

漳州地震台伸缩仪和体应变仪同震响应分析^{*}

方宏芳¹, 刘序俨², 张 凯³

(1. 福建省漳州市地震局, 福建 漳州 363000 2 福建省地震局, 福州 350003

3. 福建省地震局 漳州地震台, 福建 漳州 363000)

摘要: 对同一地震所激励的伸缩仪和体应变仪的体应变响应进行了对比分析, 结果表明, 这两个观测系统所记录到的是叠加在体应变固体潮背景上的一种振荡衰减变化。这两个系统分别对发生在印尼、中国台湾和福建的几次远震、地方震和近震作出了不同程度的响应。体应变响应幅度约为 $10^{-7} \sim 10^{-9}$, 并且体应变仪的响应幅度大于伸缩仪的。同一观测系统的响应幅度与地震能量成正比, 响应延迟时间与震中距成正比。

关键词: 伸缩仪; 体应变仪; 体应变响应; 同震响应; 漳州地震台

中图分类号: P315.72⁺7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)03-0287-05

0 前言

随着应变观测的开展, 很多学者 (刘序俨等, 2008; 郗钦文, 2004; 李杰等, 2003; 王梅等, 2005) 都进行了有关应变固体潮方面的研究。目前, 我国许多台站都安装有两方向互为 90° 的线应变观测仪, 这样所得资料除可用作不同方向的线应变分析外, 还可用作面应变和体应变分析。体应变仪可以直接记录到体应变固体潮, 如何根据安装在正南北和正东西方向上的伸缩仪观测值的组合来计算该台站的体应变? 伸缩仪和体应变仪两个观测系统所记录到的同一地震所激励的体应变响应有何不同? 这些正是本文所要探讨的。

1 台站概况

漳州地震台位于福建省漳州市下辖的县级市龙海市九湖镇院后村石狮岩, 距漳州市区 6 km 。台站所在地九湖镇为亚热带水果花卉种植区, 年平均温度为 22°C , 年平均湿度为 70% , 年平均降雨量为 1400 mm , 年平均雷电天气约 20 多天, 海浪干扰较轻。

台站位于北东向长乐—诏安断裂带的南端, 台站基岩为花岗闪长岩, 覆盖层厚度为 $15 \sim 32 \text{ m}$ 。

台站建有一条长 100 m 近 EW 走向的隧道, 隧道主巷道总体走向为 $\text{SWW}266^\circ$, 支巷为 $\text{NNW}356^\circ$ 。巷道交叉口以西安装有 SS-Y 型伸缩仪 EW 向仪器, 仪器长度为 24.9 m 。支巷安装伸缩仪 NS 向仪器, 长度为 17.8 m 。TJH E 型体应变仪安装在洞口附近, 观测孔孔深为 60.3 m 。

2 伸缩仪观测资料处理

考虑到地壳的非均匀性, 特别是地层的裂隙和层面之间的连续特征, 把伸缩仪的基线长度布设得尽可能长是很有必要的, 同时, 为了保证环境的稳定, 又要尽可能深地把仪器往地下深处安装, 但安装的深度毕竟要比潮汐应变的波长小得多, 因此, 我们可以认为观测是在地球自由表面进行的, 则由自由边界条件 ($\epsilon_\theta = \epsilon_\lambda = \epsilon_\phi = 0$) 可得到正南北、正东西两个方向的用线伸缩观测值计算面应变的公式 (刘序俨等, 1988)

$$\Sigma = \epsilon_\theta + \epsilon_\lambda = \frac{1}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\cos\varphi \frac{\partial V_n}{\partial\varphi} \right) + \frac{1}{\cos^3\varphi} \frac{\partial^2 V_n}{\partial\lambda^2} + 2h_n V_n \right]. \quad (1)$$

由于满足拉普拉斯方程, 故 $\text{div grad } V_n = 0$ 顾及

$$\frac{\partial V_n}{\partial\rho} = \frac{nV_n}{\rho}, \quad \frac{\partial}{\partial\rho} \left(\rho^2 \frac{\partial V_n}{\partial\rho} \right) = n(n+1)V_n \text{ 可得}$$

* 收稿日期: 2009-09-28.

$$\frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\cos\varphi \frac{\partial V_n}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 V_n}{\cos^2\varphi \partial \lambda^2} = -n(n+1) V_n \quad (2)$$

于是 (1) 式可写成

$$\begin{aligned} \Sigma &= \frac{1}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} [2h_n - n(n+1)k] V_n \\ &= \frac{1}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} f_n V_n. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $f_n = 2h_n - n(n+1)k$. (4)

由自由边界条件, 又得到垂直向的应变固体潮值

$$\epsilon_r = -\frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{\lambda\lambda}). \quad (5)$$

取泊松比 $\nu=0.25$ 则 (5) 式变为

$$\epsilon_r = -\frac{1}{3} (\epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{\lambda\lambda}) = -\frac{1}{3} \Sigma. \quad (6)$$

因地表的体应变固体潮为

$$\theta = \epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{\lambda\lambda} + \epsilon_r. \quad (7)$$

由 (1) 式和 (6) 式, 可将 (7) 式变为

$$\theta = \Sigma + \epsilon_r = \frac{2}{3} \Sigma = \frac{2}{3} \frac{1}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} f_n V_n = \frac{2}{3} \Sigma. \quad (8)$$

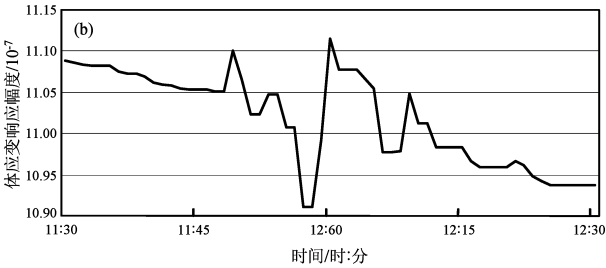
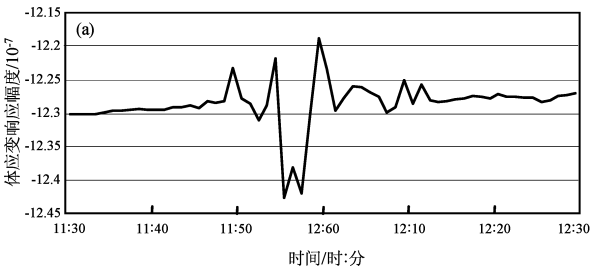


图 1 2007 年 9 月 13 日 11:30 ~12:30 漳州台伸缩仪 (a) 和体应变 (b) 的分钟值体应变曲线
Fig 1 Volumetric strain curve of extensometer (a) and body strain gauge (b)
from 11:30 to 12:30 on September 13 2007

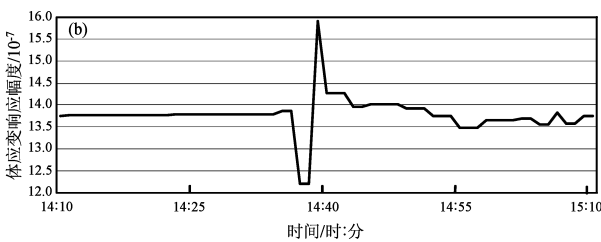
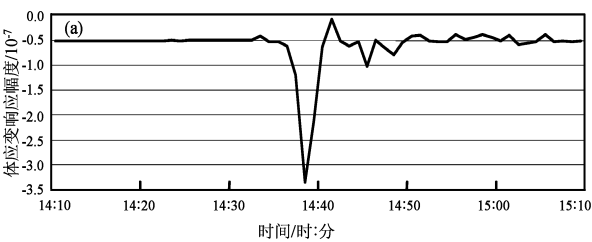


图 2 2008 年 05 月 12 日 14:10 ~15:10 漳州台伸缩仪 (a) 和体应变仪 (b) 的分钟值体应变曲线
Fig 2 Volumetric strain curve of extensometer (a) and body strain gauge (b)
from 14:10 to 15:10 on May 12 2008

从 (8) 式可知, 地表上某一点处的体应变等于该点处的面应变的 2/3 在此基础上, 由漳州台东西与南北方向伸缩仪的观测值得到该地区的体应变值。

3 伸缩仪与体应变仪的体应变响应

笔者分别计算了漳州台伸缩仪与体应变仪对 2007 年 9 月 12 日印尼 8.5 级、2007 年 9 月 13 日印尼 8.3 级、2007 年 9 月 13 日印尼 7.5 级、2007 年 8 月 16 日秘鲁 7.8 级、2006 年 12 月 26 日中国台湾恒春海外 7.2 级、2008 年 5 月 12 日中国四川汶川 8.0 级、2008 年 7 月 5 日俄罗斯鄂霍次克海 7.6 级、2008 年 7 月 5 日中国福建漳州长泰 4.6 级共 8 次地震所激发的体应变响应。

图 1 为漳州台伸缩仪、体应变仪于 2007 年 9 月 13 日 11:30 ~12:30 的分钟值体应变曲线图, 记录的是印尼 8.3 级地震的体应变响应。

图 2 为漳州台伸缩仪和体应变仪于 2008 年 5 月 12 日 14:10 ~15:10 的分钟值体应变曲线图, 记录的是汶川 8.0 级地震体应变响应。

从图 1和图 2可以看出，在强震面波到达漳州台之前，这两种观测手段的观测曲线都是非常平稳的，这是因为体应变主要是由低频日波和半日波组成。地震面波到达后这两个系统所记录到的变化，就是强震所引起的体应变。因此由印尼远震、台湾近震和漳州地方震所引起的体应变变化，是一种叠加在体应变固体潮曲线上的高频变化，也正是伸缩仪、体应变仪观测系统对地震的体应

变响应。所记录到的体应变响应波形以一种振荡衰减的形式出现，由于地震震级的不同，阶跃有高低，体应变响应有大有小。为了充分展示体应变响应过程，我们只给出地震当天伸缩仪与体应变仪 1~2 h的体应变分钟值变化曲线，并统计了响应延迟时间、体应变响应幅度、震中距、地震能量等参数，连同 8个所选地震的三要素一起归纳在表 1中。

表 1 漳州地震台伸缩仪与体应变仪体应变响应幅度参数统计

Tab 1 Statistics of volumetric strain response amplitude of extensometer and body strain gauge at Zhangzhou seismostation								
发震日期	2006-12-26	2007-08-16	2007-09-12	2007-09-13	2007-09-13	2008-05-12	2008-07-05	2008-07-05
发震时刻	20 26	7 40	19 10	7 49	11 35	14 28	10 12	9 36
发震地点	中国台湾 恒春海外	秘鲁中部 近海	印尼苏门答 腊南部海中	印尼苏门答 腊南部海中	印尼苏门答 腊南部海中	中国四川省 汶川县	俄罗斯 鄂霍次克海	中国漳州市 长泰县
经度	120°29′	—76°30′	101°30′	100°54′	96°36′	103°24′	153°6′	117°49′
纬度	21°52′	—13°18′	—4°24′	—2°30′	—2°6′	31°	53°54′	24°36′
震级	7.2	7.8	8.5	8.3	7.5	8.0	7.6	4.6
释放能量/(×10 ¹¹ J)	40 000	320 000	3 540 000	1 780 000	110 000	630 000	160 000	5
震中距/km	400	18 000	3 000	3 000	3 000	1 600	4 600	25
震 荡 期	伸 缩 仪	20 29~20 41	08 27~09 51	19 22~19 58	08 03~08 31	11 48~12 12	14 3~14 50	10 02~10 44
	体 应 变 仪	20 30~20 44	08 29~09 43	19 21~19 54	08 04~08 26	11 48~12 12	14 33~14 50	10 21~10 44
体应变幅度 /×10 ⁻⁸	伸 缩 仪	11.68	1.83	19.52	11.42	2.39	32.62	0.58
	体 应 变 仪	24.17	2.54	24.46	15.28	2.04	36.86	0.75
响应延迟 时间/min	伸 缩 仪	3	47	12	14	13	5	13
	体 应 变 仪	4	49	11	15	13	6	13

图 3给出了漳州台伸缩仪和体应变仪对上述 8个震例的体应变响应幅度对比曲线。从图中可看出，8个震例中，两种仪器对其中 7次地震的体应变响应幅度，都是体应变仪的大于伸缩仪的，只有 2007年 9月 13日印尼 7.5级地震所激发的体应变响应幅度，是伸缩仪的稍大一些。

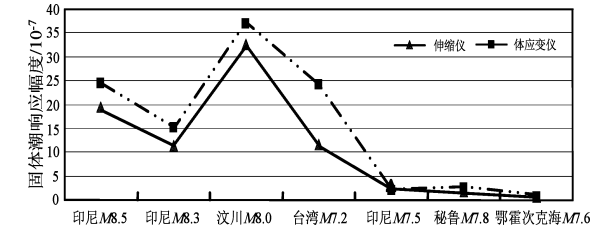


图 3 漳州台伸缩仪和体应变仪对 8 个震例的体应变响应幅度对比曲线

Fig 3 Contrast curves of volumetric strain response amplitude of extensometer and body strain gauge for 8 earthquakes

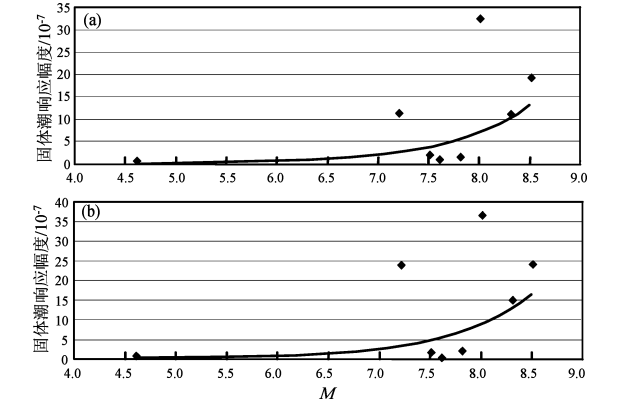


图 4 伸缩仪 (a) 和体应变仪 (b) 响应幅度与震级关系曲线

Fig 4 Relationship between volumetric strain response amplitude of extensometer (a) and body strain gauge (b) and earthquake magnitude

从图 4可以看出，体应变响应幅度与地震震级成正比关系，地震震级越大，能量越高，响应幅

度就越大 (牛安福等, 2005 2006)。这也可从表 1 中印尼 3 次地震的体应变响应对比看出。以体应变仪为例, 在震中距近似相等的条件下, 印尼 8.5 级、8.3 级、7.5 级地震的体应变响应幅度分别为 2.446×10^{-7} 、 1.528×10^{-7} 、 2.04×10^{-8} , 幅度随着震级的下降而逐渐降低, 这说明了震级与体应变响应幅度的正比关系。对汶川 8.0 级地震, 印尼 8.5 级、8.3 级强震, 台湾恒春海外 7.2 级地震, 两种仪器的体应变响应幅度较大, 可达到 10^{-7} 量级, 对于 4 600 km 之遥的鄂霍次克海 7.6 级地震和相距仅 25 km 的福建长泰 4.6 级地震, 体应变响应幅度最小, 仅为 10^{-9} 量级。

从图 5 可看出, 响应延迟时间与震中距成正比, 震中距越大, 响应时间越晚。仪器对于印尼 3 次地震的响应延迟时间平均为 13 min。2007 年 8 月 16 日秘鲁地震的震中距为 18 000 km, 响应延迟时间最长。2008 年 7 月 5 日福建长泰 4.6 级地震震中距只有 25 km, 响应最快。从伸缩仪、体应变仪观测系统记录到的响应波形来看, 两者响应延迟时间相当。

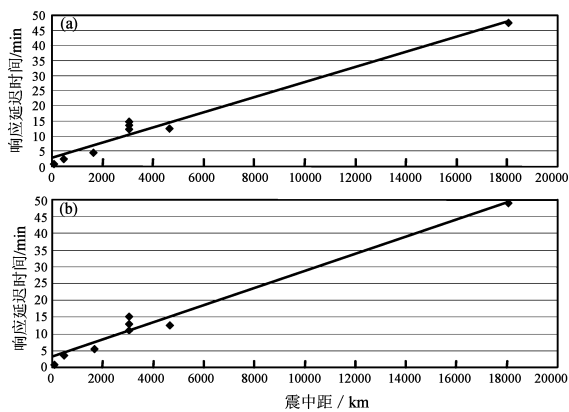


图 5 伸缩仪 (a) 和体应变仪 (b) 体应变响应延迟时间与震中距关系曲线

Fig 5 Relationship between volumetric strain response delay time of extensometer (a) and body strain gauge (b) with epicentral distance

4 结语

(1) 伸缩仪和体应变仪观测系统, 在其记录到的体应变固体潮背景上, 以一种振荡衰减的形式, 对印尼远震、台湾近震和漳州长泰地方震都分别做出了不同程度的响应。对于同一地震, 体应变仪的体应变响应幅度大于伸缩仪的。伸缩仪和体应变仪观测系统的体应变固体潮幅度相当, 约为 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 。

(2) 对同一观测系统而言, 体应变响应幅度与地震能量成正相关, 地震震级越大, 地震能量越高, 体应变响应幅度就越大。

(3) 伸缩仪与体应变仪的响应延迟时间相当。体应变响应延迟时间与震中距成正相关, 震中距越大, 响应延迟时间越晚。

本研究中的体应变响应还只限于“同震波”, 还无法提取更有效的震前信息, 应结合其它观测手段, 做进一步的综合分析, 以寻找震前长、中、短、临的体应变变化时空演化特征, 最大限度地发挥数字化前兆观测资料的作用。

参考文献:

刘序俨, 黄声明, 梁全强. 2008. 正交曲线坐标系的应变张量转换 [J]. 大地测量与地球动力学, 28(2): 71—76.

刘序俨, 李平, 张雁滨. 1988. 地表的面应变和体应变固体潮理论值计算及其调和分析 [J]. 地壳形变与地震, 8(4): 354—358.

李杰, 刘敏, 邹钟毅, 等. 2003. 数字化钻孔体应变干扰机理及异常分析 [J]. 地震研究, 26(3): 230—237.

牛安福, 张晶, 吉平. 2005. 强地震引起的同震形变响应 [J]. 内陆地震, 19(1): 1—7.

牛安福, 吉平, 高福旺, 等. 2006. 印尼地震引起的同震形变波 [J]. 地震, 26(1): 131—137.

王梅, 毛玉华, 孔向阳, 等. 2005. 数字化体应变观测资料的调和与分析 [J]. 地震研究, 28(1): 24—27.

郝钦文. 2002. 现代引潮质疑与调和分析方法评论 [J]. 大地测量与地球动力学, 22(2): 7—9.

Analysis of the Co-seismic Response of Extensometer and Body Strain Gauge at Zhangzhou Seismic Station

FANG Hong-fang¹, LIU Xu-yang², ZHANG Kai³

(1. Earthquake Administration of Zhangzhou City, Fujian Province, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

(2. Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

(3. Zhangzhou Seismic Station, Earthquake Administration of Fujian Province, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

Abstract

We conduct a comparative analysis of volumetric strain response of extensometer and the volumetric strain response of body strain gauge to the same earthquake. The two observational systems recorded an oscillating attenuation change overlaying the background of the solid tide of volumetric strain. The two systems differently response to Indonesian distant shock, inland earthquake and Taiwan earthquake. The magnitude of volumetric strain response of these two systems to the earthquakes varies from 10^{-9} to 10^{-7} . The response amplitude of body strain gauge system is larger than that of extensometer. For the same system, the response amplitude keeps in direct proportion to quake energy and the delay time of response keeps in direct proportion to epicentral distance.

Key words: extensometer; body strain gauge; volumetric strain response; co-seismic response; Zhangzhou Seismic Station



张宇翔 陕西省地震局高级工程师。1986年毕业于陕西工学院电子系无线电专业,获学士学位。陕西省地震学会学术委员会委员,陕西省地震学会地震监测技术委员会主任。主要从事地震监测技术、地震灾害研究等工作。



曹玲玲 甘肃省地震局副研究员。1996年毕业于南京大学地球科学系,获学士学位;2001年毕业于中国地震局兰州地震研究所,获硕士学位。主要从事地下流体地震预报研究工作。



方宏芳 福建省漳州市地震局工程师。1990年毕业于中国地质大学水文地质工程地质专业,获工学学士学位;2009年12月毕业于云南大学固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地下流体、体应变监测及地震预测研究工作。



程建武 甘肃省地震局高级工程师。1996年毕业于西安地质学院矿产勘查专业,获理学学士学位;2001年毕业于中国地震局兰州地震研究所地球物理专业,获理学硕士学位;2010年毕业于中国地震局地质研究所,获博士学位。主要从事活动构造与地震危险性评价工作。



李罡风 安徽省地震局工程师。1996年毕业于安徽大学数学系应用数学专业,获理学学士学位。主要从事地震前兆观测数据分析处理和地理信息系统开发等工作。



徐春迪 宝鸡文理学院地理科学与环境工程系副教授。1997年毕业于西北大学城市与资源学系,获理学学士学位;2007年毕业于华东师范大学资源与环境学院地理信息系统与地图学专业,获理学硕士学位。主要从事3S技术应用及资源与灾害方面的教学和研究工作。



韩晓明 内蒙古自治区地震局工程师。2004年毕业于河南理工大学测绘与国土信息工程学院大地测量专业,获工学学士学位;2007年毕业于中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震活动性以及测震学方面的研究工作。



史杰 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2003年毕业于新疆大学资源勘查系资源勘查工程专业,获工学学士学位。主要从事活动构造研究工作。

注:张昱、李永莉、莘海亮、曾宪伟、谢晓峰、刘丽芳、胡毅力、曹彦波、倪泰山的简介已分别刊登在本刊:
Vol31, No3 Vol29, No3 Vol31, No2 Vol31, No2 Vol33, No1 Vol28, No4 Vol29, No2 Vol30
No3 Vol32, No1.