

GPS观测得的2023年2月土耳其双震前后的地壳形变

顾国华

中国地震局地震预测研究所, 北京

收稿日期: 2023年4月18日; 录用日期: 2023年6月14日; 发布日期: 2023年6月25日

摘要

2023年2月6日土耳其发生7.8级双震, 相隔仅9小时、相距近, 都是近直立断层走滑型地震, 是利用GPS观测研究地震前后地壳形变稀有震例。利用美国网站得到131个GPS站欧亚(板块)参考框架位移数据, 分析了2次地震前后的地壳形变。同震水平位移是分析大地震前兆地壳运动的关键现象。GPS分别观测得的2次地震同震位移, 特征显著: 水平位移最大达4.4 m; 向西、向东和向南水平位移3个分区明显, 与区域内3个板块构造运动密切相关; 而垂直位移较小, 无明显分区。2次地震前震中附近的水平位移分别出现(第一次地震)峰值和(第二次地震)闭锁2种类型, 但无明显的垂直位移积累。与其他震例一样, 在震前两种类型的水平位移区域, 同震水平位移是震前位移在时间或空间上的(弹性)回跳, 表明大地震有前兆形变。2次地震重合的孕震区内, 有对2次地震同震水平位移影响相近的区域。GPS观测明确显示, 地壳水平运动是2次大地震的成因。尽管观测不足和未能预报2次地震, 但仍突显GNSS可在地震监测、预警和地震预测中发挥作用的趋势。

关键词

GNSS (Global Navigation Satellite System), GPS (Global Positioning System), 同震水平位移, 地壳形变, 土耳其大地震, 地震预测

Crustal Deformations before and after the Doublet Earthquakes in February 2023 in Turkiye Detected by GPS Observations

Guohua Gu

Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing

Received: Apr. 18th, 2023; accepted: Jun. 14th, 2023; published: Jun. 25th, 2023

Abstract

In only about 9 hours and at a short distance, doublet large earthquakes of M7.8 occurred on Feb. 6, 2023 in Turkiye with strike slips on near-vertical faults. They have provided a rare earthquake case with GPS observations before and after the events. Displacement data at 131 stations in the Eurasia reference frame downloaded from the website in America are analyzed. Coseismic horizontal displacements are key facts for the studies on the crustal deformations precursory to large earthquakes. The features of the coseismic displacements obtained separately from GPS observations for each event are quite obvious: the largest horizontal displacement was 4.4 m, 3 distinct areas of mainly westward, eastward or southward horizontal displacements, that are closely related with the motions of the 3 tectonic plates in the region, are identified while no distinct areas for small vertical displacements are identified. No preseismic accumulations of vertical displacements were detected. Near the 2 epicenters there were the area with peak horizontal displacements for first event and no or locked horizontal displacements for the second event. Similar to other earthquake cases, the coseismic horizontal displacements in the areas of 2 different types of preseismic horizontal displacements were the (elastic) rebound of the preseismic horizontal displacements shown in time series or in space. They show that there were crustal deformations precursory to the 2 events. Within the overlapping area of the preparation of both events, there was an area in which both events showed similar coseismic horizontal displacements. GPS observations have shown definitely that the horizontal crustal motions were the origin of the 2 events. The potential advantages of GNSS in monitoring seismic waves and crustal deformation for earthquake early warning and earthquake forecasting have exhibited quite strikingly in Turkiye though there were insufficiencies in the GPS observations and the 2 events were not forecasted.

Keywords

GNSS (Global Navigation Satellite System), GPS, Coseismic Horizontal Displacement, Crustal Deformation, Large Earthquakes in Turkiye, Earthquake Forecasting

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2023年2月6日(GPS周2248, 周一)土耳其发生了罕见的相隔仅9小时、相距约96 km、近直立断层走滑型7.8级双震(第一次地震, N37°.15, E36°.95, 震源深度20 km; 断层长约190 km, 宽约25 km; 第二次地震, N38°.00, E37°.15, 震源深度20 km, USGS定为7.5级, 震中位置也有差别, 断层长约120 km, 宽约18 km), 灾难惨重。土耳其北为欧亚板块。土耳其则位于阿纳托利亚板块、阿拉伯板块和非洲板块的交界处, 阿纳托利亚板块南是非洲板块, 东阿纳托利亚断裂带东是阿拉伯板块, 2次地震发生在板块边界东安纳托利断裂带两侧。这些板块每年以1.3 cm/a到2 cm/a的速度水平移动, 相互挤压碰撞, 大震活动频繁, 历史上曾多次发生灾难性地震。

为监测地运动和地震预测, 面积为78.3万 km²的土耳其布设了约200左右的GPS观测站, 密度远低于日美等地区。遗憾的是, 有不少站在2015年10月后连续观测曾中断, 还有部分站2023年9月前开

展观测。这些 GPS 站不利于作对观测时空要求较高的形变分析，特别是应变分析[1]-[7]。幸运的是，在 2 次地震前的 4 个月，即 2022 年 9 月初，不少站恢复或开始连续观测，因此获得了 2 次地震前后震中附近极为宝贵的 GPS 连续观测结果。

自 1990 年代以来，全球多国陆续布设了数以万计的 GPS (连续)观测站，获得了海量的观测数据，得到了大量全球地壳水平与垂直运动观测结果，包括多次大地震的同震位移、震后位移和地震波等观测结果，最大震级达 9.3 级。据此，利用位错模型开展了震源机制、震后地壳介质粘弹性松弛等研究，成果相当丰硕。位错模型早已是与地震相关的形变研究中最成功的数理模型。尽管自开展 GPS 观测以来，全球发生了多次大甚至巨大地震，也获得了大量震前 GPS 观测结果，然而对于震前地壳运动或前兆形变的研究工作相对较少，但作者仍获得了多个研究震例[1] [2] [3]。

30 多年全球 GNSS (全球导航卫星系统)观测证明，GNSS 观测方法和技术科学合理，获得的地壳形变精确可靠。然而问题是，大地震是否存在前兆，特别是，是否有前兆形变，如何获得和判别形变前兆。还须证明，所得现象应与地震的发生有必然的因果关系；同一种现象在不同震级地震前在时空上有重现性；所得现象应有定量或定性数理模型作解释。大量的 GPS 观测震例一再对这些问题给出了回答[1] [2] [3]。2023 年 2 月土耳其双震的 GPS 观测结果又是一例。

定位是观测地壳运动的基本方法，是数学问题，可采用各种坐标系统处理结果，但为获取有物理与构造运动意义的地壳运动结果，应采用区域参考框架数据处理结果作位移分析[1] [2] [3] [4]。由于土耳其多数 GPS 观测站的结果采用欧亚(区域)参考框架(EU)，本文采用 <http://geodesy.unr.edu> 网站(下称 G 网站)得到的 Geoffrey Blewitt 教授用 GIPSY 软件处理得的 131 个 GPS 连续观测站(见 G 网站)欧亚参考框架坐标(或位移)时间序列和 MIDAS [5] (Median Interannual Difference Adjusted for Skewness)方法处理得的欧亚参考框架位移速率，分析土耳其 2 次 7.8 级地震前后的地壳运动，特别是前兆地壳运动。对少数 GPS 连续观测位移时间序列作了适当处理，如用位于远离土耳其，而位于瑞士的 GPS 连续观测站 ZIM3 作为区域参考框架单一核心站，获得欧亚参考框架坐标时间序列[6] [7]。ZIM3 是欧亚板块内非常稳定的站，由它得到的一些站的时间序列结果与 G 网站给出的相同站欧亚参考框架的结果一致。

2. 土耳其 2 次地震的同震位移

GPS 可获每 5 min 的处理结果。G 网站的结果表明，采用精密星历，5 min 的处理结果得到的同震水平位移精度达 2 mm，同震垂直位移精度达 7 mm。土耳其大地震后不久，G 网站发布了采用 5 min 的 GPS 连续观测数据处理得的 2 次地震精确的同震水平位移结果，采用了 131 个 GPS 连续观测站，给出了 2 次地震的同震水平位移图和数据(见 G 网站报道：[February 13, 2023] Turkey M7.8 and M7.5 Earthquakes)，还利用震中周围的 GPS 连续观测站的每日解得到的 2 次地震后残留的综合同震水平位移，但此解含有震前和震后较短时间量值较小的位移。每日解的水平位移精度可达 1 mm，垂直位移精度达 3 mm，由此得到的综合同震位移精度高于 5 min 的 GPS 连续观测数据得到的同震位移精度。不同结果的对比说明 5 min 的 GPS 连续观测数据得到的同震位移精确可靠。

同震位移可用弹性位错模型作数值模拟[8] [9]，且同震水平位移大于 1 mm 的半径范围 d 可以用如下统计式作大概估计： $d = 2.5 \times 1.0^{-3} \times 5^M$ km，式中 M 为震级[10]。2 次地震同震水平位移分布范围与统计式一致，所得结果符合位错参考框架的要求[11] [12]。

2 次地震中至少 1 次地震的同震水平位移大于 250 mm，包括 EKZ1、MLY1、ANTP、KLS1 和 TUF1。而同震水平位移小于 250 mm 的站利于更清楚显示 2 次地震 3 个结果较小的同震水平位移的差异。2 次地震同震垂直位移可见 G 网站报道中的同震位移数据文件。

最应关注 3 个站的同震水平位移, 即离第一次地震震中最近的 ANTP 站, 离第二次地震震中最近的 EKZ1 站和两次地震同震水平位移均显著的 MLY1 站。

ANTP 站离第一次地震震中最近, 为 39 km, 同震水平位移最大, 但仅 387.0 mm。此次地震以东与 ANTP 临近的站(即 AKLE、ERGN、KLS1、MARD、SIV1、VIR4 和 MIDY 等)第一次地震同震水平位移都以向东为主。

EKZ1 站离第二次地震震中 7 km (离 USGS 定的震中仅 4 km), 是全球至今距如此大地震震中最近的 GPS 连续观测站。该站第二次地震同震水平位移量达 4.4 m, 是两次地震同震水平位移最大的, 是至今仅次于离 2010 年智利 8.8 级地震震中 61 km 的 CONS 站同震水平位移 4.7 m 和离 2011 年日本 9.0 级地震震中 98 km 的 J550 站同震水平位移 5.6 m。G 网站报道, 土耳其 2 次地震震源机制解得到的震中位移达 10 m。显然, 瞬间数米的地面运动, 产生的破坏极其严重。第二次地震西侧与 EKZ1 临近的站(即 AKSR、BOG1、ELAZ、FEEK、GEM1、HALP、MERS、MRSI、NEV2、TUF1、KAY1、NIGD、POZA、SILF、AKD1 和 ADN2 等)同震水平位移都以向西为主。

大多数站两次地震的同震水平位移量和方向相差较大, 以其中一次地震的同震水平位移影响为主。例外是 MLY1 及其临近的站(即位于第二次地震东北的 APK1、DIV2、ELAZ、ERZ2、TNC2、RHIY 和 GURU 等), 尽管同一站离 2 次地震震中距不同, 但同一站的 2 次地震同震水平位移量和方向相近。如 MLY1 离 2 次地震的震中距分别为 179 km 和 109 km, 同震水平位移分别为 401.0 mm 和 350.7 mm, 方向都为南西, 两次地震后综合水平位移量达 740.4 mm, 显著大于离第一次地震 39 km 的 ANTP 站的同震水平位移。不同板块同震水平位移的差别明显。

对比地震波获得的震源机制解, 第一次地震的同震水平位移, 近震中为北北东向相当大幅度的右旋走滑断层破裂; 离震中稍远有明显的张性破裂, 且以东西向张性破裂为最明显; 北部明显向南挤压。第二次地震为近东西向大幅度左旋走滑断层破裂; 离震中稍远, 不少站两次地震的同震水平位移方向相反。这些近震中站两次地震的同震水平位移差别显著。

第一次地震同震水平位移显示, 震中北部有明显的向南东挤压, 以 MLY1 站向南东位移最显著。靠近 MLY1 用红色标记的几个站两次地震也有明显的向南东水平位移。

2 次地震的同震垂直位移显著小于同震水平位移, 综合影响更小。总体上两次地震后未产生大范围较大幅度的垂直位移, 更突显近直立断层走滑型地震的特征。FEEK 站第一次地震上升最大仅 210 mm, 而第二次地震却下沉了 201 mm, 2 次震后仅残留 19.5 mm。还有些站两次地震的同震垂直位移量值相近, 且方向相反, 同震垂直位移较大的站此现象最显著, 与弹性形变相似。这一现象表明, 2 次地震的地壳垂直运动有一定的相互影响。唯有高采样率的观测可获得此种垂直位移变化。

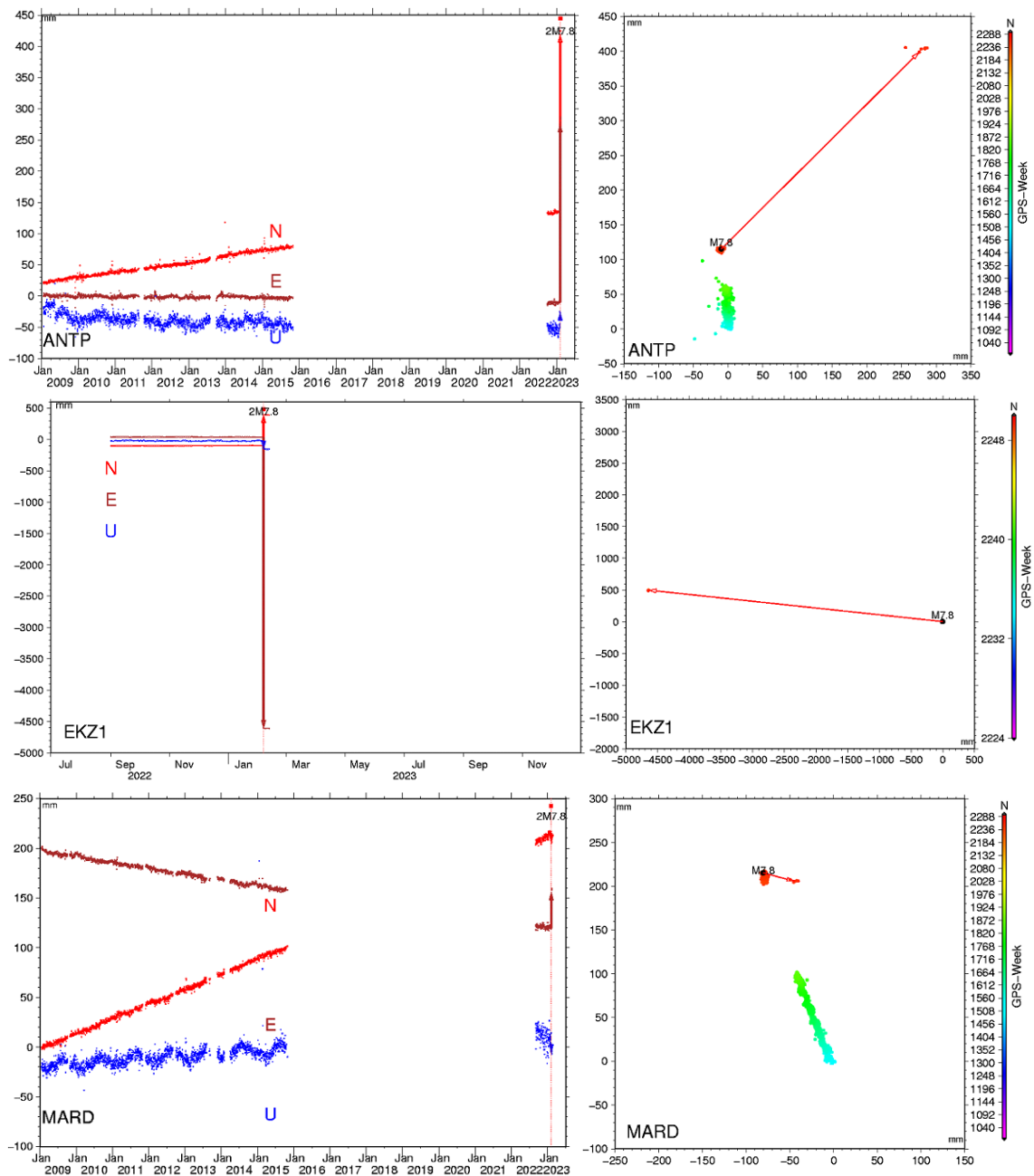
3. 两次地震前后的水平位移速率和位移时间序列

由于包括欧洲和土耳其在内大范围垂直位移速率均很低, 2023 年 2 月 6 日土耳其 2 次 7.8 级大地震西侧震前欧亚参考框架 MIDAS 水平位移速率均以向西为主(详细见 G 网站欧亚参考框架 MIDAS 水平位移速率文件)。尽管采用的 GPS 观测站数量有限, 分布不均匀, 且由于观测中断和观测时间较短等原因, 未能得到震中附近中的一些站的速率, 但速率数据清楚显现阿纳托利亚板块、阿拉伯板块和非洲板块的相互运动的主要特征。下面一些 GPS 站虽因观测中断和观测期短等问题, 不利于获取位移速率, 但位移时间序列可在一定程度上弥补速率文件中站点的缺失和观测的不足。欧亚板块的欧洲部分, 是大范围水平位移速率低的稳定区域。包括欧洲在内更大范围的水平位移表明, 阿纳托利亚板块、阿拉伯板块和非洲板块的水平运动相当突出, 加之 2 次地震极为显著的同震水平位移, 充分说明, 地壳水平运动是土耳其

其地震的成因。

这里主要分析离震中最近或较近且典型的 5 个 GPS 连续观测站 ANTP、EKZ1、MARD、GURU 和 MLY1 欧亚参考框架的位移时间序列，包括水平位移向量和各分量的时间序列(图 1)。

图 1 中 GPS 周数色码表示水平位移向量时间序列的日期。GPS 周采用连续计数，是 GPS 观测表示日期的方法之一，但便于绘图软件用色码表示日期。尽管采用此种方法表示日期时，每周数 7 天的日期仅有一个色码，但加上分量图，得到的图足以清晰显示水平位移平面曲线的变化。水平位移向量时间序列图直观显示观测站水平位移曲线轨迹。图 1 是每日解时间序列，无法显示 2 次地震各自的同震水平位移，而只能显示它们的综合影响。



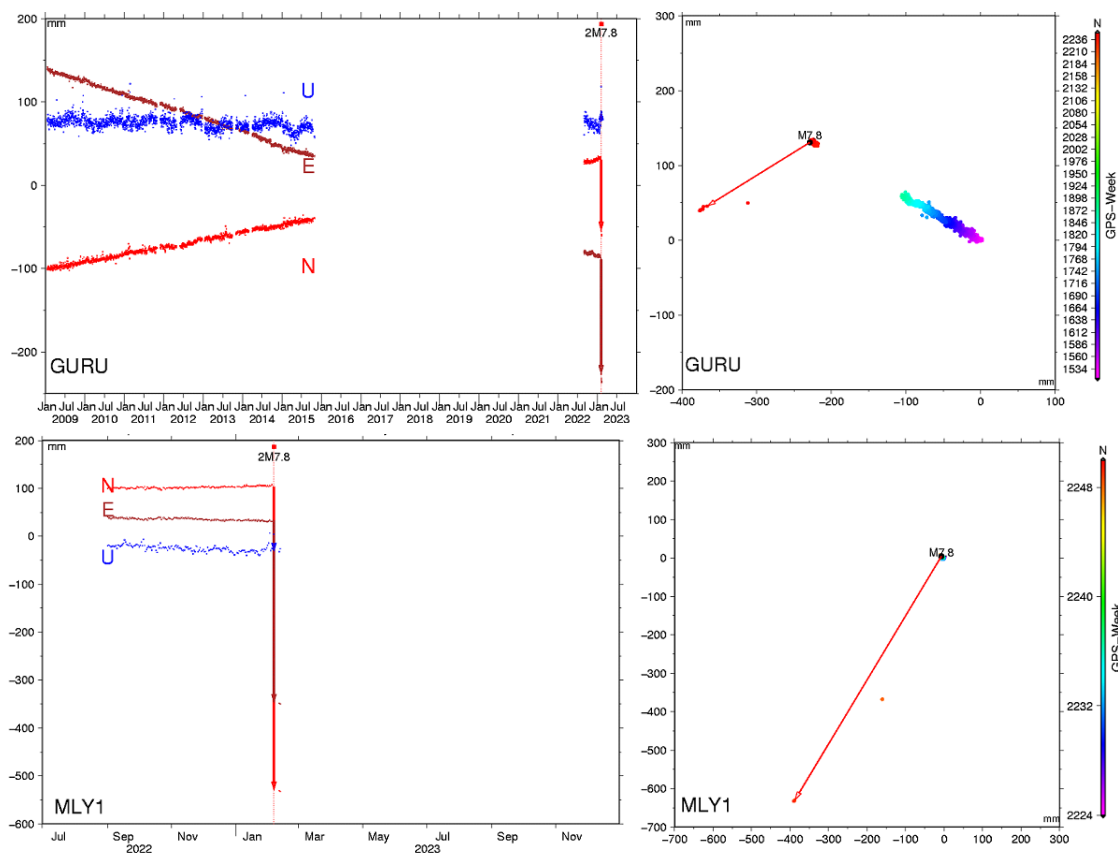


Figure 1. Time series of 3 displacement components (left figure) and horizontal displacement vectors (right figure) in Eurasia reference frame in mm at 5 typical stations of continuous GPS observations near the 2 large earthquakes of M7.8 on Feb. 6, 2023 in Turkiye. The 3 displacement components are the east horizontal component E in brown, north horizontal component N in red and vertical component U in blue. At the top of the figures of 3 displacement components, the magnitude of the earthquake is shown. On the right side of each vector figure the color code shows the date in GPS week for time series of the horizontal displacement vectors

图 1. 2023 年 2 月 6 日土耳其 2 次 7.8 级大地震周围多个 GPS 连续观测站欧亚参考框架位移时间序列。GPS 连续观测站 3 个位移分量和水平位移向量时间序列图，位移单位均为 mm。左图为 3 个分量，即水平位移东西(E, 棕色)和南北(N, 红色)分量与垂直(U, 蓝色)位移时间序列，图上方标出了有明显同震位移的地震震级。右图为水平位移向量时间序列，图右侧为用 GPS 周表示水平位移向量日期的色码

同震位移是地震断层瞬间位移在震中周围产生并残留的突变，震级越大，影响范围越大，离震中越近，位移越大。传统大地测量早就观测得到大地震震中附近的同震位移。而 GPS 连续观测的一大优势是可及时并准确获得大地震大范围的同震位移，特别是近震中大幅度同震位移。G 网站同时给出与全球参考框架的坐标时间序列中的突变相应时间发生的大地震和震中距。同震水平位移是分析 GPS 观测得到的区域参考框架位移时间序列中大地震前兆地壳运动的关键现象[1] [2]。

ANTP 是离第一次地震震中最近的 GPS 连续观测站，有 2009 年 1 月开始的观测数据，但 2015 年 11 月至 2022 年 9 月观测中断。EKZ1 是离第二次地震震中最近的 GPS 连续观测站，但仅得到 2022 年 9 月开始的观测数据。尽管 2 站的 GPS 观测有中断或震前观测时间段，但仍可得到震前后近震中的地壳形变。

ANTP 站的水平位移分量和向量的时间序列与不少大地震前后的变化一致：震前几乎沿直线水平位移，达到最大值后出现大幅度同震水平位移，且至少有一分量的方向与震前相反。此站东西向反向明显，在位移时间序列中为显著的回跳现象[2] [13]。震前震中附近水平位移达到峰值，故本文称之为峰值位移型。与其他具有走滑运动的地震一样，近震中同震水平位移一般与震前水平位移不重合于一条直线上或

在同一方向,而只有逆冲型地震,如2015年尼泊尔8.1级大地震等,震前水平位移重合于一条直线上或同一方向[2]。上述ANTP附近的站都有类似现象,如MARD站与ANTP站一样同震水平位移也以向东为主,且离震中稍远同震水平位移为弹性回跳。震前ANTP站垂直位移仅有小幅度下降。

尽管震前观测时间短,但EKZ1站震前水平位移的特征仍非常明显,震前水平位移几乎不变,即无水平位移积累,或者说水平位移闭锁,且东西分量E最为突出。若将震前的水平位移图放大可更突出此现象。2016年日本九州岛M7.3级大地震[2][6]、2013年四川芦山7.0级大地震等震前震中附近也有水平位移闭锁现象[14]。这些地震的同震水平位移显现为空间上(近震中)回跳或(远离震中)弹性回跳。EKZ1站的同震水平位移使该站位移回复到与临近站MIDAS速率相同方向,极大地弥补了该站震前水平构造运动量的亏缺。EKZ1站附近的站有类似现象,如GURU站与EKZ1站一样同震水平位移也以向西为主,且离震中稍远,同震水平位移显现为空间上的弹性回跳,在一定程度上弥补了此站震前构造运动量的亏缺。越近震中的站,震前水平位移亏缺量越大。

2次地震震中附近是震前水平位移最显著或最突出的区域,为水平位移达峰值或闭锁。GPS首次观测得双震前震中附近水平位移出现2种不同且极端的图像。震前2种图像的水平位移区域,同震水平位移是震前水平位移在时间或空间上的(弹性)回跳。因此,土耳其双震前是有前兆形变的,但因观测时空分布的不足,震前判别异常比其他区域难度更大。

如上所述,MLY1站及其附近的站2次地震同震水平位移均相当明显,同一站位移量值与方向相近,南北分量E同震水平位移与震前水平位移方向相反,表明2次地震的孕育区不仅在上述站重合,且对两次地震影响相近,都受到非洲板块和阿拉伯板块向北挤压的共同影响。

2次地震前震中附近的GPS站均无明显的垂直位移积累,同震垂直位移仅是突跳,而不是(弹性)回跳。

2次地震发生在东安纳托利断层带的两侧。GPS观测表明,2次地震的孕震模式明显差别,东安纳托利断层带南侧的站震前强烈水平运动持续,但东北侧,运动受阻,水平位移闭锁,板块间强烈的水平碰撞最终导致两次地震的发生。MLY1附近的站离第二次地震较近,但两次地震同震水平位移相近,第二次地震同震水平位移略小,应该说第二次地震的震级小于第一次地震,据此推断,USGS定为7.5级更准确。

4. 结论

2023年2月6日土耳其发生7.8级双震,相隔时间短、相距近,且都是近直立断层走滑型地震,是利用GPS观测资料研究地震前后地壳形变稀有震例。

为获取有物理与构造运动意义的地壳运动结果,位移分析采用了欧亚参考框架的数据处理结果。

第一次地震的同震水平位移,近震中为北东向相当大幅度的右旋走滑断层破裂;离震中稍远有明显的张性破裂,且以东西向张性破裂为最明显;北部明显向南挤压。第二次地震为近东西向大幅度左旋走滑断层破裂;离震中稍远,不少站两次地震的同震水平位移方向相反。这些站两次地震的同震水平位移差别显著。

2次地震前震中附近的GPS站均无明显的垂直位移积累,同震垂直位移仅是突跳,而不是(弹性)回跳。2次地震的同震垂直位移显著小于同震水平位移,综合影响更小,更突出近直立断层走滑型地震的特征。有些站两次地震的同震垂直位移量值相近方向相反,同震垂直位移较大的站此现象最显著。

同震位移,特别是近震中的同震位移,是地震瞬间产生的显著突变。而GPS观测结果表明,同震水平位移是分析大地震前兆地壳运动的关键现象。2次地震震中附近是震前水平位移最显著或最突出的区域。GPS首次观测得同一地区2次地震前震中附近的水平位移分别出现闭锁和和峰值位移2种不同的极

端图像。而在震前这 2 种图像的水平位移区域, 同震水平位移是震前水平位移在时间或空间上的(弹性)回跳, 因此土耳其双震前是有前兆形变的。

5. 讨论

同震水平位移分布表明, 2 次地震相距较近, 有重合的孕震区, 且有对 2 次地震影响相近的孕震区。

MLY1 站附近离第二次地震较近, 这些站两次地震同震水平位移相近, 但第二次地震同震水平位移略小, 应该说第二次地震的震级小于第一次地震, 据此推断, USGS 定为 7.5 级更准确。利用位错模型反演可确切证明这一点, 但已超出本文的研究。

2 次地震前后的地壳运动再次表明, 地壳水平运动是大地震成因。但因观测时空分布的不足, 震前判别异常比其他区域难度更大。至今地震预测最大难点是大地震短临前兆。

GNSS (全球导航卫星系统), 包括 GPS, 是目前唯一可在不同震级大地震前后连续、实时监测地壳形变, 可用五个字概括其观测技术优势: 高(高精度、高采样率、长期高稳定性)、大(大范围, 直至全球、观测值幅度大)、快(快速, 甚至实时处理)、低(低成本的观测)和近(近震中观测)。土耳其 2 次地震的 GPS 观测结果表明, 离震中尽可能近的高数据采样率 GNSS 观测对研究大地震前后的地壳运动过程极为重要。尽管 GPS 未在土耳其地震预报中发挥作用, 但显现了 GNSS 在地震监测中的突出优势。在地震区布设密集的 GNSS 连续观测站, 是地震监测、预警和预报获取近震中观测数据无可替代的技术, 是地学, 特别是地震学的基础观测项目, 是必然的发展趋势。

致 谢

本文利用了 <http://geodesy.unr.edu> 网站得到的 Geoffrey Blewitt 教授用 GIPSY 软件处理得的 GPS 连续观测站坐标时间序列[15]。本文使用 GMT 软件绘图[16]。

基金项目

中国地震局老专家科研基金课题资助, 课题编号 202305。

参考文献

- [1] 顾国华. GPS-地震预测利器, 《科学与中国》(十年辉煌 光耀神州)(10 集)的“气候与灾害科学技术卷” [M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [2] 顾国华, 王武星. GPS 观测得到的大地震前兆地壳形变震例[J]. 地震科学进展(原国际地震动态), 2020, 50(10): 30-39.
- [3] Gu, G.H. and Wang, W.X. (2013) Advantages of GNSS in Monitoring Crustal Deformation for Detection of Precursors to Strong Earthquakes. *Positioning*, **4**, 11-19. <https://doi.org/10.4236/pos.2013.41003>
- [4] Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W.C. and Goldfarb, J.M. (2013) Terrestrial Reference Frame NA12 for Crustal Deformation Studies in North America. *Journal of Geodynamics*, **72**, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.08.004>
- [5] Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W.C. and Gazeaux, J. (2016) MIDAS Robust Trend Estimator for Accurate GPS Station Velocities without Step Detection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 2054-2068. <https://doi.org/10.1002/2015JB012552>
- [6] Gu, G.H. and Wang, W.X. (2017) Preseismic and Coseismic Crustal Movements of the M7.3 Kyushu Earthquake on April 16, 2016 in Japan. *Earthquake Research in China*, **31**, 589-600.
- [7] 顾国华. 2016 年 4 月 16 日日本九州岛 M7.3 级大地震前及同震地壳运动[J]. 地震, 2017, 37(3): 8-37.
- [8] 黄立人, 顾国华. 静力位错理论[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- [9] Wang, W., Sun, W., Wu, Y., et al. (2014) Modification of Fault Slip Models of the Mw 9.0 Tohoku Earthquake by Far Field GPS Observations. *Journal of Geodynamics*, **75**, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.01.005>
- [10] Herring, T.A., Melbourne, T.I., Murray, M.H., Floyd, M.A., Szeliga, W.M., King, R.W., Phillips, D.A., Puskas, C.M.,

-
- Santillan, M. and Wang, L. (2016) Plate Boundary Observatory and Related Networks: GPS Data Analysis Methods and Geodetic Products. *Reviews of Geophysics*, **54**, 759-808. <https://doi.org/10.1002/2016RG000529>
- [11] 顾国华, 王武星, 占伟, 梁洪宝, 朱爽. 东日本 Mw9.0 大地震前、同震及震后地壳水平运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(12): 1669-1676.
- [12] Kreemer, C., Blewitt, G., Hammond, W. and Plag, H.-P. (2006) Global Deformation from the Great 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Observed by GPS: Implications for Rupture Process and Global Reference Frame. *Earth, Planets and Space*, **58**, 141-148. <https://doi.org/10.1186/BF03353370>
- [13] 顾国华, 王武星. GPS 观测得的智利及其邻区多次大地震前后地壳运动[J]. 地震科学进展(原国际地震动态), 2022, 52(5): 222-231. <https://doi.org/10.19987/j.dzkkxjz.2021-086>
- [14] 顾国华, 王武星, 占伟, 梁洪宝, 朱爽. 芦山 Ms7.0 大地震前和同震水平位移[J]. 地震学报, 2015, 37(1): 54-65.
- [15] Blewitt, G., Hammond, W.C. and Kreemer, C. (2018) Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **99**. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>
- [16] Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1995) New Version of the Generic Mapping Tools Released. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **76**, 329. <https://doi.org/10.1029/95EO00198>