

2016 年新西兰 7.8 级大地震 GPS 观测结果与弹性回跳模型

顾国华¹ 王武星¹

1 中国地震局地震预测研究所,北京,100036

摘 要:利用 <http://geodesy.unr.edu> 网站发布的新西兰和澳大利亚部分 GPS 连续观测站的数据处理结果,获取 2016-11-13 新西兰 7.8 级大地震同震位移、区域参考框架震前和震后水平位移。新西兰 CMBL 和 KAIK 站及日本 USUD 和 TSKB 等站的水平位移向量时间序列图直观且清楚地显示,同一 GPS 站同震水平位移方向和震前积累水平位移的总方向相反,同震水平位移是震前积累的水平位移的回跳或弹性回跳,因此,震前积累的水平位移是地震前兆。利用丰富的 GPS 观测结果讨论回跳或弹性回跳模型。分析东日本 9.0 级大地震 GPS 观测结果,表明,震前震中区一主应变为东西向的压缩,而地震的发生和同震形变是地震断层剪切形变所致。这与岩石破裂实验、应变理论和地震机制研究结果一致。

关键词:GPS;同震位移;水平位移向量;2016 年新西兰 7.8 级大地震;弹性回跳

中图法分类号:P228.42; P237.9 **文献标志码:**A

全球不少地区有密集的 GPS 观测站用作长期连续观测,监测地壳运动。在中国和日本、美国等国家和地区,地震预测是 GPS 观测的重要目的之一。自开展 GPS 观测以来,全球已发生多次 7~9 级大地震,观测得到了这些大地震前后的地壳形变,为地震预测研究积累了大量极为宝贵的资料,表明 GPS 可观测到大地震地壳形变等前兆,因而大地震是可以预报的^[1-9]。

新西兰位于太平洋板块和澳大利亚板块的边缘,地壳运动强烈,历史上曾多次发生 7 级以上大地震,1855 年曾发生 8.2 级大地震。2016-11-13 新西兰凯伊库拉(Kaikoura)发生 7.8 级大地震(42.53°S,173.05°E)。在此次地震南约 120 km 的 Christchurch,2011-12-23 发生 6.0 级地震。在离 7.8 级地震震中 300 km 范围内有 40 多个 GPS 连续观测站,但分布不均匀,离震中最近的观测站数量相对较少,多数观测站位于离震中 120 km 以外的北岛。有资料可用的 KAIK 站离震中最近,为 42 km。不少 GPS 连续观测站有自 2010 年以来,甚至更早的 GPS 连续观测。尽管近震中 GPS 连续观测站数量较少,GPS 连续观测

仍有利于研究此次大地震前后的地壳运动,为探索地震前兆提供难得的资料。

GPS 观测为验证与地震有关的形变提供数据,例如,地震位错的发展,提供了多次大地震,特别是巨大地震,大量的地壳形变资料。本文根据丰富的 GPS 观测结果,探讨地震的回跳或弹性回跳模型。为此,基于水平位移向量时间序列图,再次研究了 2011-03-11 东日本 9 级巨大地震的 GPS 观测结果,分析震前和同震形变机制的差别,以期有助于探索 GPS 观测到的大地震地壳形变前兆。

1 GPS 数据处理与分析

本文主要利用从 <http://geodesy.unr.edu> 网站得到的、Geoffrey Blewitt 教授用美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)GIP-SY 软件处理得到的新西兰、澳大利亚和日本 GPS 连续观测站 IGS08 全球参考框架坐标时间序列数据^[10]。

位移参考框架的核心站(或称为基准)是合理

分析区域位移的关键^[10-12]。太平洋板块相对澳大利亚板块南西方向的水平运动速率约为 40 mm/a,新西兰位于这两个板块的边缘,地壳运动强烈,不宜在其本土选取位移参考框架核心站。在包括澳大利亚大陆的大范围内,选择多个 GPS 连续观测站作为位移参考框架的核心站,得到水平位移,结果表明澳大利亚大陆东部相对位移小,是十分稳定的地区。其中,GABO 站距 7.8 级震中 2 033 km,是所选的核心站之一,选为此次地震位移的区域参考框架的核心站。区域参考框架不仅有利于分析大地震前的地壳运动异常,也有利于显示同震水平位移是震前位移的弹性回跳,证明大地震存在地壳运动前兆^[6-9]。

2 新西兰 7.8 级大地震同震水平位移

GPS 观测技术在地震监测中的优势^[7,13]也直

接体现在非常适宜于观测大地震,特别是巨大地震的同震位移,且 GPS 观测站离震中越近,站点密度越高,越有利于利用同震位移研究震源机制。同震位移有位错理论模型值^[14-15],可用于与 GPS 观测得到的同震位移相比较,是评判 GPS 大地测量(地震大地测量)观测精度的最重要的理论数值依据。

新西兰 7.8 级大地震兼有走滑和倾滑运动,图 1 为 GPS 观测得到的此次地震同震水平位移和垂直位移。同震位移以水平位移为主,北部以向北位移为主,特别是南岛北部向北位移大。北部离震中 129 km 的 GPS 站 CMBL 的同震位移最大,向北水平位移达 2 803.9 mm,垂直位移上升达 1 057.7 mm。而震中附近及南部以向东位移为主,如离震中最近的 KAIK 站水平位移为 914.1 mm,垂直位移上升为 706.7 mm。

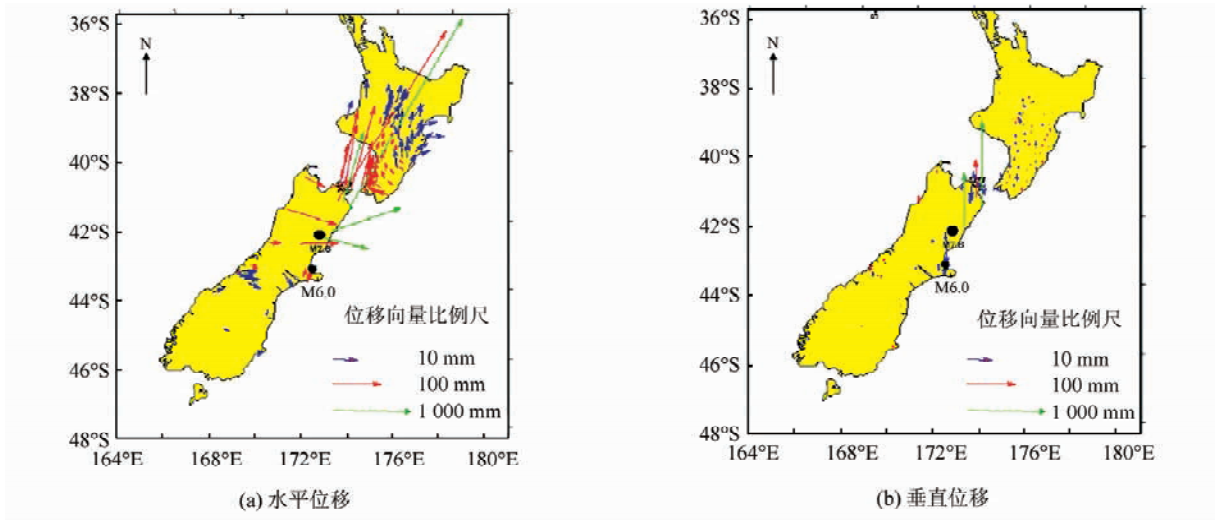


图 1 新西兰 7.8 级大地震同震水平位移和同震垂直位移
Fig.1 Coseismic Horizontal and Vertical Displacements of M7.8 Earthquake in New Zealand

新西兰 7.8 级大地震同震位移随震中距的衰减如图 2 所示,蓝色为东西分量 E,粉色为南北分量 N,棕色为水平位移向量长度 D,绿色为垂直分量 U。离震中 300 km 左右时,同震水平位移可达 20 mm,而同震垂直位移仅 3 mm 左右。

图 1 中 4 个 GPS 连续观测站 CLSK、V47B、LYTT 和 MQZG 离 6.0 级地震震中 5~22 km,同震水平位移为 13~50 mm。此 4 站离 7.8 级地震的震中距 117~134 km,同震水平位移仅为 17~21 mm。而震中距为 129 km 的 GPS 站 CMBL,7.8 级地震的同震水平位移近 3 m。5 a 前发

生过 6.0 级地震的 7.8 级地震震中附近,同震位移却相当之小。显然,前一次地震对后一次地震的影响十分明显。

据维基百科网站的 https://en.wikipedia.org/wiki/2016_Kaikoura_earthquake 条目介绍,此次地震能量释放最大的地方在震中北 100 km 处,恰是同震水平位移最大的 CMBL 站附近。地震导致至少 6 条断层,此地震是“至今研究过的地震中最复杂的”。同震水平位移也清楚地显示此次地震断层运动的复杂性。

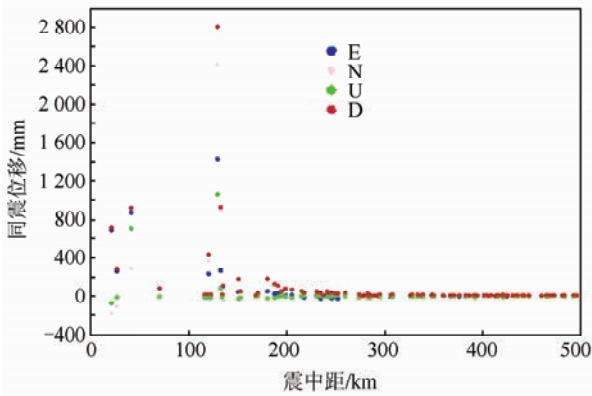


图 2 新西兰 7.8 级大地震同震位移随震中距的衰减
Fig. 2 Decay of Coseismic Displacements of M7.8 Earthquake in New Zealand with Epicenter Distances

3 新西兰 7.8 级大地震前的水平形变

GPS 观测得到的板块运动结果表明,地壳形变以水平形变为主,而水平位移和应变是水平形变分析最主要的形变量。应变计算结果受 GPS 观测站点分布和密度的影响显著。新西兰 GPS 观测站点分布不均,密度差别大,无法得到恰当反映新西兰 7.8 级大地震前后应变积累空间分布和时间过程,因此,本文主要讨论此次大地震前的水平位移。

以 GABO 站为位移区域参考框架核心站,2011-01-05~2016-11-06 新西兰 7.8 级地震前的水平位移场见图 3。图 3 中,位移比例尺用不同颜色的箭头表示不同量级的水平位移,蓝色为小于 10 mm 的位移,红色为大于 10 mm 的位移。震前新西兰南岛和北岛的地壳水平运动为明显的右旋旋转运动,但南岛和北岛的水平运动差异十分明显。图 3 中,南岛北部被北岛南部 GPS 站的水位移动向量所覆盖,实际上北岛南部沿海南西向位移十分显著,也即南岛受北岛南西向的挤压十分显著。南岛震中部以南地区水平位移以南西向为主,与震中以北的差异运动十分显著。

GPS 观测站 LYTT 离 6.0 级地震震中仅 9.6 km,离 7.8 级地震震中 122 km,忽略不规则的突变部分,图 3 中 7.8 级地震前水平位移达 244 mm。7.8 级地震时,LYTT 和与其邻近的其他 3 个 GPS 连续观测站不仅同震水平位移量小,且与 7.8 级地震震前水平位移方向一致。与同震水平位移一样,这 4 个观测站震前水平位移的关系也明显不同于相近震中距的其他 GPS 连续观

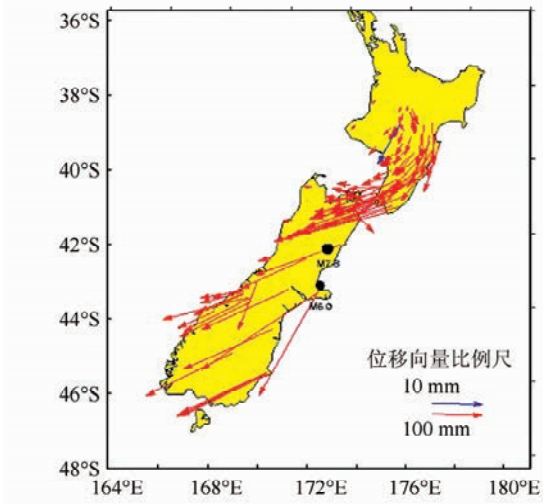


图 3 2011-01-05~2016-11-06 相对 GABO 站 7.8 级震前新西兰水平位移
Fig. 3 Horizontal Displacements in New Zealand from Jan. 5th, 2011 to Nov. 11th, 2016 Before the M7.8 Earthquake in the Regional Reference Frame with Core Station at GABO

测站。这一事实说明,当两次地震时空邻近时,在之前已发生过较大地震震中附近的 GPS 观测站,即使震后也难以根据同震水平位移判断后一次大地震是否存在前兆位移。

水平位移向量时间序列图直观且清楚地显示了各 GPS 连续观测站水平位移的时空变化过程^[14]。下文的水平位移分量时间序列图中采用连续计数的 GPS 周表示日期代码。

图 4 为 2011-03-11(GPS 1 626 周,周 5)东日本 9.0 级地震前后日本 USUD 和 TSKB 站(以北京附近的 GPS 连续观测站 BJFS 作为区域位移参考框架的核心站^[7])与新西兰 7.8 级大地震前后 CMBL 和 KAIK 站(以 GABO 站作为区域位移参考框架的核心站)的水平位移向量时间序列图,图 4 中还标出了各站的震中距,位移单位为 mm,图 4 中红色箭头为同震水平位移。TSKB 图右侧时间色码下端起始日期为 1998 年 11 月,上端终止日期为 2015 年 7 月;KAIK 图右侧色码下端起始日期为 2011 年 1 月,上端终止日期为 2017 年 1 月。图 4(a)中表示了 GPS 观测得到的地震波和位移分量时间序列。GPS 观测站同震水平位移(同震位移)是地震发生造成的。而图 4 显示,同震和震前水平位移为反向恢复关系。这表明震前积累的水平位移与同震水平位移,也即与地震的发生为因果关系,证明地震震前积累的水平位移是地壳运动前兆^[7]。东亚大陆和日本其他数百个 GPS 连续观测站均显示类似的观测结果,且震前

水平位移积累过程中,水平位移大的各站各自的水平位移基本保持在一条直线上。图4(a)中的USUD站示意标出GPS观测到的地震波,以此说

明GPS可观测得到地震前后及震时的地壳运动全过程,还给出了此站水平位移分量N和E的时间序列图。

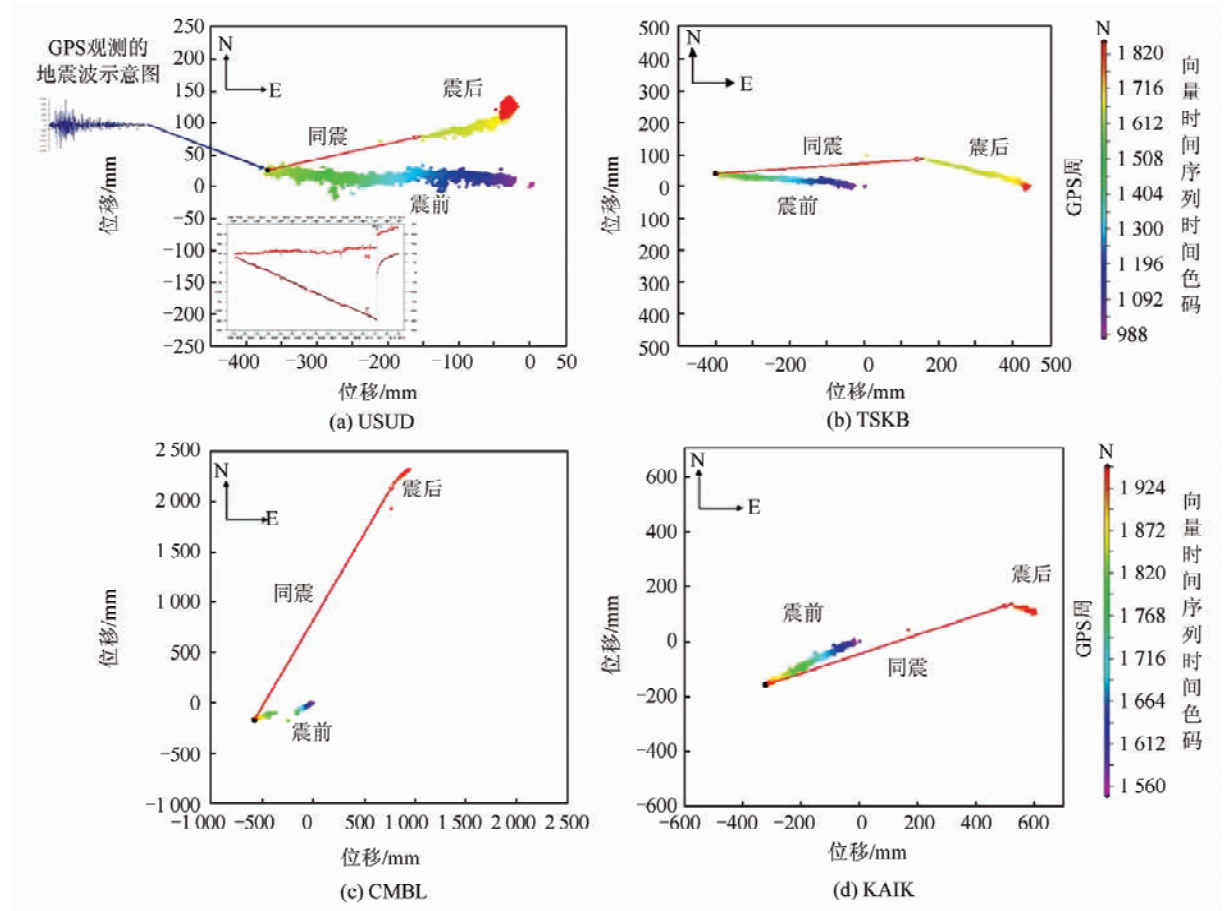


图4 日本USUD和TSKB与新西兰CMBL和KAIK等GPS连续观测站的水平位移向量时间序列图
Fig. 4 Time Series of Horizontal Displacement Vectors at USUD and TSKB in Japan and at CMBL and KAIK in New Zealand

尽管新西兰7.8级地震的断层复杂,但除了6.0级地震震中附近的GPS连续观测站外,特别是同震水平位移较大的站的GPS观测结果显示,各站同震水平位移方向都与震前累积的水平位移方向相反。新西兰个别GPS观测站震前水平位移有复杂的曲折变化(如WITH等站),其原因不明。同其他大地震一样,即使在离震中最近的站(如KAIK)也未见同震垂直位移是震前积累的垂直位移的回跳或弹性回跳。

4 地震形变前兆与弹性回跳模型

GPS观测得到的多次大地震孕育期形变过程表明,震级越大,同震位移范围越大,区域参考框架中离震中一定范围内同一观测站震前(幅度大的)水平位移基本保持在一条直线上,其总体方向与随后的同震水平位移方向相反。在远离震中

一定距离之外(如USUD等),同震水平位移量等于或小于震前积累的水平位移量,而震中附近的站(如TSKB、KAIK和CMBL等)同震水平位移量却远大于震前积累的水平位移量。由此推断,远离震中时同震水平位移是震前积累的水平位移的弹性回跳,而近震中时是非弹性形变回跳。总之,地震震前积累的水平位移是地壳运动前兆;而同震形变,包括同震位移,是震后分析其与震前形变的关系、追溯前兆形变的关键。

岩石破裂实验、介质应变理论和地震机制研究早已表明,剪切应变导致岩层破裂,破裂前破裂区介质由弹性变为非弹性;地震断层两侧的剪切应变导致岩层破裂,发生地震;在均匀介质中,最大剪应变方向即岩层破裂方向,最大剪应变与主应变方向之间的夹角为45°;同震位移是地震断层剪切破裂在震后残留在震中及其周围的地壳形变。得到普遍认可的里德弹性回跳模型认为,在

均匀弹性介质中,(走滑型)地震前断层两侧只有弹性剪切应变积累,引入剪切应变是地震成因必需的,由此,位于断层两侧的点在平行于断层的方向上反向位移;随着地震应变能的释放,断层两侧的地块震前积累的弹性剪切形变随之消失,孕震前断层同一侧的一条直线,震后随即恢复为一条直线。根据应变分析,在 xy 平面坐标系中, x 轴方向的应变分量为 ϵ_x , y 轴方向的应变分量为 ϵ_y ,剪切应变分量为 ϵ_{xy} ,则主应变分量 ϵ_1 和 ϵ_2 可表示为:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{1}{2} [4\epsilon_{xy}^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2]^{\frac{1}{2}} = \frac{\Delta}{2} + \frac{\gamma}{2} \\ \epsilon_2 &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{1}{2} [4\epsilon_{xy}^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2]^{\frac{1}{2}} = \frac{\Delta}{2} - \frac{\gamma}{2}\end{aligned}\tag{1}$$

式中, Δ 为面膨胀; γ 为最大剪应变,即水平主应变为剪应变和面膨胀之和。若式(1)中地震前只有剪切应变,且不考虑震前形变累积过程中的其他因素影响,根据此形变模型,震前位移 3 个分量应有模式相同、比例协调的时间变化过程,且尽管地震使断层两侧相对位移,但同震水平位移使在断层的同一侧的 GPS 观测站回复到(相对断层此侧的)初始位置。这是理想的里德弹性回跳现象。

然而,里德弹性回跳模型仅依据一次大地震质和量均极为有限的大地测量资料,模型简单,地震类型单一,而地震前后包括震中区在内的介质均匀并具有弹性,还有剪切形变,更不可能顾及震前复杂且未知的形变过程。最大震级达 9 级,多次大地震前后 GPS 观测得的大量地壳形变结果,理应为验证和发展此模型提供丰富的资料。东日本大地震是至今 GPS 观测资料最丰富、震级最大的一次地震,地壳运动突出,然而震前和同震位移图像并不复杂^[7,15],其断层构造不如新西兰 7.8 级大地震那样复杂。东日本大地震是最有利于探讨上述前兆地壳形变,是最典型,也最有说服力的一个震例。

东日本大地震前,日本和东亚大陆,甚至远至中国大陆西部,大量 GPS 连续观测站(包括图 4 中 USUD 和 TSKB 站)累积的水平位移的东西分量比南北分量大得多^[7]。图 4 中震前 USUD 和 TSKB 站向西水平挤压运动速率稳定,且各自几乎保持在同一直线上,其他水平位移幅度大的观测站也如此。由图 4 或对比图 1 和图 3 可看出,尽管同一 GPS 站震前积累(较大幅度)的水平位移基本在同一直线上,但同震水平位移与震前水平位移不在同一直线上,而有显著的方向差别。

图 4 中 USUD 站同震水平位移东西分量为南北分量的 4.1 倍,为垂直分量的 15.7 倍;自 1998 年 11 月中旬至地震前,累积水平位移东西分量为南北分量位移的 13.8 倍,约为垂直位移 14 倍(垂直位移误差较大)。尽管南北向同震位移显著,但震前位移却显著偏小。根据里德弹性回跳模型,同一站的同震与震前水平位移应在同一直线上,因此,震前各位移分量的比例应与相应同震位移分量的比例一致。GPS 观测表明,东日本大地震前恰因太平洋板块向西俯冲,震中及其周围形成非常显著的压缩形变,东西向为主应变方向之一。在震中附近(甚至更远处),同震水平位移主要反映地震断层破裂的剪切形变,而震前积累的东西向水平位移为主压应变,根据岩石破裂实验、地震成因和应变分析,两者形变机制不同,位移方向也必然有显著差别。

东日本大地震低倾角断层巨大的倾滑运动^[15-17]造成巨大的海啸,同时还兼有大幅度的走滑运动。同震水平位移包括两部分:一部分同震水平位移是巨大的倾滑运动的水平分量,即大范围向东水平位移^[7],大多数站南北分量位移约为东西分量的 1/10~1/3。另一部分为震时大幅度走滑运动在断层附近产生与断层走向平行或大体平行的同震水平位移。图 4 清楚显示,东西向同震水平位移是震前积累的水平位移的回跳或弹性回跳。图 5 为 2011-03-11 东日本 9.0 级大地震震前日本 GPS 连续观测站 J550、MIZU、TSKB 和 USUD 的水平位移 N 分量和垂直位移 U 分量时间序列,位移单位为 mm。图 5 中同时标注了各站的震中距,分别用红色和棕色标出了 MIZU 站水平位移 N 分量和垂直位移 U 分量 2008 年 5 月至震前的线性趋势。然而,图 5 中 GPS 观测站的结果显示,震前约自 2008 年 5 月起这些站南北向位移出现幅度相对较小的异常^[7,17],但异常位移的方向却与南北向同震位移方向相同。这更与上述里德弹性回跳模型所推测的震前位移图像完全相反。

震时巨大的倾滑运动也产生同震垂直位移,其位移量约为东西向同震水平位移量的 1/10 左右或更小。地震断层的倾滑运动是垂直剖面上的剪切破裂。图 5 中震前约自 2008 年 5 月起,几个站垂直位移也与同震垂直位移方向相同。这也与上述里德弹性回跳模型所推测的震前变化图像相反。还值得关注的是,震前垂直位移异常幅度大于南北向水平位移异常幅度。以图 5 MIZU 站为例,自 2008 年 5 月起垂直位移变化约 30 mm,而

南北向水平位移变化约 10~15 mm。两者位移变化差别的最大可能是因为垂直位移在地表之上为无约束的自由界面,而(南北向)水平位移四周均受约束。南北向同震水平位移比同震垂直位移大,但震前南北向水平位移量反而比震前垂直位移量小,这进一步说明,四周约束对震前水平位移影响更为显著。东日本大地震前很多站都有与图 5 类似的现象,震前东西向同震水平位移量比其他分量大得多,难以分辨是也否受类似南北向水平位移和垂直位移变化的影响。

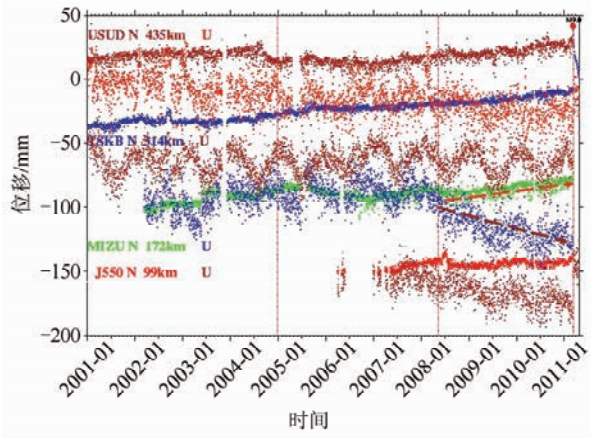


图 5 2011 年东日本 9.0 级大地震震前日本几个 GPS 连续观测站水平位移 N 分量和垂直位移 U 分量时间序列

Fig. 5 Time Series of Displacements of Vertical Component U and Horizontal Component N Before Tohoku Earthquake of M9.0 in 2011 at Several Stations of Continuous GPS Observation in Japan

总之,东日本大地震位移过程有两个明显的特征:(1)震前积累的东西向水平位移反映震区受东西向挤压,同震水平位移与震前积累的水平位移有显著方向差别;(2)即使在 2008 年 5 月前南北向和垂直位移未有与同震位移相反方向的变化。其他大地震前也有类似现象,特别是在震中周围相当大的范围内未见垂直位移的回跳或弹性回跳。此外,东日本大地震前,自 2008 年 5 月南北向和垂直位移出现与这两个分量同震位移反向的异常位移,特别是南北向位移时间序列显示的异常转折相当清楚,更易识别,是地震断层预滑^[17]产生的预位移,与日本学者研究得到的地壳运动前兆现象和异常时间一致^[17]。这些现象表明,大地震前的地壳运动不符合上述仅有剪切形变的里德弹性回跳模型。震中及其附近震前位移以水平压缩形变为主,最大剪应变方向即地震断层破裂方向,这一过程与岩石破裂实验一致。同震位移为地震断层破裂产生的剪切形变。均匀介质应变分析说明,最大剪应变与主应变方向之间

的夹角最大可达 45°,可见,同震水平位移与震前积累的水平位移机制不同,应该有显著方向差别。此外,地震断层预滑、地壳介质的不均匀性、应力场的变化,也会剪切应变和面膨胀量值,也就影响到同震与震前水平位移方向的变化。东日本等大地震的 GPS 观测结果表明,震前震中区及其附近的介质虽非弹性,仍易受压而形变,但难以剪切形变,应力与应变已非线性关系,随着剪切应力不断增大,震前震区附近南北向和垂直向出现小幅度的预位移。大地震发生前震中受显著的水平挤压,到震时突然转为大幅度剪切破裂。此种突然转变过程中的现象有可能是突破地震短临预报的重要线索。目前尚难以通过室内岩石破裂实验结果解释所述的震前的地壳形变现象,而有待更多的观测结果和深入研究。

尽管新西兰 7.8 级大地震震前和同震位移比东日本 9 级大地震震前和同震位移要复杂得多,但新西兰大地震兼有倾滑和走滑破裂,同震水平位移方向(见图 1)与震前累积的水平位移总方向(见图 3)之间差别显著,但两者总体上方向也相反,证明此次地震存在水平位移前兆。震前北岛南部对南岛北部南西西向的挤压十分显著,此后地震断层剪切破裂在南岛北部产生大幅度同震水平位移,这与东日本大地震前的状况相似。南岛震中以南的情况虽然较为复杂,但震前累积的水平位移总方向与同震水平位移方向还是相反的。7.8 级大地震前离震中最近的站未见震前有垂直位移与同震垂直位移方向相反的异常,更未有与同震垂直位移方向相同的垂直位移异常,这也从一个方面表明,震前垂直形变与里德的弹性回跳模型所预测的不一致。虽然 N 和 E 水平位移分量也未见与相应的同震水平位移分量方向相反的异常变化,但在北岛南部和南岛北部的一些 GPS 连续观测站自 2013 年下半年 E 分量出现较明显的同步异常变化,限于篇幅本文无法给出异常变化图。

GPS 连续观测结果得到的一类回跳或弹性回跳可直接从水平位移分量或向量时间序列看出,即同震水平位移大于(为回跳时)或等于(为弹性回跳时)震前积累水平位移,但两者位移方向相反。中国汶川和东日本大地震远场很多站的变化属于此种类型^[5-7]。另一类回跳或弹性回跳表现为,同震水平位移使一些站恢复到震前周围其他站的水平构造运动水平。2013-04-20 中国芦山 7.0 级大地震^[8]和 2016-04-16 日本九州岛 7.3 级大地震^[9]属于此种类型。

5 结 语

2016-11-13 新西兰 7.8 级大地震是板块运动的产物。采用澳大利亚东岸的 GPS 连续观测站 GABO 作为位移区域参考框架核心站,由此获取大地震同震位移、区域参考框架下震前和震后水平位移,显示此次地震的复杂性。除了 2011 年 6.0 级地震震中附近的 GPS 连续观测站,7.8 级大地震同震水平位移是震前积累的水平位移反向突变,是震前积累的水平位移的回跳或弹性回跳。这表明震前积累的水平位移是此次地震的前兆。震中附近和远离震中 GPS 观测到的同震和震前水平位移的对比表明,新西兰 7.8 级大地震前震中附近的形变也不是弹性形变。

为讨论弹性回跳模型,本文再次分析了 2011 年东日本 9.0 级地震同震和震前地壳形变的差别,结果表明震前震中及其周围积累的主要是压缩形变,地震断层破裂和同震位移主要是剪切形变的结果。这一形变过程与岩石破裂实验结果一致。根据应变分析,同震水平位移方向和震前积累的水平位移方向之间会有显著差别。地震断层预滑、地壳介质的不均匀性、应力场的变化,也会影响剪切应变和面膨胀量,也就影响到同震与震前水平位移方向的变化。多次大地震 GPS 未观测到同震垂直位移是震前位移的回跳或弹性回跳,也说明震前垂直形变与只有弹性剪切应变的里德的弹性回跳模型所预测的不一致。

研究临震前挤压形变积累极限水平和临震前从震前一段时间的挤压变形到导致突发地震的剪切变形的过程中地球物理场等的各种变化,可能有助于探索地震短临预测。

大地震震例难得,不断积累并研究观测得的新震例,总结认识,是地震预报研究的长期任务。

参 考 文 献

[1] Gu Guohua. GPS: Useful Technique for Earthquake Prediction[M]. Beijing: Publishing House of the Peking University, 2012(顾国华. GPS: 地震预测利器[M]. 北京:北京大学出版社,2012)

[2] Gu Guohua, Wang Wuxing. Advantages of GNSS in Monitoring Crustal Deformation for Detection of Precursors to Strong Earthquakes[J]. *Positioning*, 2013 (4): 11-19

[3] Gu Guohua, Wang Wuxing, Meng Guojie, et al. Crustal Movements Before and After the Great Wenchuan Earthquake Observed by GPS [J]. *Geo-*

matics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1 336-1 339(顾国华,王武星,孟国杰,等. GPS 测得的汶川大地震前后的地壳运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1 336-1 339)

[4] Gu Guohua, Wang Wuxing, Xu Yueren, et al. Horizontal Crustal Movement Before the Great Wenchuan Earthquake Obtained from GPS Observations in the Regional Network [J]. *Earthquake Science*, 2009, 22(5): 471-478

[5] Gu Guohua, Meng Guojie, Wang Wuxing. Anomalous Crustal Movements Before the Great Wenchuan Earthquake Obtained from GPS Observations [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2011, 2(2): 13-22

[6] Gu Guohua, Wang Wuxing. Far-Field Crustal Movements Before and After the 2011 Ms 9.0 Japan Earthquake from GPS Observations [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2011, 2(3): 1-7

[7] Gu Guohua, Wang Wuxing, Zhan Wei, et al. Pre-seismic, Coseismic and Postseismic Horizontal Crustal Movements of the M9.0 Tohoku Earthquake in 2011 in Japan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40 (12): 1 669-1 676(顾国华,王武星,占伟,等. 东日本 Mw 9.0 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): 1 669-1 676)

[8] Gu Guohua, Wang Wuxing, Zhan Wei, et al. Pre-seismic and Coseismic Horizontal Crustal Movements of the Ms 7.0 Lushan Earthquake on April 20, 2013 in Sichuan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2015, 37(1): 54-65(顾国华,王武星,占伟,等. 芦山 Ms 7.0 大地震前和同震水平位移[J]. 地震学报, 2015, 37(1): 54-65)

[9] Gu Guohua. Preseismic and Coseismic Crustal Movements of the M7.3 Kyushu Earthquake on April 16, 2016 in Japan[J]. *Earthquake*, 2017, 37 (3): 28-37(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): 28-37)

[10] Blewitt G, Kreemer C, Hammond W C, et al. Deformation Studies in North America [J]. *Journal of Geodynamics*, 2013 (72): 11-24

[11] Gu Guohua, Shen Xuhui, Wang Min, et al. General Characteristics of the Recent Horizontal Crustal Movement in Chinese Mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 14(4): 384-393

[12] Gu Guohua, Fu Yang, Wang Wuxing. Horizontal Crustal Movement in Chinese Mainland from 1999 to 2001 [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 17 (Supp.): 53-60

[13] Kreemer C, Blewitt G, Hammond W C, et al. Global Deformation from the Great 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Observed by GPS: Implications for Rupture Process and Global Reference Frame[J]. *Earth Planets Space*, 2006, 58: 141-148

[14] Gu Guohua, Zhang Jing, Wang Wuxing. Time Series of Horizontal Displacement Vectors Obtained at Fiducial Stations in the Crustal Movement Observations of China[J]. *Earthquake*, 23(2): 39-47 (顾国华, 张晶, 王武星. 中国地壳运动观测网络基准站水平位移向量时间序列[J]. 地震, 2003, 23(2): 39-47)

[15] Wang W, Sun W, Wu Y, et al. Modification of Fault Slip Models of the Mw 9.0 Tohoku Earthquake by Far Field GPS Observations [J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 75: 22-33

[16] Iinuma T. Coseismic Slip Distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) Refined by Means of Seafloor Geodetic Data[J]. *J Geophys Res*, 2012, DOI:10.1029/2012JB009186

[17] Shinzaburo O, Takuya N, Hiroshi M, et al. Preceding, Coseismic, and Postseismic Slips of the 2011 Tohoku Earthquake, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117, DOI: 10.1029/2011JB009120

Results of GPS Observations for M7.8 Earthquake in 2016 in New Zealand and Discussion on Elastic Rebound Model

GU Guohua¹ WANG Wuxing¹

¹ Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: the coseismic and the preseismic displacements in the regional reference frame were obtained for the M7.8 earthquake on Nov. 13, 2016 in New Zealand based on time series of coordinates at continuous GPS observation stations, available from <http://geodesy.unr.edu>, in New Zealand and Australia. horizontal displacement time series vectors at CMBL and KAIK in New Zealand and at USUD and TSKB in Japan are shown. The vector time series show clearly with direct visual effect that the coseismic horizontal displacements were sudden and dramatic, and opposite to the accumulated pre-seismic horizontal displacements. These represent a rebound or elastic rebound of the accumulated pre-seismic horizontal displacements. Therefore, the accumulated preseismic horizontal displacements were precursors to the earthquakes. Results produced from the abundant GPS observations are used to discuss the rebound and elastic rebound models. Detailed reanalysis on the results of GPS observations of the M9.0 Tohoku earthquake in Japan shows that one principal strain in the region at and around the epicenter was dominated by compression in the east direction before the earthquake. Moreover, the earthquake and the coseismic displacements were the result of shear rupture at the earthquake faults. This agrees with test of rock failure results, strain analysis, and consistent with earthquake mechanisms.

Key words: GPS; coseismic displacement; horizontal displacement vectors; M7.8 earthquake in New Zealand in 2016; elastic rebound

First author: GU Guohua, professor, specializes in GPS data processing, crustal deformation and precursors to earthquakes. E-mail: ggh@seis.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41274098; the Basic Research Plan of the Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, No. 2013IES0407; the Research Fund of the China Earthquake Administration for Senior Scientist.