

全建军, 刘水莲, 郑永通, 等. 小陶地震台体应变资料及短临异常特征分析[J]. 华南地震, 2017, 37 (S1): 15-22. [QUAN Jianjun, LIU Shuilian, ZHENG Yongtong, et al. Strain Data and Earthquake Short Impending Anomaly Characteristics Analysis of Xiaotao Seismic Station[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(S1): 15-22.]

小陶地震台体应变资料及 短临异常特征分析

全建军^{1, 2}, 刘水莲¹, 郑永通³, 陈美梅¹,
林慧卿¹, 刘礼诚¹, 郑志泓², 赖见深⁴

(1. 福建省地震局永安地震台, 福建 永安 366000; 2. 福建省地震局南平仪器维修分中心, 福建 南平 363000;
3. 福建省地震局龙岩地震台, 福建 龙岩 364000; 4. 福建省地震局东山地震台, 福建 邵武 354000)

摘要: 介绍了小陶地震台 TJ-II 钻孔体应变仪的地质构造特征以及钻孔岩芯物理特性, 分析小陶 TJ-II 体应变仪运行情况, 并用 M2 波潮汐因子及其相对中误差等来衡量其总体精度与稳定性。通过对小陶台 TJ-II 一年来观测资料的同震效应与短临异常特征分析, 初步探讨地下形变对小陶地区未来中强震预测研究的实际意义。

关键词: 地质构造; 钻孔应变仪; 同震效应; 异常分析

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) S1-0015-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.S1.002

Strain Data and Earthquake Short Impending Anomaly Characteristics Analysis of Xiaotao Seismic Station

QUAN Jianjun^{1, 2}, LIU Shuilian¹, ZHENG Yongtong³, CHEN Meimei¹,
LIN Huiqing¹, LIU Licheng¹, ZHENG Zhihong², LAI Jianshen⁴

(1. Yongan Seismic Station, Fujian Earthquake Agency, Yongan 366000, China;
2. Nanping Equipment Maintenance Sub-center, Fujian Earthquake Agency, Nanping 353000, China;
3. Longyan Seismic Station, Fujian Earthquake Agency, Longyan 364000, China; 4. Dongshan Seismic Station, Fujian Earthquake Agency, Shaowu 354000, China)

Abstract: This paper describes the geological characteristics and core physical characteristics of the body strain gauge TJ-II in Xiaotao seismic station, and introduces the operation of TJ-II body strain meter in Xiaotao seismic station. The paper uses the tide factor of M2 wave and the relative errors to measure the overall accuracy and

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 2013 年中国地震局“地震监测、预报、科研三结合”课题 (131202); 2013 年福建省地震局科研项目基金 (SF201305) 联合资助。

作者简介: 全建军 (1984-), 男, 工程师, 主要从事台站形变、电磁观测和信息节点、地震仪器维护管理工作。

E-mail: qjkt@163.com.

stability. Based on the analysis of the characteristics of the coseismic effect and short impending anomaly of observation data from the TJ-II over the past year, the practical significance of the study on the prediction of the future middle strong earthquakes in the future of the small pottery area is preliminarily discussed.

Keywords: Geological structure; Borehole strain meter; Coseismic effect; Anomaly analysis

0 引言

小陶地震台位于福建省永安市西南部,处在中生代红色断陷山间盆地,外缘绕以中-古生代岩层的丘陵山地,是北东向政和-海丰断裂带与北西向清流-晋江断裂带交汇处,为福建省东南沿海地震带孕震构造之一,具有良好的构造地震活动背景^[1]。据有史地震记载以来,该区域自北宋治平四年(1067年)后发生过多级 $M \geq 4 \sim 5$ 级地震,近代福建省境内最大一次地震(1997年5月31日 M_s 5.2级)就发生在永安小陶,至今该区小震仍较活跃,微震频繁。

选取地震前兆观测点时,该点应当能控制一个地区的构造活动,原因是活动断裂处与其上一些有利的构造部位往往是应力集中部位,出现前兆异常的概率要明显高于远离断裂处,鉴于小陶所处地理位置与特殊环境,选择该台开展该区域的地下形变观测较为理想^[2]。2013年3月福建省地震局在小陶中学内钻一口井,2015年1月架设了TJ-II型4#体积式钻孔应变仪,及气压、井下水位和室温等辅助测项,开展对永安小陶的地下应变场观测。

小陶地震台采用的TJ-II型钻孔应变仪,其主要是对地壳应变进行观测、对地球物理学及地球动力学进行研究的动态前兆仪器。该体应变通常安装在钻孔深井内,选取特种水泥当作耦合材料,稳定性与观测精度均较高,其不仅能清晰的记录到固体潮汐变化,也能记录到地壳在地震孕育过程中发生的伸缩形变,非常适合用于观测固体潮汐与地壳应变的连续变化,能为探索地震孕育过程中应变变化规律提供数据,也能为地球弹性探索提供重要参数指标^[3]。通过TJ-II体应变仪对地壳内部的应变状态进行精密观测,熟悉地震应变前兆的短、中、长期,临震以及震后调整的时空分布与变化发展过程,为探索地震学以及防震减灾工程建设提供基础性研究数据^[4]。TJ-II型体积式钻孔应变仪灵敏度 $A > 2.0 \text{ mV}/(1 \times 10^{-8})$;噪声水平 $< 0.1 \text{ mV}$,基本量程为 $\pm 6.0 \times 10^{-9}$;分辨率 $< 1.0 \times$

10^{-9} ;标定幅度 $(4 \sim 9) \times 10^{-9}$;格值优于 $5 \times 10^{-9}/\text{mV}$,应变仪探头放置在钻孔深井内,可有效避免地面人类活动干扰。

1 钻孔应变与仪器安装

1.1 观测原理

通常情况下,应变仪是一台内装有多微变位移量传感元件的地下形变观测仪器。经过地壳中岩石间应力的相互作用,钻孔应变仪内第 i 个传感器会检测到岩体发生的应变值,由于探头感应到的岩体间应变是伴随时间而改变的参量,所以存在的 M_i 与岩体平面应变场的相对变化值 ε_1 、 ε_2 、 θ_i 之间有以下关系:

$$M_i = A(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + B(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta_i \quad (1)$$

公式(1)中, ε_1 是应力场相对变化量的最大主应变值; ε_2 是应力场相对变化量的最小主应变值; θ_i 是 ε_1 矢量方向沿第 i 个传感元件的夹角(沿逆时针方向为正); A 是应变量的灵敏系数; B 则是剪切差方向应变的灵敏系数。

当 $A \neq 0$, $B=0$ 时,公式(1)描述应变仪就是一台体积式应变仪。即:

$$M = A(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (2)$$

也就是将一个能测量到微变位移量的传感器放置在钻孔应变仪探头内,利用传感器不间断的检测岩体间应变改变量,我们就可以计算 $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ 的值,即地下岩石间在内应力作用下引起的应变值^[5]。TJ-II井下应变仪就是基于上述原理观测地下变形应变位移量的,仪器频带响应一般在DC~几十赫兹之间。

1.2 台址概况

小陶台钻井孔台址位于永安市小陶镇第二中学校内,117.131°E, 25.729°N, 高程: 65 m, 东侧为新华夏系政和-海丰断裂带,西侧为邵武-河源断裂带,北南分别有NW走向的次一级断裂:永安-晋江和九龙江断裂所控制(图1)。井孔所处地表为第四系土层所覆盖,厚度约10 m,表现为

软塑-可塑状态。第四系覆盖层下分布地层主要岩性为花岗岩,风化较弱,岩石强度高、结构致密、岩石颗粒硬度大,局部岩石硅化富含石英,具有强研磨性,研磨性最高可达 10 级,孔区上部土层可钻性级别在 I-VI 级,下部级别在 IX-XI 级。钻孔位于小陶中学西侧大约 10~12 m,钻孔南侧 200 米处流经一条小河,其水位较低,且水流速度也较慢,在雨量丰沛的 4~6 月份,也未发现水流对小陶 TJ-II 体应变观测造成干扰。



图 1 小陶钻孔体应变所处地质断层分布图

Fig.1 Fault distribution of the study area

1.3 钻孔岩石及岩性

(1) 钻孔孔径 $\Phi 150$ mm, 终孔孔径 $\Phi 130$ mm, 成井深 81.27 m。地表至 8.50 m 处,呈浅褐色,主要成分为粉粘粒,含砂量不均,以中细粒石英砂为主;8.50 m 至 20.12 m 处,灰黄色,主要由长石、石英等矿物风化后的粘粉粒组成,可见少量黑云母碎片。

20.12~23.00 m 处,灰褐、褐黄色,以石英为主,为全风化花岗岩。

23.00~26.23 m 处,灰褐色,以长石、石英为主,为强风化花岗岩。

26.23~81.27 m 处,青灰色、灰白色,以长石、石英为主,为中-微风化花岗岩。

(2) 安装探头时发现原 81 m 的钻孔已经堵在 68.9 m 处,为确保探头及水泥不下漏,在井底填铺小碎石,最后应变传感器安装(以探头底部为

准)在 66 m 处,井水位距离地表 3.8 m,属浅层渗透水。

(3) 井深 23 m 以下的岩石以长石、石英石体为主,风化较弱,岩石强度高、结构致密、岩石颗粒硬度大,局部岩石硅化富含石英,具有强研磨性,研磨性最高可达 10 级,孔区上部土层可钻性级别在 I-VI 级,下部级别在 IX-XI 级,通过对岩芯的详细分析可以知道,小陶二中的钻孔井完全满足井下应变传感器的安装条件。

1.4 应变仪安装

在进行体应变安装时,应事先进行洗井以及相关井孔实验,以保证体应变探头在下井安装时,不会有障碍物在井壁和井底;此外还需按照钻孔柱状图,再次确认钻孔深度与沉砂孔深度。在 TJ-II 传感器与筒体组装一体后下井之前,首先将称好体积并洗净的石子,徐徐放入井内,再向井内注入一定容量与比例的水泥浆,十几分钟后,在井底的水泥浆尚未固化前把仪器放入井内,以其自重缓慢坠入水泥浆底部,并按照钻孔柱状图与已测量的钻孔深度对探头放置深度进行验证,最后根据体应变固体潮日变周期规律,检查并核实数据曲线呈现正常变化后,将钢丝绳放松,将电缆与钢丝绳井口固定,数小时后井内水泥浆固化,仪器与基岩体融为一体^[6]。小陶台 TJ-II 地面电子仪器安装在观测室机柜内,应变传感探头与地面仪器间的电缆长约 95 m,为防止外界干扰对观测数据以及仪器正常工作造成影响,尤其是防范强雷电对井下探头的影响,工作人员将数据电缆套入镀锌合金管内进行屏蔽。

1.5 应变仪运行

TJ-II 体应变仪探头从井下获取到应变位移变化量的输出电压,地面电子仪器在逻辑控制下,首先将探测的岩体应变位移变化输出电压实施序列采集、信号滤波与放大以及数字数据排列和保存,然后通过特定格式数据流方式传输到台站前兆节点服务器的数据库内,服务器统一使用 SUSE Linux 10 操作系统和 Oracle DATABASE 10 g 数据库,实现对小陶 TJ-II 体应变仪的数据采集、入库、同步交换和监控等,最后通过网络传输到省局前兆台网中心^[7]。此外地面电子仪器能产生一个 2 s 的恒流信号(标定信号)送给井下探头中的一个电阻丝,电阻丝发热使硅油产生微小膨胀,以检查整个测量系统的灵敏度。台站同志日常可以登

入地震前兆观测数据处理系统对采集的应变数据进行分析,并将体应变的时间日变曲线绘制出,通过对应变数据的预处理及异常的分析与识别,为福建局的地震前兆分析会商提供基础数据。

小陶地震台 TJ-II 观测系统运行至今,认为该观测井在点位选择、止水工艺及地下基岩密实等因素条件合适。体应变观测曲线能反映其具有的固体潮特性,观测日变趋势明显,观测效果较好。该观测点能提供较为连续、准确、可靠、完整的地震前兆观测资料,目前小陶 TJ-II 观测资料已应用在永安地震台以及福建省地震局的月、周分析会商中。

2 体应变观测资料质量分析及映震效应

小陶地震台 TJ-II 体应变仪安装后的日变曲线光滑流畅,运行半月后,未出现开阀现象,仪器采集的固体潮曲线清晰可见,分钟值曲线呈现的

噪声也较低,日常变化规律明显,具有良好的周期特征,与理论固体潮也有较好的一致性。众所周知,数据的完整性、稳定性、可靠性是衡量观测数据质量的重要指标,只有观测数据满足观测技术标准要求时,其使用价值才高,才能更有利于识别出观测数据的日常动态变化,有助于异常动态的识别。为此,很有必要对小陶体应变观测资料进行完整性、稳定性、可靠性分析。

2.1 观测资料的完整性分析

小陶地震台 TJ-II 应变仪 2015 年 1 月 23 日安装,投入运行至今,工作状态良好,记录的固体潮曲线平滑、清晰,具有较明显的潮汐变化周期规律(见图 2)。利用(1)式计算统计小陶台体应变 2016 年 1 月至 9 月分钟值观测资料的完整连续率,其数据完整连续率达 99.95%。

$$\text{完整连续率} = 1 - \frac{\text{实际观测值}}{\text{应有观测值}} \times 100\% \quad (1)$$

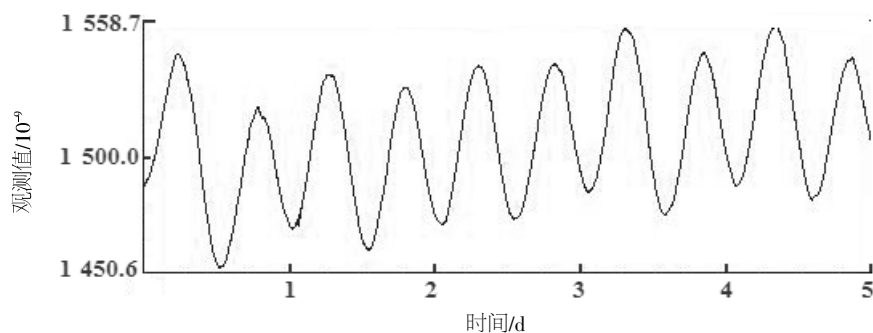


图 2 2016 年 9 月 1 日-5 日小陶台 TJ-II 体应变观测日变曲线

Fig.2 Daily observation curve of body strain recorded by TJ-II in Xiaotao station from September 8th to September 11th, 2016

2.2 观测资料的稳定性分析

通过观测数据的年变幅度以及年零漂两个指标,可以用来对观测仪器的稳定性进行检测,由于钻孔体应变仪的传感探头埋深较深,而且井下的基岩已与膨胀水泥耦合为一体,所以从理论上分析体应变探头不会因地表温度变化而影响到年变形态,正常年变幅应处在一个波动较小且较稳定的范围之内;我们检测前兆仪器与墩基的稳定度主要是看年零漂值,例如仪器年零漂值较小的墩基通常较为稳定且耦合程度较高^[8],获得观测数据的精确性便高。图 3 是小陶台体应变的 2016 年 1 月至 9 月的月整点值变化曲线图,从图 3 可以看出小陶台 TJ-II 钻孔体应变观测值月潮汐形态清晰,一阶差分去除趋势变化后,大小潮清晰明显,月变幅在 100E-9 以内,趋于稳定。

2.3 观测资料的可靠性分析

通常对固体潮汐形变进行分析时,检测观测仪器以及观测资料的内在精度常选用 Venedikov 调和分析法^[9]。本文对小陶台 TJ-II 体应变 2016 年 1 月至 9 月的观测资料进行分析,采用的是 Venedikov 调和分析法对观测数据进行逐月分析,并通过分析结果来追踪潮汐参数伴随时间的变化,表 1 列出了按照月序列的潮汐参数对小陶台体应变观测资料进行统计的结果,通过表 1 的统计结果可以看出小陶台体应变数据完全符合形变规范要求的 $\alpha \geq 2.0$, $\delta_\alpha/\alpha \leq 0.05$ 的内在精度要求。

2.4 应变曲线映震效应

当构造应力增大到一定阶段后会使断层产生滑动造成地震发生;从另一方面说,断层产生滑

动将会对应力进行释放。当一个大地震发生时，发震断层的应力释放分为两种情况，一种是在某些断层上造成应力释放，使其更加趋于稳定，这种情况一般发生在“应力影”区域上；一种是在某些断层上造成应增大，使其趋于滑动，即所谓

的应力触发。**TJ-Ⅱ**型体应变仪高频特性好、耐振动、记录动态信息不失真，它能很好地感应应力触发下的应变波动，当它进行动态观测时，记录地震波的能力较好，相当于“速度型”的无摆地震计^[10]。

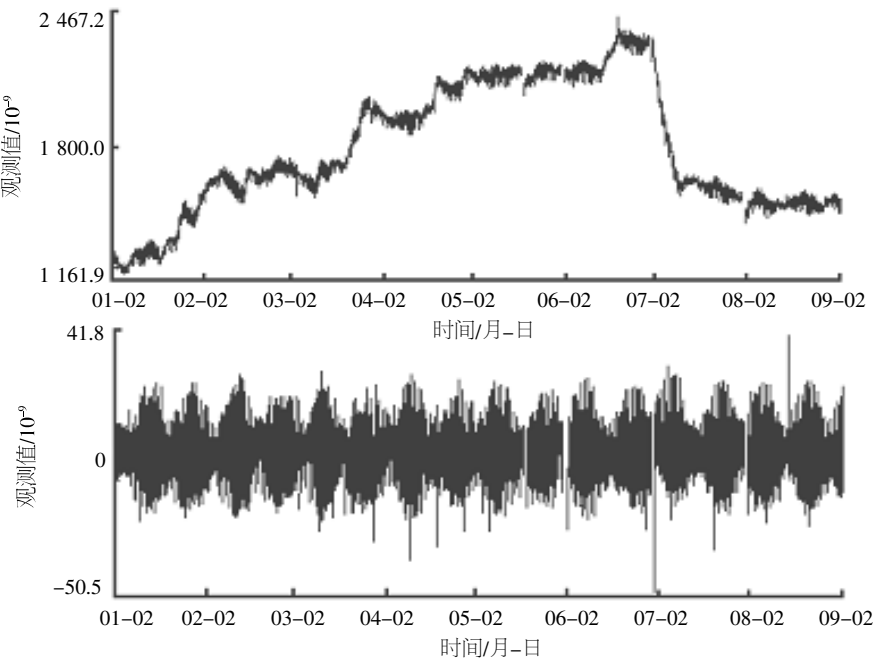


图 3 小陶台 TJ-Ⅱ 体应变月正值及一阶差分曲线图 (2016-01-01~2016-09-02)

Fig.3 Monthly punctuality value and first order differential curve of TJ-Ⅱ body strain in Xiaotao station

表 1 小陶台体应变资料调和和分析逐月统计

Table 2 Monthly statistics of harmonic analysis of borehole strain data in Xiaotao seismic station

时间/月	潮汐因子/ α	中误差/ δ_α	相对误差 δ_α/α	潮汐相位滞后	潮汐相位误差
1	4.054 0	0.048 5	0.012 0	7.060 3	0.685 6
2	4.037 6	0.051 1	0.012 6	5.859 6	0.724 6
3	3.933 5	0.061 0	0.015 5	3.074 4	0.888 8
4	3.951 4	0.070 2	0.017 8	4.699 1	1.017 3
5	4.118 3	0.069 0	0.016 8	7.676 6	0.960 2
6	4.097 8	0.047 4	0.016 8	5.290 0	0.962 8
7	4.009 2	0.075 1	0.011 8	5.435 9	0.677 4
8	4.068 9	0.073 0	0.018 5	6.901 3	1.057 4
9	4.108 4	0.073 0	0.017 8	8.067 3	1.017 9

小陶地震台 **TJ-Ⅱ** 应变仪自运行以来，映震能力比较强，多次记录下强远震发生时明显的同震响应过程，具有显著的振幅效应以及丰富的应变频率，它能很好地反映出每个大地震发生时导致的地下应变变化过程。2016 年 1 月 1 日至 9 月 15 日小陶体应变共记录到 30 次全球强震同震响应，其中台湾发生的 5 次 5.0 级以上地震全部记录到，显示出较强的地震响应能力。小陶台体应变记录到的同震形态受震级大小、震中距离的不同

所影响，幅度、形态不一，从曲线形态上能划分成两大类：脉冲波和地震波。近震、小震同震响应以脉冲波为主；远震、强震持续时间长，面波丰富，形态为完整的应变地震波。
2016 年 1 月 19 日台湾台东(北纬 22.83°，东经 121.42°，井震距 541 km)发生了 5.4 级地震，小陶体应变资料清晰地记录到了该震的地震波(图 4a)，地震发生时刻 10 时 13 分，地震波到达时刻 10 时 21 分，台东地震距离较近，以快速变

化为主,变化形态为突降型,下降幅度为 3.4×10^{-9} ; 2016 年 4 月 17 日厄瓜多尔(北纬 0.35° , 西经 79.95° , 井震距 16 603 km)发生了 7.5 级地震,小陶体应变资料同样也清晰地记录到该震的地震波

(图 4b),地震发生时刻 07 时 58 分,水震波到达时刻 08 时 23 分,厄瓜多尔地震较远,变化形态为震荡型变化,地震波最大振幅为 23.2×10^{-9} ,振荡持续时间 167 min。

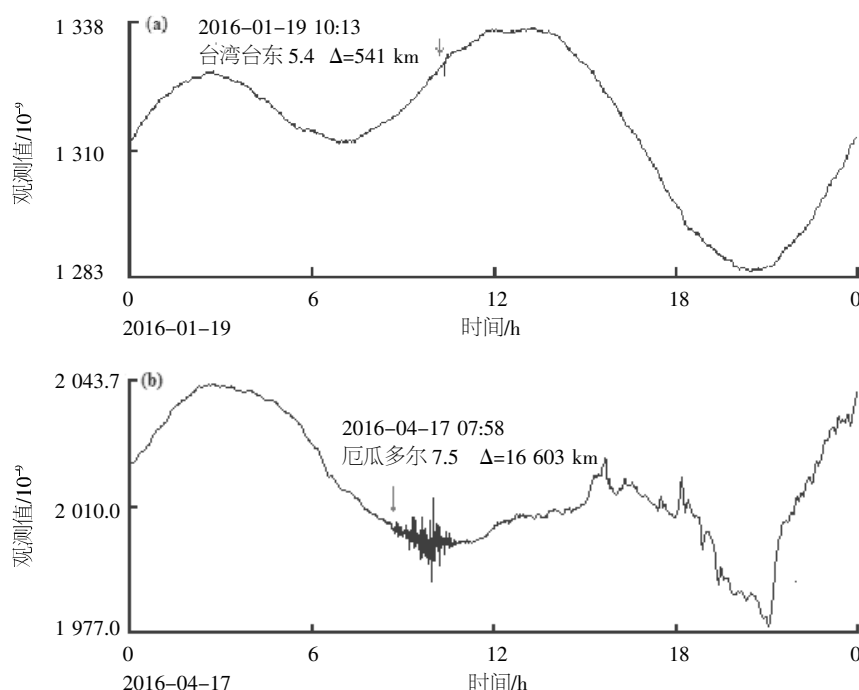


图 4 小陶体应变记录 2016 年台湾台东 5.4、厄瓜多尔 7.5 级地震的同震效应曲线

Fig.4 Coseismic effect curve recorded by Xiaotao body strain in 2016 Taitung $M5.4$, Ecuador $M7.5$ earthquake

3 短临异常前兆特征

运用高灵敏度的地应变(应力)仪器进行观测时,如果周围地下岩体刹时产生突跳或者某一急剧变形,或者由于区域应力长时间累积使应变位移发生变化,地应变仪将记录一类呈现某段随时间改变或异常瞬变的岩体变形移位过程,通过长期监测并记录下该地区应变数据曲线,熟悉其改变规律,有助于对该地区发生的短临形变瞬跳异常进行识别,也对预测和研究区域地震活动趋势有着非常重要的意义。我们对小陶台 TJ-Ⅱ体应变仪一年来的观测记录资料进行数据处理与曲线特征辨别,并通过对数据进行初步分析,对小陶地区未来地震预测的意义进行了初步的探讨。

地震震例的累积分析与地震预报探索的历史,二者存在紧密相连的关系,通过震前异常特征的总结对实施地震预报实践有一定的借鉴价值^[1]。小陶地震台 TJ-Ⅱ体应变观测井的岩体具有较好节理特征,从记录的波形分析上看日本九州岛 2016 年 4 月 16 日发生的 7.3 级地震,在地震发生前 7 小时曾发生了曲线阶跃异常(图 5 方框指示),在排

除是外界干扰因素造成的影响下,本次曲线阶跃异常虽然持续时间非常短暂,且阶跃幅度也较小,但可以知道在震前岩石内在受到某些外力挤压后发生了短时的应力失衡现象,这种变化确实是震前的一种应力改变,研究这种现象对提高临震预报能力很有意义。

经过数理统计分析,发现小陶应变仪记录到的台湾地区全部地震应变波形,均未发现有震前异常阶跃现象出现,但发生在洛亚带群岛、努瓦阿图群岛及日本的部分 M_s 7.0 级以上地震,应变波形在震前均发生了程度各异呈压性或张性的异常阶跃,例如 2016 年 8 月 12 日洛亚带群岛 7.2 级地震、2016 年 4 月 29 日努瓦阿图群岛 7.0 级地震(图 6 方框所示),可以知道小陶台钻孔应变仪对部分大震及远震都能记录下某些地震应变前兆异常。学者牛福安及张晶老师通过岩体的破裂模拟实验研究亦证明^[2]:如果围绕区域发生剧烈的地壳活动时,所围区域有可能出现失稳前弹性应变能在局部地区的高度积累,达到峰值后,在薄弱地方出现断裂或者断层处出现粘滑,在断裂出现或者断层出现粘滑前会发生一段短暂的预破裂以及

预滑现象，孕育一个波速较慢但又不同于地震波的长周期形变波。如果小陶台 TJ-Ⅱ 型钻孔应变仪所采集到的这些长周期形变波属于此类，那么对此进行细致研究应该很具有短临预报意义。

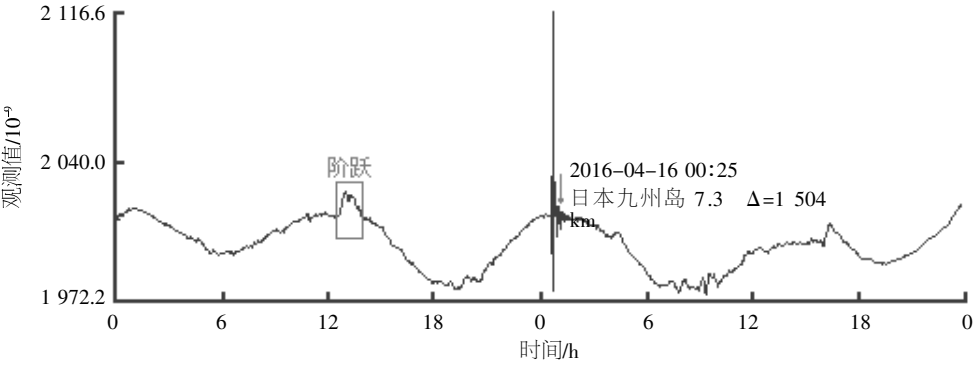


图 5 2016 年 4 月 15 日至 16 日小陶 TJ-Ⅱ 连续记录原始曲线图

Fig.5 Original curve recorded by TJ-Ⅱ in Xiaotao station from April 15th to April 16th, 2016

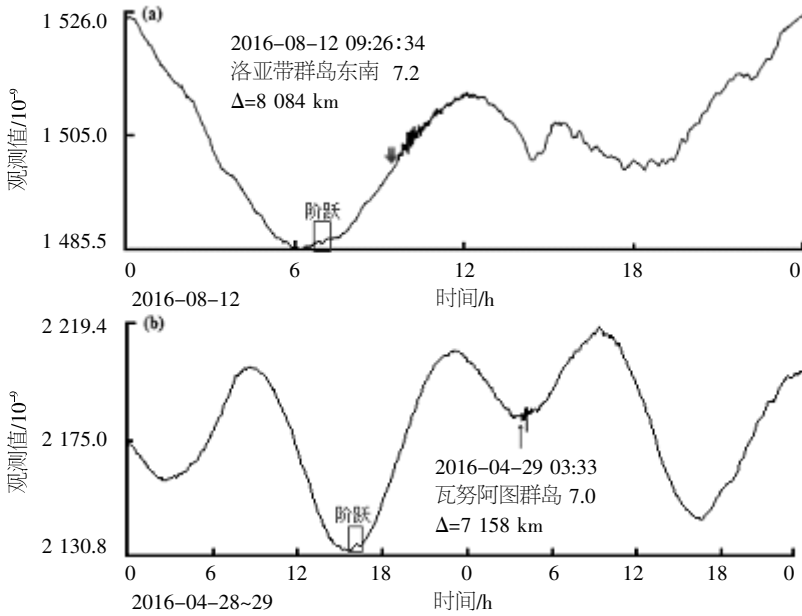


图 6 小陶体应变在洛亚带群岛 7.2、努瓦阿图群岛 7.0 级地震前曲线阶跃图

Fig.6 Curve step diagram recorded by Xiaotao body strain before the Loya islands *M* 7.0 earthquake and Nuyatu islands *M* 7.2 earthquake

TJ-Ⅱ 型体应变仪在一定程度上也可以记录下区域地下应变瞬间位移导致应变周期瞬变的一些过程，如：2016 年 7 月 14 日永安小陶发生 M_L 2.3 级地震，震中距小陶台 21 km。通过分析小陶台 TJ-Ⅱ 仪器 7 月份应变观测曲线的变化规律，发现整个月应变曲线总体呈现下降张性变化，但在小陶 M_L 2.3 级地震前约 5 天(7 月 9 日)开始，应变曲线发生一种从下降到上升的改变，改变周期无规律，但可以看出与正常的固体潮日变周期规律有着明显差异，应变曲线变化规律在震后恢复正常。这表明在区域近场，如果地下变形的应力场阶段一旦出现某些改变(周期变异)时，那么有可能存在某些能为研究人员辨析或识别的有用地震前兆

信息^[13-15](见图 7)。

4 结语

小陶地震台 TJ-Ⅱ 体应变仪已运行有一年多，观测数据一直比较稳定，干扰噪声也较小，记录曲线清晰流畅，表现良好的固体潮变化规律。仪器记录下的多个强远震存在显著的体应变位移瞬间频率和振幅改变，具备良好的震时响应效果。对有关震例数据进行研究发现，部分近场地下形变观测固体潮周期改变与某些异常现象相对应，这对地震的预测研究有着重要意义，由于永安小陶地区地下形变观测手段仅有一个，案例也较少，

因此还有待进一步探讨和研究,但可以肯定的是,地下形变观测作为一种前兆观测手段有着实际意义。

钻孔体应变是一个地壳形变综合信息的采集过程,但采集下来的远区信息,用于地震预报难度很大。由于小陶台 TJ-Ⅱ 体应变系统运行时间短,震例不多,需要仪器长期稳定运行,积累资

料、总结震例,因此仪器的维护与资料的连续十分重要。考虑到永安小陶地区未来几十年存在着 M_s 5.0 左右地震危险的潜在背景,因此建立区域的地下形变监测,开展该地区未来地震将要发生时大地形变异常识别与分析,对区域的地震预测研究有着重要意义。

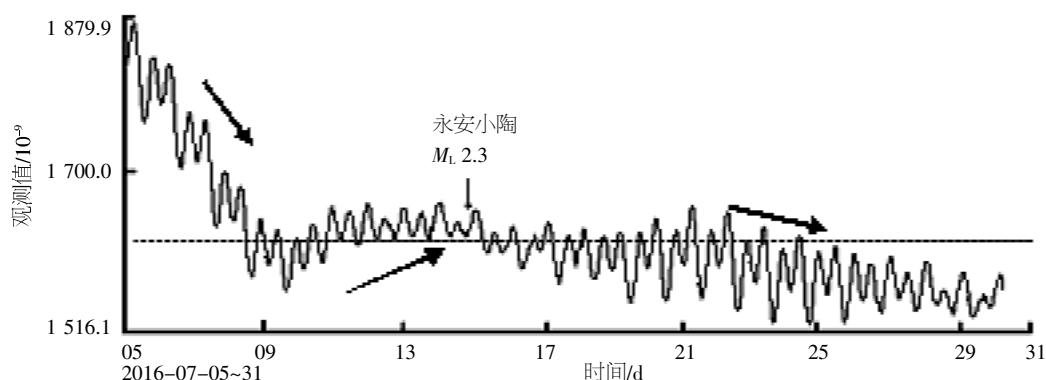


图7 2016年7月14日小陶2.3级地震前后体应变曲线变化趋势

Fig.7 The trend of changes of body strain curves before and after the July 14, 2016 2.3 earthquake Xiaotao

参考文献:

- [1] 丁学仁,黄向荣,林树,等. 福建永安 M_s 5.2 级地震活动特征、影响场及应急对策[J]. 华南地震,1998,18(3):55-56.
- [2] 尤宇星,陈珊华,谢文杰,等. 泉州地震台 TJ-Ⅱ C 观测资料综合分析[J]. 华南地震,2012,32(3):119-121.
- [3] 全建军,方传极,郑永通,等. TJ-Ⅱ 型钻孔应变仪维护技术[J]. 地震工程学报,2016,38(5):2-4.
- [4] 李海亮,李宏. 钻孔应变观测现状与展望[J]. 地质学报,2010,84(6):895-896.
- [5] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范[M]. 北京:地震出版社,2001.
- [6] 李希亮,苏恺之,李海亮,等. TJ-Ⅱ 型钻孔应变仪安装过程中的几个技术问题 [J]. 大地测量与地球动力学,2013,33(增Ⅱ):143-144.
- [7] 赵楠,江沛春,李罡风. 六安地震台 TJ-Ⅱ 井下体应变观测与资料初析[J]. 华南地震,2010,30(3):106-107.
- [8] 中国地震局监测预报司. 地壳形变数字观测技术 [M]. 北京:地震出版社,2003.
- [9] 王梅,毛玉华,孔向阳,等. 数字化体应变观测资料的调和分析[J]. 地震研究,2005,28(1):24-27.
- [10] 苏恺之,李海亮,张均,等. 2003. 钻孔体应变观测新进展 [M]. 北京:地震出版社,2003,132-153.
- [11] 吴利军,周立明,张中五,等. 东三旗台 Sacks 体应变干扰分析与震例研究[J]. 防灾科技学院学报,2013,15(3):24-27.
- [12] 牛安福,张晶,高福旺,等. 地壳持续加速变形与地震关系的研究[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(1):29-33.
- [13] 陈启林,朱海林,王皓,等. 溧阳台体应变干扰的查找与排除[J]. 华南地震,2004,24(2):74-77.
- [14] 刘川琴,裴红云,隆爱军,等. 安徽省 TJ-Ⅱ 型钻孔体应变观测资料干扰分析[J]. 华南地震,2016,36(3):68-74.
- [15] 刘水莲,陈美梅,全建军. 永安台钻孔体应变干扰与故障现象的探讨与总结[J]. 华南地震,2015,35(3):46-53.