同震形变.同震形变量是通过地震发生前的坐标减去地震发生后的坐标而获得,对于发生后位移的地区将除去此类影响.

图 2 给出了全球网平差的精度直方图.如图 2a 所示,地震发生前 7 天的平差结果中,加权均方根(wrms)值的分布聚集,平差精度很高.平面坐标的 wrms 大部分分布在 2~3 mm 范围内,属平差误差

范围,大地高的平差误差大部分分布在 5~6 mm 范围.鉴于对 24 小时观测数据的 GPS 静态定位方法的解算误差也在此误差范围内,可以认为地震发生前 7 天观测数据的解算成果具有较高的精度.地震发生后 7 天的平差结果的 wrms 分布表示在图 2b 中.与地震发生前成果比较,震后 East 方向和大地高的 wrms 明显增加.这与地震发生地点附近 GPS 站点受到的震后移位有关,在计算同震形变时将此类影响消除,以保证位移量计算的精度.

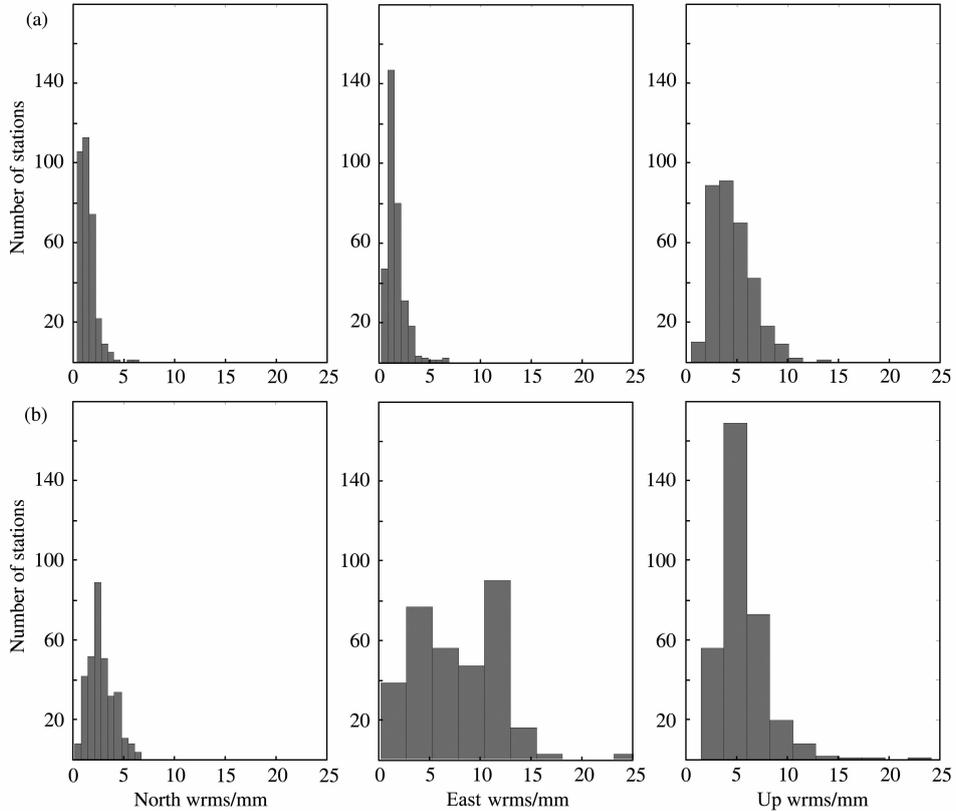


图 2 IGS 全球跟踪站全球网平差的加权均方根值分布,(a)、(b)分别为震前和震后的计算结果

Fig. 2 The distribution of wrms of global network adjustment for IGS global stations, (a)、(b) are respectively the result of before and after the earthquake

### 3 亚洲地区的同震形变

GPS 数据的分析结果显示,日本东北地区太平洋近海地震引起的同震形变的影响在亚洲地区比较明显,距离震中 2702 km 的中国武汉(WUHN)站也发生了同震形变.由图 3 给出的日本东北地方太平洋近海地震所产生的亚洲地区地壳同震形变的尺度与倾向分布图中可见,形变方向均指向震中,离震中最近的水沢(MIZU)站产生 2567.7 mm 的位移,位于韩国最东边的独岛(DOKD)站的位移量达到

57.7 mm.距离震中比较远的中国、中国台湾地区和俄罗斯的 GPS 站点也发生了 5 mm 以上的位移.如图 4 表示,GPS 站点到震中的距离与同震形变间表现为反比例关系,并呈一定的倾向.由于新十津川(STK2)站与南萨哈林斯克(YSSK)站(三角形)位于相对稳定的北美板块,因此比其他站点的变位量少.

图 5 给出的是代表性 GPS 站点(日本,中国和韩国各两个站点)的地震前后 15 天的站点坐标变化图.在图中很明显的看出位于韩国和中国的 GPS 站点只在东西方向有较大的位移,震后位移不大.而位于日本的筑波(TSKB)站和白田(USUD)站在东西

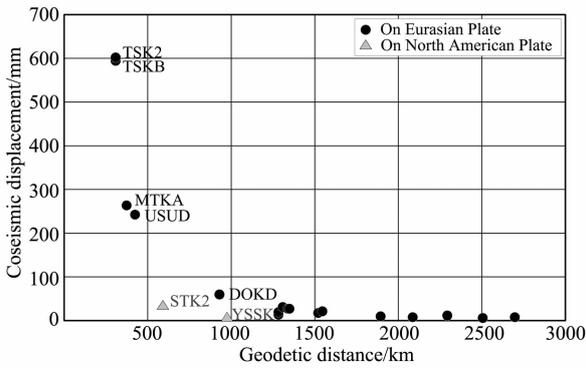


图 4 各观测点距震中的距离与同震位移量间的关系, 圆圈和三角形各表示 GPS 站点位于欧亚板块和北美板块  
Fig. 4 The relation between the distance of the epicenter from each GPS station with co-seismic displacement.

Circle and triangle are respectively the GPS station located in Eurasian and North America plate

方向和南北方向上都有明显的同震形变,震后也发生较大量级的位移.其中 TSKB 站点的震后位移量最大,发生最大同震形变的 MIZU 站点的震后位移量相对较小.

在构成 IGS 全球跟踪网的 GPS 站点中,受到此次地震影响的站点的同震形变量如表 1 所示.离震

中距离较近的日本 GPS 站点的位移最大,其次为韩国、中国、俄罗斯以及台湾地区的 GPS 站点,垂直位移只发生在日本的 GPS 站点上.将地震发生后 7 天的位移影响适用到日本的所有 GPS 站点得出,在震后 7 天内发生的最大垂直位移为 66.8 mm,日本的鹿儿岛(AIRA)站的震后垂直位移量属于 GPS 定位误差范围,因此没有考虑.

#### 4 对韩国大地控制网的影响

直到 20 世纪末,韩国的国家大地控制网(Korean Geodetic Network)所采用是以贝塞尔(Bessel)椭球为参考椭球的区域大地基准.为了满足 21 世纪各类用户的需求,韩国于 2003 年 1 月 1 日起推出了 KGD2002(Korean Geodetic Datum 2002)<sup>[16-17]</sup>.KGD2002 以地心为大地坐标系的原点,采用 GRS80 椭球参数和国际地面参考框架 ITRF2000(历元为 2002.0),并通过 46 个 GPS 常年观测站的联测确定了国家大地控制网.

日本东北地方太平洋近海地震给韩国的地壳产生较大影响,韩国国土地理情报院所管辖的 GPS 卫

表 1 亚洲地区 GPS 站点的同震位移量

Table 1 Co-seismic displacement of GPS stations in Asia area

GPS 站点	纬度/°N	经度/°E	$D_N$ /mm	$D_E$ /mm	$D_H$ /mm	S/mm	Azis/(°)
AIRA	31.824	130.600	$3.7 \pm 1.4$	$12.1 \pm 1.5$	$2.8 \pm 5.9$	12.7	73
STK2	43.529	141.845	$-23.4 \pm 1.2(-4.9)$	$19.9 \pm 1.1(-1.3)$	$4.3 \pm 3.4(14.6)$	30.7	140
USUD	36.133	138.362	$49.1 \pm 1.1(0.1)$	$222.7 \pm 1.1(23.5)$	$6.2 \pm 4.0(24.0)$	228.0	78
MTKA	35.680	139.561	$56.5 \pm 1.4(2.4)$	$248.7 \pm 1.3(26.0)$	$-18.7 \pm 4.8(17.9)$	255.0	77
TSKB	36.106	140.087	$60.9 \pm 1.1(-31.1)$	$565.2 \pm 1.1(53.5)$	$-86.7 \pm 3.3(10.3)$	568.5	84
TSK2	36.106	140.087	$72.3 \pm 1.3(-42.1)$	$567.0 \pm 1.2(53.4)$	$-89.5 \pm 4.0(15.8)$	571.6	83
MIZU	39.135	141.133	$-1213.9 \pm 1.5(-33.4)$	$2262.6 \pm 1.4(61.7)$	$-30.8 \pm 3.8(-66.8)$	2567.7	118
DAEJ	36.399	127.374	$2.8 \pm 1.1$	$25.9 \pm 1.0$	$0.7 \pm 3.4$	26.0	84
SUWN	37.276	127.054	$1.4 \pm 1.3$	$25.7 \pm 1.4$	$1.8 \pm 4.4$	25.8	87
BJFS	39.609	115.892	$0.9 \pm 1.0$	$10.4 \pm 1.1$	$0.0 \pm 3.4$	10.4	85
CHAN	43.791	125.444	$-7.1 \pm 1.0$	$19.1 \pm 1.0$	$2.3 \pm 3.1$	20.4	110
SHAO	31.100	121.200	$2.2 \pm 1.0$	$6.7 \pm 1.1$	$5.9 \pm 3.6$	7.0	72
WUHN	30.532	114.357	$0.6 \pm 1.3$	$7.5 \pm 1.5$	$-0.6 \pm 4.9$	7.5	85
KHAJ	48.521	135.046	$-12.7 \pm 1.2$	$11.8 \pm 1.1$	$4.3 \pm 3.4$	17.3	137
YSSK	47.030	142.717	$-4.7 \pm 1.1$	$2.3 \pm 1.0$	$-2.5 \pm 3.2$	5.2	153
TCMS	24.798	120.987	$-0.6 \pm 1.4$	$5.5 \pm 1.4$	$-0.6 \pm 4.9$	5.5	96
TNML	24.798	120.987	$-1.0 \pm 1.5$	$5.4 \pm 1.5$	$-2.2 \pm 4.9$	5.5	101
MCIL	24.290	153.979	$7.7 \pm 1.3$	$-4.0 \pm 1.3$	$4.5 \pm 4.6$	8.6	333

注:  $D_N$ ,  $D_E$ ,  $D_H$  表示同震位移的北方向, 东方向及垂直方向分量, 其位移量精度为 95% 概率误差; 括号内数据为震后 7 天内发生的震后位移; S 表示水平位移量, Azis 表示水平位移的方位角.

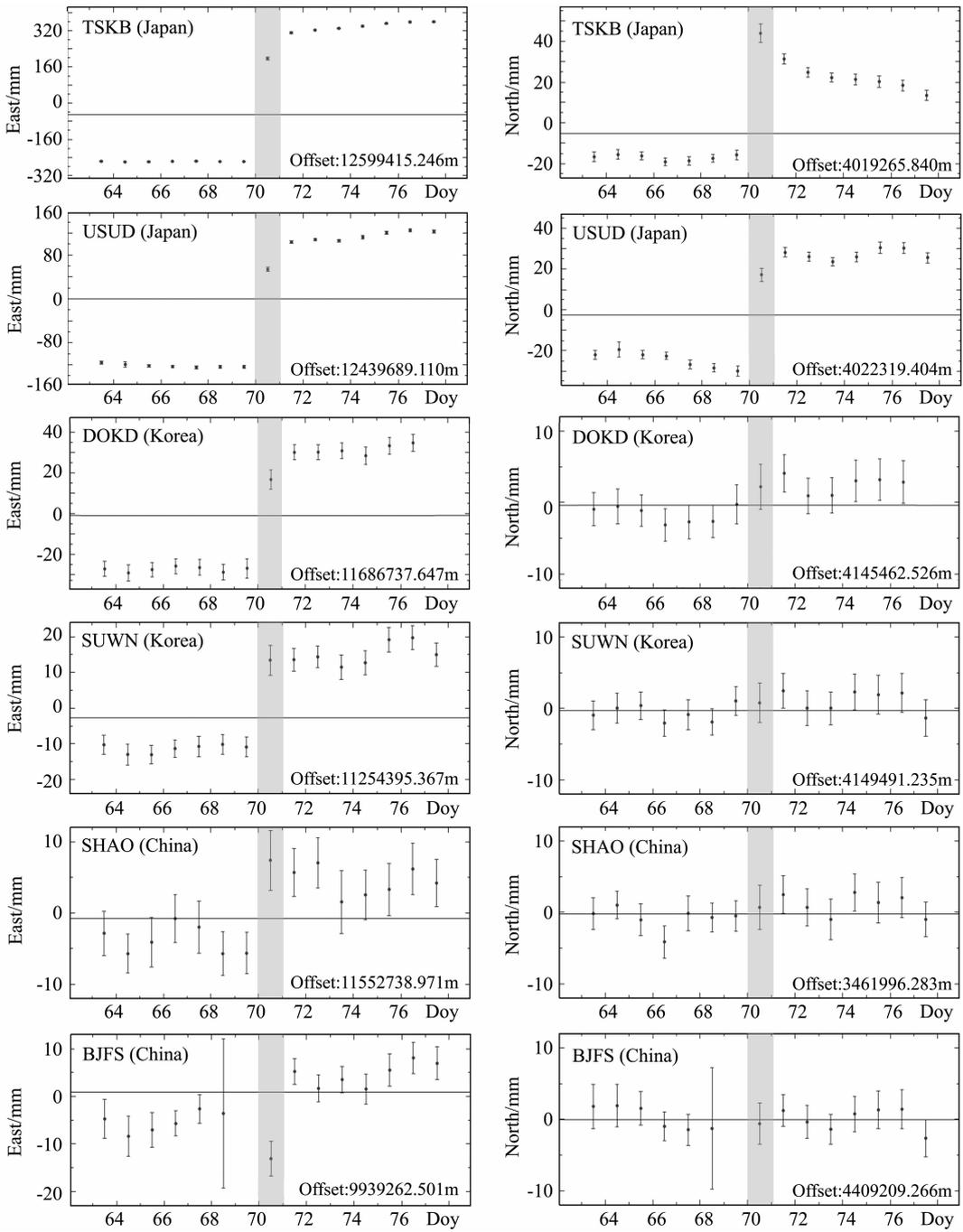


图 5 地震前后期间部分代表性 GPS 站点平面坐标位置的时间序列图  
 Fig. 5 Time series chart of 2D coordinate location of typical GPS station during earthquake

星常年观测站的站点坐标也发生了变动,其最大变位发生在离地震中心最近的 DOKD 站,位移量为 57.7 mm,位于震中最远的 MARA 站点也发生了 14.5 mm 的位移.图 6 表示了 48 个 GPS 卫星常年跟踪站(其中包括属于 IGS 观测网的 SUWN 站和 DAJE 站)同震形变的大小及方向,表明同震形变的方向指向震中,其方位角分布在  $77.2^{\circ}\sim 92.6^{\circ}$ ,距离震中越近变位量越大.震后 7 天的数据处理结果显示,在韩国区域内未产生震后位移,因此利用地震前

后各 7 天的 GPS 处理获得的坐标成果计算出同震形变量,并在表 2 中给出.

在韩国发生的同震形变的大小及方向不一,表明韩国的地壳可能由于日本东北地方太平洋近海地震而缩小或者是膨胀.本研究利用 GPS 站点间的基线距离变化量,将韩国的地壳区分为 81 个三角网,并计算出各个区域的主应变、最大剪应变以及面积变率<sup>[18]</sup>.

从图7左图所表示的主应变图中可以看到,在

表 2 韩国 GPS 站点的同震位移量  
Table 2 Co-seismic displacements of GPS stations in Korea

GPS 站点	纬度/°N	经度/°E	$D_N/mm$	$D_E/mm$	$D_H/mm$	S/mm	Azis/(°)
BOEN	36.488	127.730	$3.0 \pm 3.1$	$25.5 \pm 5.6$	$1.0 \pm 11.0$	25.7	83
CHCN	37.869	127.711	$0.7 \pm 5.0$	$31.6 \pm 8.3$	$2.9 \pm 18.9$	31.6	89
CHEN	36.878	127.155	$0.8 \pm 2.9$	$26.7 \pm 5.1$	$3.2 \pm 10.3$	26.8	88
CHJU	33.514	126.530	$3.0 \pm 2.4$	$15.2 \pm 4.5$	$4.4 \pm 9.4$	15.5	79
CHLW	38.164	127.415	$0.0 \pm 2.1$	$30.3 \pm 3.7$	$5.2 \pm 7.2$	30.3	90
CHNG	35.533	128.478	$4.2 \pm 3.1$	$26.7 \pm 5.7$	$5.5 \pm 11.4$	27.1	81
CHSG	36.436	129.056	$3.9 \pm 2.1$	$32.0 \pm 3.9$	$4.1 \pm 7.6$	32.2	83
CHWN	35.236	128.693	$4.9 \pm 2.2$	$24.7 \pm 4.0$	$2.1 \pm 7.8$	25.2	79
CHYG	36.459	126.801	$1.6 \pm 2.7$	$23.3 \pm 4.7$	$2.6 \pm 9.4$	23.4	86
CNJU	36.627	127.461	$2.7 \pm 2.8$	$24.4 \pm 6.0$	$-1.6 \pm 10.3$	24.6	84
DOKD	37.239	131.870	$3.4 \pm 2.1$	$57.6 \pm 3.7$	$3.0 \pm 7.4$	57.7	87
DOND	37.902	127.061	$0.8 \pm 2.2$	$27.5 \pm 4.0$	$3.5 \pm 7.6$	27.5	88
GOCH	35.668	127.943	$5.0 \pm 2.5$	$25.0 \pm 4.5$	$-1.6 \pm 9.3$	25.5	79
GSAN	36.816	127.787	$2.1 \pm 2.4$	$27.5 \pm 4.3$	$2.7 \pm 8.8$	27.6	86
HADG	35.162	127.709	$4.4 \pm 2.5$	$23.1 \pm 4.7$	$4.5 \pm 9.6$	23.5	79
HOMI	36.078	129.567	$4.8 \pm 2.4$	$30.7 \pm 4.4$	$4.0 \pm 8.5$	31.0	81
HONC	37.709	128.194	$0.6 \pm 2.2$	$30.4 \pm 3.9$	$3.9 \pm 7.7$	30.4	89
INCH	37.420	126.686	$2.3 \pm 4.2$	$26.0 \pm 7.5$	$4.1 \pm 15.7$	26.1	85
INJE	38.069	128.171	$-1.5 \pm 2.8$	$33.8 \pm 5.3$	$7.1 \pm 10.2$	33.9	93
JAHG	34.675	126.900	$3.7 \pm 2.9$	$16.4 \pm 5.4$	$6.5 \pm 10.6$	16.9	77
JINJ	35.173	128.050	$3.6 \pm 1.8$	$23.5 \pm 3.2$	$5.1 \pm 6.4$	23.8	81
JUNG	35.623	126.974	$2.6 \pm 2.4$	$22.1 \pm 4.7$	$2.6 \pm 9.0$	22.2	83
JUNJ	35.843	127.135	$2.8 \pm 2.2$	$21.6 \pm 3.9$	$1.1 \pm 7.6$	21.8	83
KANR	37.771	128.868	$0.5 \pm 2.5$	$36.5 \pm 4.2$	$3.9 \pm 8.5$	36.5	89
KIMC	36.137	128.142	$4.4 \pm 3.1$	$27.4 \pm 5.5$	$2.2 \pm 10.7$	27.8	81
KUNW	36.233	128.574	$4.9 \pm 3.8$	$29.6 \pm 6.9$	$3.9 \pm 14.4$	30.0	81
KWNJ	35.178	126.910	$2.9 \pm 3.1$	$20.8 \pm 5.5$	$6.2 \pm 11.7$	21.0	82
MARA	33.117	126.269	$3.2 \pm 2.5$	$14.2 \pm 4.8$	$4.1 \pm 9.2$	14.5	77
MUJU	36.003	127.661	$3.0 \pm 2.8$	$24.5 \pm 5.3$	$4.0 \pm 9.8$	24.7	83
NAMW	35.423	127.396	$3.6 \pm 2.3$	$22.9 \pm 4.1$	$5.4 \pm 8.1$	23.2	81
NONS	36.186	127.099	$2.3 \pm 2.7$	$24.6 \pm 4.7$	$4.2 \pm 9.2$	24.7	85
PAJU	37.746	126.738	$1.0 \pm 2.3$	$26.1 \pm 4.2$	$1.6 \pm 8.2$	26.2	88
SEOS	36.776	126.494	$2.0 \pm 1.6$	$22.7 \pm 2.9$	$2.4 \pm 5.9$	22.8	85
SNJU	36.379	128.144	$3.3 \pm 1.9$	$26.3 \pm 3.3$	$3.0 \pm 6.9$	26.5	83
SONC	34.957	127.486	$3.7 \pm 2.1$	$21.6 \pm 3.7$	$6.7 \pm 7.3$	21.9	80
SOUL	37.630	127.080	$1.4 \pm 1.9$	$26.5 \pm 3.3$	$3.0 \pm 6.7$	26.5	87
TABK	37.161	128.976	$1.3 \pm 2.7$	$34.5 \pm 4.1$	$3.6 \pm 9.6$	34.5	88
TEGN	35.906	128.802	$3.5 \pm 2.2$	$25.9 \pm 3.9$	$5.7 \pm 7.6$	26.1	82
ULLE	37.518	130.798	$2.3 \pm 2.6$	$49.2 \pm 4.3$	$1.1 \pm 8.7$	49.2	87
WNJU	37.337	127.947	$1.4 \pm 1.9$	$29.6 \pm 3.3$	$-0.1 \pm 6.8$	29.6	87
WOLS	35.504	129.416	$5.1 \pm 3.2$	$28.7 \pm 5.8$	$5.5 \pm 12.8$	29.1	80
WULJ	36.992	129.413	$3.0 \pm 1.7$	$35.3 \pm 3.0$	$3.0 \pm 5.9$	35.4	85
YANP	37.454	127.506	$1.6 \pm 2.4$	$28.3 \pm 4.1$	$3.4 \pm 8.8$	28.3	87
YECH	36.651	128.446	$2.7 \pm 2.6$	$29.8 \pm 4.8$	$8.2 \pm 9.3$	29.9	85
YONK	35.279	126.516	$3.0 \pm 2.9$	$19.5 \pm 5.3$	$3.2 \pm 10.6$	19.7	81
YOWL	37.183	128.462	$1.3 \pm 2.7$	$32.6 \pm 4.9$	$7.0 \pm 9.5$	32.6	88

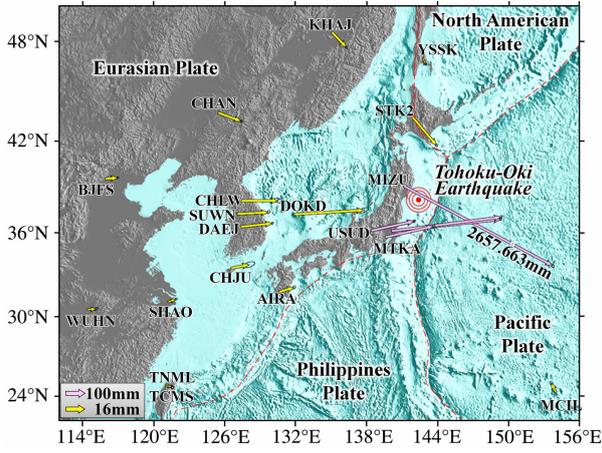


图 3 亚洲地区同震形变分布图

Fig. 3 The distribution of co-seismic displacement

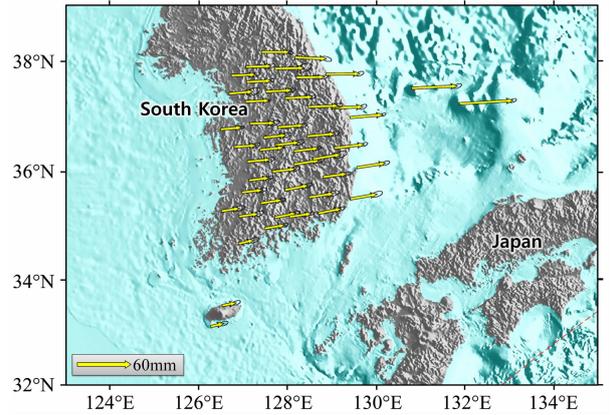


图 6 韩国 NGII GPS CORS 站点的同震位移分布图

Fig. 6 The distribution of co-seismic displacement of Korea NGII GPS CORS

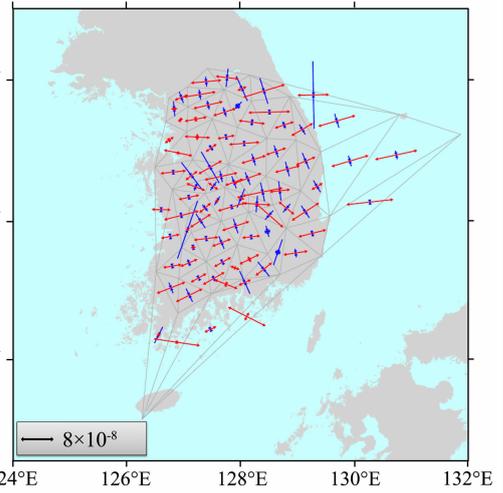
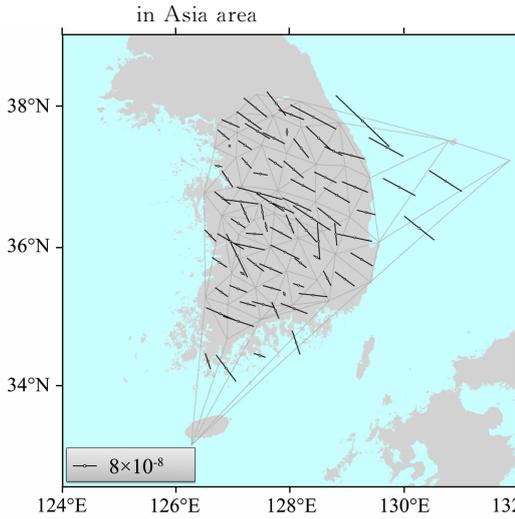


图 7 韩国地壳的弹性变形率:(a) 最大剪应变及方向;(b) 主应变及方向

Fig. 7 Elastic deformation rate of crustal in Korea: (a) Maximum shear strain and orientation; (b) Principal strain and orientation

81 个区域中有 78 个区域发生了震中方向的膨胀, 有 71 个区域的震中方向的垂直方向发生了收缩. 图 7 的右图表示, 最大剪应变的方向比较一致. 最大剪应变的平均大小为  $2.46 \times 10^{-7} \pm 6.53 \times 10^{-9}$ , 这个数值与 Cho(2006)<sup>[19]</sup> 得出的韩国地区平均年最大剪应变  $3.37 \times 10^{-8} \pm 1.85 \times 10^{-8}$  的约 7 倍, 足以认为日本东北地区太平洋近海地震对韩国地区地壳产生非常大的弹性变形. 不仅如此, 65 个区域的面积变形率呈正(+)值, 表示地壳产生膨胀, 其平均大小为  $2.72 \times 10^{-8} \pm 4.37 \times 10^{-8}$ , 比 Cho(2006) 的韩国地区平均年面积变形率  $-1.64 \times 10^{-8} \pm 2.64 \times 10^{-8}$  大.

考虑到韩国的地壳所发生的同震形变与弹性变形, 可以确定韩国的国家大地控制网也相应发生了相对位置变化, 直接影响韩国大地控制网的精确度, 对大地控制测量和地图制图带来误差.

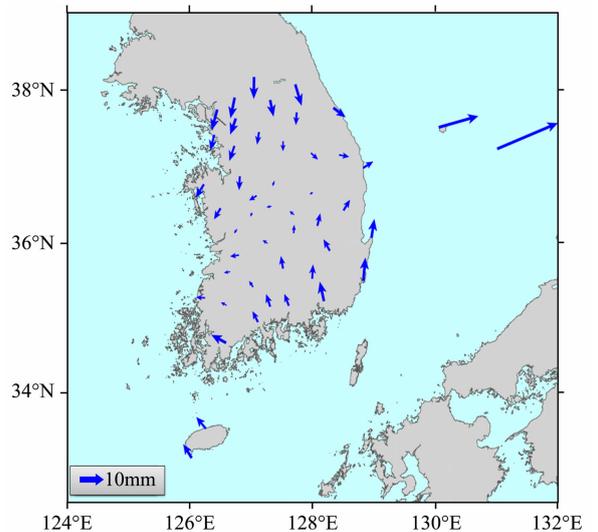


图 8 韩国 NGII GPS CORS 站点的地震前后的坐标转换残差

Fig. 8 Coordinate transformation residual of before and after earthquake of Korea NGII GPS CORS

为了分析日本东北地区太平洋近海地震对韩国国家大地控制网的影响程度,针对韩国国内 GPS 卫星常年跟踪站计算了地震前与地震后的三维坐标转换参数,并分析了其变换残差.坐标转换参数的计算使用了 Molodensky-badekas 模型<sup>[20]</sup>,其计算结果如表 3.表 3 中, $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  表示坐标系原点的位移量, $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  表示区域变换基准点, $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  表示坐标系的旋转参数,Scale 为比例系数,其大小和方向如图 8 所示.变换残差的方向与弹性变形率中主方向变形率的方向比较吻合,离震中最近的 DOKD 站点发生了东西方向 19.1 mm 的残差.对于韩国内陆地区,位于北部和南部的 GPS 站点发生了 10 mm 左右的残差.

表 3 韩国 GPS 站点震前(epoch2011.188)和震后(epoch2011.210)之间的变换参数

Table 3 Transformation parameter between before earthquake (epoch2011.188) and after earthquake (epoch2011.210) of GPS Stations in Korea

转换参数	参数值
$dx/m$	-0.0218
$dy/m$	-0.0150
$dz/m$	0.0032
$x_0/m$	-3156412.8449
$y_0/m$	4056835.5859
$z_0/m$	3763790.8341
$r_x/s$	-0.002867081
$r_y/s$	0.002516431
$r_z/s$	0.001691371
Scale/ppm	0.0201

表 4 为变换残差的统计值,表明受到日本东北地区太平洋近海地震的影响,韩国国家大地控制网发生了平均 4 mm 量级的残差.如果继续使用现在的大地控制坐标成果将引起最高 20 mm 左右(内陆地区为 10 mm 左右)的误差.

表 4 韩国 GPS 站点震前(epoch2011.188)和震后(epoch2011.210)之间的变换残差的统计值

Table 4 Transformation residual between before earthquake (epoch2011.188) and after earthquake (epoch2011.210) of GPS Station in Korea

参数	$R_N/mm$	$R_E/mm$	$R_H/mm$
最大值	8.0	19.1	5.4
最小值	0.2	0.0	0.0
平均值	3.6	2.6	1.6
标准偏差	4.2	4.6	2.2

注: $R_N$ ,  $R_E$ ,  $R_H$  各表示纬距、经距及大地高的变换残差.

## 5 结论

利用 284 个 IGS 全球跟踪站点以及韩国 46 个 GPS 卫星常年跟踪站点的 15 天数据,分析了日本东北地区太平洋近海地震对东亚地区的地壳和韩国国家大地控制网的影响程度,并得到以下结论:

(1)距离地震中心 2702 km 的 GPS 观测站也观测到同震形变,由此可知,除了日本,韩国、中国、俄罗斯以及台湾地区也受到日本东北地区太平洋近海地震不同程度的影响.

(2)分析同震形变大小及方向的结果与其他研究结果<sup>[2,4,9]</sup>非常一致,大部分位移的方向朝着震中方向,离震中越近其位移量越大.所处理的 GPS 站点中,位于日本的 MIZU 站位移量最大,为 2567.7 mm;位于地震影响圈边界的 GPS 站点也产生 5 mm 左右的位移.

(3)通过分析韩国及附近岛屿的弹性变形,大部分地区呈现向震中方向膨胀、向震中方向的垂直方向紧缩.由此次地震而短时间内发生的弹性变形的最大剪应变达到年平均值的约 7 倍.

(4)地震引起的弹性变形,导致韩国国家大地控制网控制点间的相对距离产生变化,以 GPS 卫星常年跟踪站的坐标为准,误差最大值达到 20 mm,内陆地区为 10 mm 左右.为保持高精度大地控制网的精度,需进行及时的重新维护.

**致谢** 本文所采用的 GPS 数据由国际 GNSS 服务(IGS)和韩国国土地理情报院(NGII)提供,并受益于两位审稿人具有建设性的修改建议,在此一并表示衷心感谢!

## 参考文献(References)

- [1] Nettles M, Ekström G, Koss H C. Centroid-moment-tensor analysis of the 2011 Tohoku earthquake and its larger foreshocks and aftershocks. *Earth Planets Space*, 2011, 99: 1-9.
- [2] Vigny C, Simons W J F, Abu S, et al. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia. *Nature*, 2005, 436(7048): 201-206.
- [3] Johnson K M, Hsu Y J, Segall P, et al. Fault geometry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake imaged from inversion of GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(11): 2285-2288.
- [4] Yu S B, Kuo L C, Hsu Y J, et al. Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2001,

- 91(5): 995-1012.
- [5] Satirapod C, Simons W J F, Promthong C. Monitoring deformation of Thai Geodetic Network due to the 2004 Sumatra-Andaman and 2005 Nias Earthquakes by GPS. *J. Surv. Eng.*, 2008, 134(3): 83-88.
- [6] 戴黎明, 李三忠, 陶春辉等. 俯冲带耦合作用对苏门答腊地区应变场影响的三维数值模拟. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1837-1851.
- Dai L M, Li S Z, Tao C H, et al. 3D numerical modeling of strain field in Sumatra area influenced by the coupling effect of subduction zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1837-1851.
- [7] 邵志刚, 武艳强, 江在森等. 基于 GPS 观测分析日本 9.0 级地震同震位错与近场形变特征. *地球物理学报*, 2011, 54(9): 2243-2249.
- Shao Z G, Wu Y Q, Jiang Z S, et al. The analysis of coseismic slip and near-field deformation about Japanese 9.0 earthquake based on the GPS observation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(9): 2243-2249.
- [8] 易桂喜, 龙锋, 张致伟. 汶川  $M_s 8.0$  地震余震震源机制时空分布特征. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1213-1227.
- Yi G X, Long F, Zhang Z W. Spatial and temporal variation of focal mechanisms for aftershocks of the 2008  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1213-1227.
- [9] Subaraya C, Chlieh M, Prawirodirdjo L, et al. Plate-boundary deformation associated with the great Sumatra-Andaman earthquake. *Nature*, 2006, 440(7080): 46-51.
- [10] Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, 2011, 475(7356): 373-376.
- [11] The GEONET Group, Geographical Survey Institute. GEONET (GPS Earth Observation Network System) and its prospect. *Journal of the Geodetic Society of Japan* (in Japanese), 2004, 50(2): 53-65.
- [12] 国土地理院. 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震. により測量成果の公表を停止, <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60007.html>, 2011[2011-03-14]. Geospatial Information Authority of Japan. Stop the publication of survey results by the Pacific Ocean earthquake off the coast of the Tohoku region Heisei 23(2011), <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60007.html>[2011-03-14].
- [13] Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System[Ph. D. thesis]. San Diego: University of California, 2002.
- [14] King R W, Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS analysis software, release 10.3. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [15] Herring T A. GLOBK Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program, Version 10.1. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [16] Lee Y J, Lee H K, Jeong K H, et al. Korean geodetic datum (KGD2002): nationwide GPS network definition. // Proceedings FIG Working Week 2008-Integrating Generations. Stockholm, Sweden, 2008.
- [17] Jung K H, Ryu S H, Lee Y J, et al. Nationwide geodetic adjustment of integrated GPS networks in Korea. // FIG Congress 2010, Facing the Challenges-Building the Capacity. Sydney, Australia, 2010: 11-16.
- [18] Prescott W H, Savage J C, Kinoshita W T. Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84(B10): 5423-5435.
- [19] Cho J M. Crustal Deformation Analysis from Permanent GPS Stations in the Korean Peninsula [Ph. D. thesis]. Suwon, Korea: Sungkyunkwan University, 2006.
- [20] Kutoglu H S, Mekik C, Akcin H. A comparison of two well known models for 7-parameter transformation. *The Australian Surveyor*, 2002, 47(1): 24-30.

(本文编辑 胡素芳)