

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.01.006

## 2011年3月11日日本9.0级强震 上海地区同震效应分析

袁媛, 赵文舟, 陈军, 倪友忠

(上海市地震局, 上海 200062)

**摘要:** 2011年3月11日日本发生了 $M_w$  9.0级地震,在这次地震中,上海地区的两个形变台站的7套观测仪器都记录到了不同程度的异常现象,应变及地倾斜出现幅度不同的震荡波,佘山台垂直摆东西分量在初动时就记录到最大波动,而佘山重力仪记录到的最大波值出现在震级更小的余震发生后。此外查山台钻孔倾斜北南分量以及佘山台垂直摆东西分量均在震后一段时间出现了与GPS记录相一致的加速倾斜。通过将上述现象进行简述分析,以期进一步深入了解上海地区的地形变响应特征。

**关键词:**  $M_w$  9.0地震; 同震异常; 震后效应

**中图分类号:** P315.75      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8662 (2014) 01-0038-05

## The Coseismic Effect in Shanghai Region when The $M_w$ 9.0 Earthquake Occurred in Japan On March 11, 2011

YUAN Yuan, ZHAO Wenzhou, CHEN Jun, NI Youzhong

(Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** During the course of  $M_w$  9.0 earthquake occurred in Japan on March 11, 2011, the anomalous phenomenon recorded by the apparatus of strain and ground deformation in some region of Shanghai. By analyzing acquired data, some issues are studied and discussed by authors that include co-seismic changes of the whole process of  $M_w$  9.0 mega-earthquake in Japan and the abnormal changes after that earthquake for the better understanding of the deformation characters in Shanghai region.

**Keywords:**  $M_w$  9.0 earthquake; Coseismic anomaly; Post-seismic effect

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 上海地震局科技专项(2012专5)

作者简介: 袁媛,女,1983年生,工程师,主要从事地震预测分析。

E-mail: yuya83@163.com.

0 引言

2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分,日本本州东海岸海域发生了  $M_w$  9.0 级大地震并引发海啸,造成重大人员伤亡和财产损失。据日本官方统计,此次大地震和海啸至少造成了 15 703 人死亡,4 647 人失踪,5 314 人受伤,并且超过 33 万幢建筑、2 千条道路、56 座桥梁和 26 条铁路在地震海啸中遭遇到不同程度的损坏。地震对日本及沿岸海域的影响依然在持续,在此次地震中遭受重创的福岛 4 个核反应堆,其泄露的核物质已经对附近空气、海域以及产出的动植物产生污染,引发了全球关注。日本列岛地处太平洋板块、北美板块、菲律宾板块和欧亚板块的交汇处,向来是地震多发区域,从此次地震的发震位置、深度以及震源机制解可以确定大地震发生在太平洋板块与北美板块的边界俯冲带上,在震中区域,太平洋板块以每年约 83mm 的速度相对北美板块向西运动,在日本海槽附近插入北美板块下部<sup>[1]</sup>。该地震是有仪器记录以来的历史上第四大地震。此次日本大地震的发生,是否会对我国大陆地区未来一段时间的强震活动带来影响,许多专家对此都表示应以谨慎的态度面对<sup>[2]</sup>。本文系统收集和整理了上海地震前兆观测网数字化地形变分钟值观测资料在此次地震中记录到的的同震异常和震后效应,并对不同观测项目的记录特征加以描述和分析。

1 地震基本参数

发震时刻:北京时间 2011 年 03 月 11 日 13 时 46 分 24 秒;震中坐标:38.297°N, 142.372°E,具体地点位于日本本州东海岸海域,距离东京市北东方向 373 km (USGS);震源深度:30 km (USGS);震级:释放地震矩  $4.5\times10^{22}$  Nm,对应矩震级  $M_w$  9.0;震源错动方式:发震断层面走向

219°,倾角 28°,滑动角 84°(中国地震局地质研究所)。余震分布表明破裂面宽约 150 km,沿走向展布约 300 km。

2 同震效应分析

上海地区现有流体、形变、电磁等 3 类地震前兆观测项目,这次强震后出现异常的观测项目主要集中在形变观测的地应变、地倾斜和重力。目前上海地区实施数字化观测的有余山、查山等两个形变台,  $M_w$  9.0 级强震发生时,这两个观测台站的多套仪器分别记录到了不同程度的同震及震后效应。

2.1 余山形变台

余山形变综合台属于全国形变观测基本台(国家一类台),位于上海市松江区余山镇,其测点地处扬子地块东北段的东南边缘,位于青浦-龙华断裂和枫泾-川沙断裂夹持的天马山火山岩构造盆地中央,该盆地是晚侏罗世至白垩世长期继承性发育的箕状构造盆地。周围 200 km 范围历史地震频度较低。余山形变综合台经过“九五”项目建设以后,综合观测环境得到了极大的改善,现有洞室观测 DSQ 型水管倾斜仪、VS 型垂直摆倾斜仪、石英水平摆、SSY-II 洞体应变仪、DZW 相对重力仪、以及钻孔观测 YRY-4 分量钻孔应变仪等多种地形变观测仪器以及洞温、气压、气温、降雨等辅助测项,采样率均为 1 sample/min。该台站距离  $M_w$  9.0 级日本大地震的震中距约为 2 090 km。日本 9.0 级地震后,余山台的多套形变仪器均记录到了显著的震时形变波,余山台同震记录主要特征见表 1,由于观测系统和观测目的不同,时间核准系统也会存在一定的误差,表中的时间统计数据只是相对值,但对于同一类观测项目,依然具有较好的可比性,另外表中的最大波值也只是相

表 1 上海市余山台同震记录主要特征  
Table 1 Main features of coe seismic anomaly recorded by Sheshan station

观测项目	观测手段	同震波到时/h-min	到时差/min	最大波值/″	最大波值到时/h-min	最大变幅/″
水管仪 NS 向	倾斜	13-53	7	$6\ 689.9\times10^{-3}$	13-56	$8573.7\times10^{-3}$
水管仪 EW 向	倾斜	13-53	7	$2\ 972.8\times10^{-3}$	13-59	$5\ 496.6\times10^{-3}$
垂直摆 NS 向	倾斜	13-52	6	$1\ 095.3\times10^{-3}$	13-56	$1\ 703.2\times10^{-3}$
垂直摆 EW 向	倾斜	13-52	6	$263.1\times10^{-3}$	13-52	$269.6\times10^{-3}$
洞体应变 NS 向	应变	13-52	6	$5\ 506.6\times10^{-8}$	13-59	$1\ 241.7\times10^{-8}$
洞体应变 EW 向	应变	13-52	6	$4\ 258.8\times10^{-8}$	13-58	$6\ 744.9\times10^{-8}$
钻孔应变 NS 向	应变	13-52	6	$-6\ 399\times10^{-8}$	13-59	$7\ 270\times10^{-8}$
重力仪	重力	13-52	6	-1 832.6 $\mu$ Gal	14-25	1817.6 $\mu$ Gal

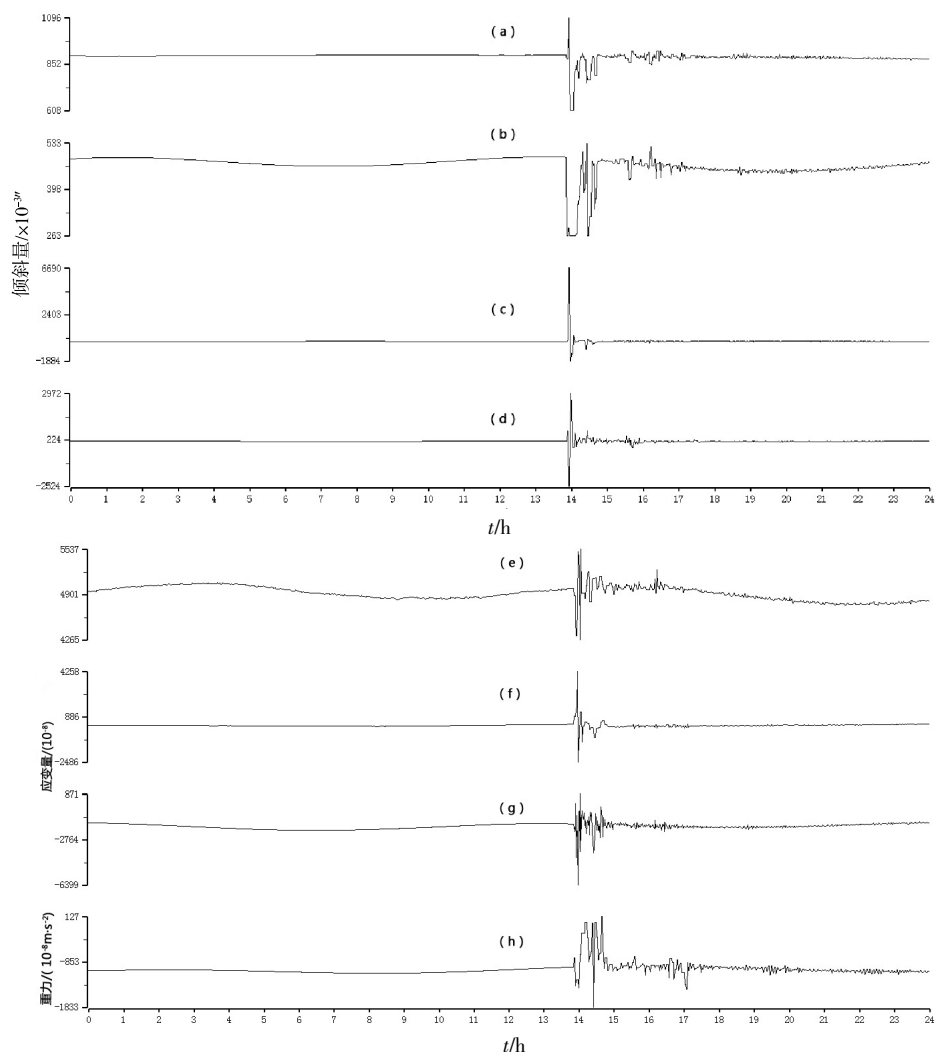


图 1 佘山台地形变分钟值曲线图

Fig.1 The minute value curve of deformation of Sheshan station

对变化的最大值,如负向变化最大,则取负向最大值,正向变化最大,则取正向最大值。

此次大地震后,主震震中区域附近又发生了多起 6 级以上的余震,在 3 月 11 日当天,最大余震发生在北京时间 14 时 21 分,震级为  $M_w$  7.9 级。从仪器的观测数据来看,各仪器也记录到了此次余震的同震形变波。

从佘山台各项观测仪器同震记录的时间来分析,5 套仪器在地震发生后的 6~7 min 左右记录到了地震同震波,不同类型仪器记录的波形在时间进程上差异不大,同类仪器 2 个方向在时间进程基本一致,但最大幅度出现时刻各仪器各分量均有差别。从观测手段类型来分,佘山的水管仪和垂直摆属于地倾斜观测领域,洞体应变和四分量钻孔应变属于地应变观测项,不同观测类型的仪器同震记录特征也有一定的差异。

水管倾斜仪两分量的初动时间一致,但最大

波值到时相差 3 min,其 EW 分量更清晰地记录到衰减过程,主震持续周期约 25 min。NS 分量的最大变幅比 EW 分量高出一半。垂直摆 EW 向主震初动时就出现了阶跃,之后仪器记录值几乎保持不变,约 17 min 后才恢复正常波动,最大波值出现在 14 时 26 分,为当日最大余震的同震波。垂直摆 NS 分量在 13 时 58 分达到负向最大值,达到饱和,7 min 后恢复正常波动。

洞体应变伸缩仪是精密测量地壳两点间水平距离相对变化的仪器,灵敏度达  $10^{-10}$ ,从此次记录到的同震波特征可以发现,两分量地震波到时基本一致,但 EW 向的最大变幅比 NS 向高出 4 倍左右,由于 NS 向基线长度比 EW 向更长,同震波记录精度也明显较高,当日的几次余震在 NS 向记录图像上也有所反映。重力仪的最大变幅并不是出现在  $M_w$  9.0 地震发生后,而是之后的  $M_w$  7.9 级余震。

2.2 查山形变台

上海查山形变观测台位于上海西部，位于张堰-南汇断裂附近，该断裂在中更新世曾有过活动，之后地震活动较弱。查山台安装有两台钻孔形变观测仪器，分别为竖直摆钻孔倾斜仪和钻孔体应变仪。其中体应变的观测精度可达 $10^{-9}\sim 10^{-10}$ ，探头埋深约在 80~90 m，其整点值能记录到完整的固体潮，分钟值能清晰地记录到地震应变波、同震应变阶、远震面波以及近震高频波等。该台站距离 $M_w$  9.0 级日本大地震的震中距约为 2 105 km。

查山台的竖直摆钻孔倾斜仪非常清晰地记录到了主震及当日最大余震的震时形变波，NS 分量和 EW 分量初动时间一致，为震后 6 min，两分量的

最大变幅非常接近，分别为 NS 分量 $4\,654.4\times 10^{-3}''$ ，EW 分量 $4\,135.4\times 10^{-3}''$ 。与佘山台的洞室仪器相比，钻孔倾斜仪映震能力更强，除了记录到 $M_w M_w$  9.0 主震以及当日最大余震 $M_w$  7.9 之外，当日 6 级左右的余震也有清晰的反映。NS 分量应变波没有应变阶，但 EW 分量在震后一天内有小幅的约 $160\times 10^{-3}''$ 的阶变上升。查山体应变仪记录到最大应变波波幅为 $2\,523.3\times 10^{-9}$ ，约为应变固体潮日变幅差的 40 倍，但应变波没有出现应变阶，震后体应变恢复正常观测，未出现调整恢复的趋势。

一般同震形变波通常是指远场强地震波通过时触发的地壳变形过程，也分为阶变型形变波和振荡型形变波。阶变型形变波是指远强震的地震

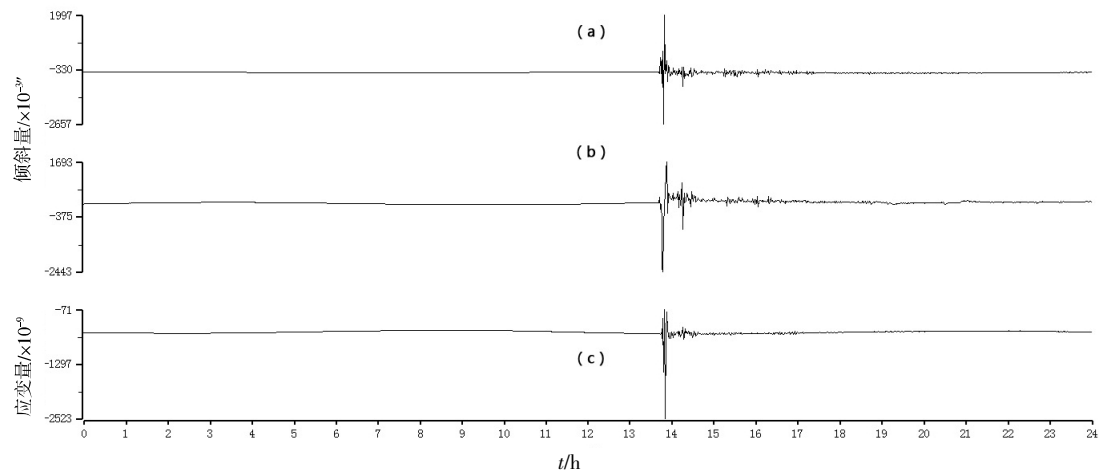


图 2 查山台地形变分钟值曲线图  
Fig.2 The minute value curve of deformation of Chashan station

表 2 上海市查山台同震记录主要特征  
Table 2 Main features of coe seismic anomaly recorded by Chashan station

观测项目	观测手段	同震波到时/h-min	到时差/min	最大波值/''	最大波值到时/h-min	最大变幅/''
钻孔倾斜仪 NS 向	倾斜	13-52	6	$-2\,656.7\times 10^{-3}$	13-58	$4\,654.4\times 10^{-3}$
钻孔倾斜仪 EW 向	倾斜	13-52	6	$-2\,443.3\times 10^{-3}$	13-57	$4\,135.4\times 10^{-3}$
钻孔体应变	倾斜	13-53	7	$-2\,523.3\times 10^{-9}$	14-00	$1\,703.2\times 10^{-9}$

波通过测点时，形变仪器不仅记录到地震波式的高频振荡还记录到阶变式的上升或下降变化。振荡型形变波是形变仪器只记录到地震波式的高频振荡。由以上同震形变响应分析来看，距离震中 2 km 之外的台站都清晰记录到了强地震发生的变化过程，但主要为振荡型形变波。一般认为，振荡型形变波出现反映当地的应力场只发生瞬间的变化，地下介质并没有发生塑性形变<sup>[9]</sup>。而从变化的总体趋势来看，同震形变波均存在明显的衰减过程。虽然在 $M_w$  9.0 级主震发生后，震源区域附近还发生了两次 7 级以上的强余震，余震波与主震

波背景叠加在一起，但形变波波动幅度基本上仍呈现衰减趋势。

2.4 震后效应分析

在日本大地震结束之后，从 3 月 12 日开始，查山台钻孔倾斜 EW 分量出现加速东倾、东倾量约为 $386\times 10^{-3}''$ ，直至 3 月 15 日才恢复正常观测，但并没有回复至震前水平。同为地倾斜观测项目的佘山垂直摆倾斜仪的 NS 分量在震后出现了北倾，3 月 15 日逐渐平稳，至 3 月 17 日回复至震前水平，北倾量约为 $64.5\times 10^{-3}''$ 。作为地应变观测的

余山洞体应变伸缩仪的测量端在震后出现了东向微移, 并且固体潮畸变、变化量大约为  $866.3 \times 10^{-8}$ , 3 月 17 日开始逐渐恢复至震前观测量, 这种变化可以理解为大震之后的应力恢复过程<sup>[4-5]</sup>。

王敏利用 GPS 计算地震远场同震位移, 其中余山台测得东向位移  $0.006 \pm 0.0017$  m、北向位移  $0.001 \pm 0.0015$  m<sup>[1]</sup>, 从定量来看, 利用 GPS 测量的东向位移约为北向位移的 6 倍左右, 而查山台竖直

摆钻孔倾斜仪测量的东倾量也约为余山垂直摆倾斜仪测量的北倾量的 6 倍, 因此, 无论从趋势或量性分析, GPS 与定点地倾斜观测的结果是一致的。

### 3 结论与建议

(1) 各类仪器的波形记录幅度及同类仪器不同方向上波形的记录幅度相差较大, 余山台倾斜

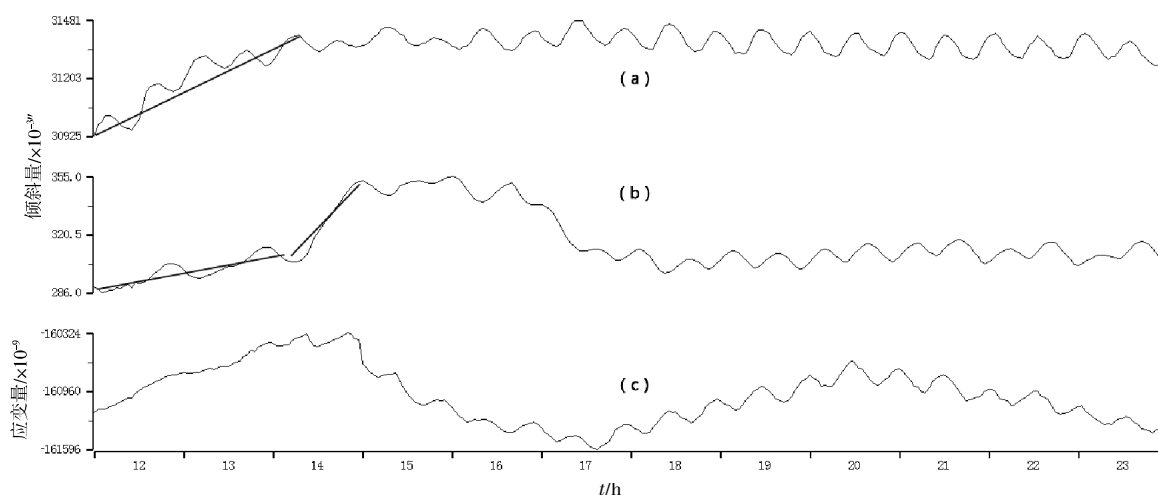


图3 上海形变观测震后效应

Fig.3 The post-seismic effect of Shanghai region

观测东西向的最大变幅均大于北南向, 而应变观测则相反。水管倾斜仪和洞体应变仪的 EW 分量和 NS 分量基线长度不一致, 导致两分量记录的震时形变形态、波幅均有较大的差别。形变同震最大记录幅度可能与仪器的性能、参量、场地响应有关, 不宜作横向比较。

(2) 钻孔观测比洞室观测记录到的震时形变波分辨率更高。

(3) 查山台的钻孔倾斜仪、余山台的垂直摆和洞体应变伸缩仪在震后都记录到了与 GPS 测量结果一致的变化趋势, 同时对比各仪器的同震效应客观记录, 说明这些仪器的精度均已达到设计要求, 并且能较好地反映地壳的微小运动变化。

(4) 地震影响到了台站的固体潮长期变化趋势, 震后数日至数十日, 变化趋势发生明显。

鉴于数字化仪器采样率为 1 sample/min, 时间测量理论上只能精确到分, 因此记录过程中不可避免地漏掉许多信息, 因此, 目前对于地震形变前兆的研究关键还在于资料的长期积累和研究人员的不断努力探索。由于当下的数字化形变观测不能全面揭示与地震相关的一些信息, 而使得同震形变的响应幅度、持续时间等特征与地震震级和震中距离之间难以建立确定的关系, 但同震形

变最大幅度或最大持续时间与震级和震中距之间可能存在一定的依赖关系<sup>[6,7]</sup>, 这对于分析地震短临前兆的特点及依据短临前兆进行地震预测研究具有一定的意义, 因此也有必要对一个地区的多次地震同震响应进行统计分析, 进而有助于了解本地区的地震短临前兆的特点。

### 参考文献:

- [1] 王敏, 李强, 王凡, 等. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城  $M_w 9.0$  级地震远场同震位移[J]. 科学通报, 2011, 56 (20): 1593-1596.
- [2] 张晶, 刘峡, 方颖, 等. 日本 9.0 级地震前后华北形变场变化特征与地震趋势分析[J]. 科学通报, 2012, 32 (2): 64-72.
- [3] 张双凤, 孙晴, 于伟. 印尼 8.7 级地震在河北省的震后效应初探[J]. 华北地震科学, 2007, 25 (3): 15-19.
- [4] 李献智. 同震异常效应及其应用[J]. 华北地震科学, 1993, 11 (3): 36-42.
- [5] 孙毅, 程万正. 特大远震引起的形变观测变化图像[J]. 内陆地震, 2005, 19 (3): 264-270.
- [6] 牛安福, 张晶, 吉平, 等. 强地震引起的同震形变响应[J]. 内陆地震, 2005, 19 (1): 1-6.
- [7] 张晶, 牛安福, 高福旺, 等. 数字化形变观测提取的地震短临异常特征[J]. 地震, 2003.23 (1): 70-75.