

海原台四分量钻孔应变观测的相对标定及资料应用^{*}

吴立辛, 张立强, 李国斌, 郭宏斌

(宁夏回族自治区地震局, 银川 750001)

摘要: 宁夏海原台四分量钻孔应变观测的相对标定结果显示, 标定后分量 1、分量 3 之和与分量 2、分量 4 之和的资料相关性显著增强, 标准差明显减小, 更加满足四分量应变仪的校核条件, 表明该钻孔应变观测资料是可靠的。将各分量应变资料去趋势, 计算出面应变 $1+3$ 和 $2+4$, 差应变 $1-3$ 和 $2-4$ 。对面应变、差应变资料和相对标定系数在 2008 年 4 月 6 日固原 3.8 级、5 月 12 日汶川 8.0 级、10 月 3 日固原 4.0 级和 11 月 24 日固原 3.8 级地震前的异常变化进行了分析探讨。结果显示, 钻孔应变观测的相对标定及资料应用有助于地震前兆异常的判定识别。

关键词: 钻孔应变观测; 相对标定; 震前异常; 面应变; 差应变

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)04-0318-05

0 引言

四分量钻孔应变观测是 20 世纪 80 年代后发展起来的一种地震前兆观测手段, 地震专家围绕钻孔应变仪器改进 (苏恺之等, 2003)、资料分析标定 (邱泽华等, 2003, 2009; 池顺良等, 2009) 和震前异常判定 (蒋靖祥等, 2000; 朱航, 2003; 邱泽华等, 2009) 等方面做了大量的工作。由于目前还难以直接标定井下钻孔应变仪, 对观测到的应变信息是否可靠还存在疑问, 在应用这些资料之前有必要对这些数据进行分析标定。近年来, 邱泽华等 (2005)、阚宝祥等 (2009) 利用互相垂直方向应力之和为不变量的特点, 轮流以每个元件为标准分别计算灵敏度后再取平均值, 得出四分量钻孔应变观测的实地相对标定方法。

宁夏海原地震台 YRY-4 型四分量钻孔应变仪自 2007 年 9 月安装以来, 仪器运行稳定, 观测资料连续, 记录的固体潮和地震波信息非常清晰。我们对该钻孔应变观测进行实地相对标定, 结果显示, 标定后资料的相关性显著增强, 标准差明显减小, 验证了该资料的可靠性。对面应变、差应变资料和相对标定系数在 2008 年 4 月 6 日固原 3.8 级、5 月 12 日汶川 8.0 级、10 月 3 日固原 4.0 级和 11 月 24 日固原 3.8 级地震前的异常现象进行了探讨, 表明相对标定可作为分析应用该应变资

料的有效方法之一。

1 YRY-4 型应变仪工作原理及其相对标定

YRY-4 型四分量钻孔应变仪为长圆筒径向位移式仪器 (池顺良等, 2007), 在圆筒中部位置设有 4 组径向测微传感元件, 依次相隔 45° , 能够测量 4 个方向圆筒直径的微小变化 (图 1)。当圆筒探头放入地层钻孔, 并用耦合介质将探头与地层连为一体后, 通过仪器测量系统就能获得地层钻孔 4 个方向的钻孔孔壁径向位移 S

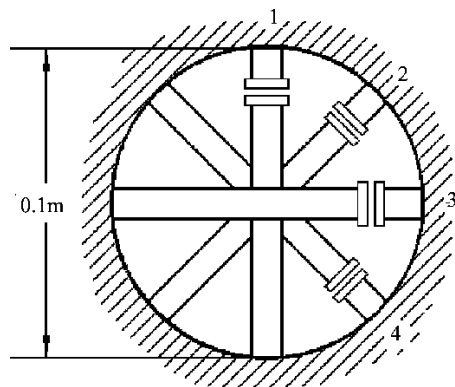


图 1 YRY-4 型应变观测仪平面示意图
Fig 1 Plane diagram of YRY-4 borehole strainmeters

钻孔的孔径相对变化值 S 一般是面应变和差应

* 收稿日期: 2009-06-12

基金项目: 中国地震局三结合课题 (200604) 资助

变的线性组合，即

$$S=A(\epsilon_1+\epsilon_2)+B(\epsilon_1-\epsilon_2)\cos 2(\theta-\varphi). \quad (1)$$

式中， ϵ_1 、 ϵ_2 为水平主应变， φ 是 ϵ_1 的方位角， θ 为 S 的方位角。 A 和 B 是耦合系数，与套筒内、外径，套筒材料，围岩等的杨氏模量和泊松比等有关。当观测到两个垂直方向上的孔径相对变化值后，分别代入（1）式，然后相加就可以消去 $(\epsilon_1-\epsilon_2)$ 项，右边只剩 $(\epsilon_1+\epsilon_2)$ 面应变项。同理，两个垂直方向上的值代入（1）式相减可以消去 $(\epsilon_1+\epsilon_2)$ 项，右边只剩 $(\epsilon_1-\epsilon_2)$ 差应变项。因此，四分量钻孔应变仪可以利用相互垂直方向上的应变之和为不变量的特点对不同元件的应变观测进行互检。在判断仪器状态、评定资料质量以及核实资料异常时，校核条件 $(S_1+S_3=S_2+S_4)$ 起到了非常重要的作用。地应变信号从地层传入探头，经过机械、电子、数采到最后记录，只有各个环节都正常时才能得到满足校核条件的结果。

在实地相对标定时，设 R_i 代表元件*i*的观测读数， K_i 代表元件*i*的灵敏度，则元件*i*的孔径相对变化为 $S_i=K_iR_i$ ，校核条件的关系式为 $K_1R_1-K_2R_2+K_3R_3-K_4R_4=0$ 。该一次方程组只能确定灵敏度之间的相对大小，因此，称为相对标定。由于各元件灵敏度的理论值为 1.0，在标定计算时可依次取 4 个元件灵敏度为 1，求解另外 3 个元件的灵敏度，形成 4 个一次方程组

$$\begin{cases} k_{11}R_1-k_{21}R_2+k_{31}R_3-k_{41}R_4=0 \\ k_{12}R_1-k_{22}R_2+k_{32}R_3-k_{42}R_4=0 \\ k_{13}R_1-k_{23}R_2+k_{33}R_3-k_{43}R_4=0 \\ k_{14}R_1-k_{24}R_2+k_{34}R_3-k_{44}R_4=0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $k_{ij}=K_i/K_j(i,j=1,2,3,4)$ 。利用以上方程组求解元件的相对灵敏度，再取平均值（仍然用 K 表示）：

$$K_i=\frac{1}{4}\sum_{j=1}^4k_{ij} \quad i=1,2,3,4. \quad (3)$$

该相对灵敏度的大小应在理论值 1.0 附近。

2 标定实例

2.1 海原台四分量钻孔应变的基本资料

海原台应变钻孔位于青藏活动地块区祁连活

动地块外缘边界带，历经了晋宁、加里东、华力西、印支、燕山和喜山各期构造运动，地层变质、褶皱和断裂变形强烈，构造十分复杂。发育有北东向和北西西向两组主要断裂。北东向断裂发育于南华山内部的变质岩系中，为前新生代活动断裂；北西西向断裂发育在南华山内部变质岩和南华山与海原盆地交界带上，其中尤以山盆交界构造—海原活动断裂带规模最大。

钻孔地处海原南华山自然保护区内，高程 2 220 m。周围人烟稀少，无明显干扰源。钻孔在 28.6~37.9 m 间有一段较完整灰岩层，仪器探头安装于 36.5 m 处。水位距井口 15 m，安装有辅助观测的水位仪和气压计。该应变仪自安装运行以来，资料稳定，整时值完整率为 99.9%。4 个元件的磁方位角分别为，1 分量：111°，2 分量：156°，3 分量：201°，4 分量：246°。

2.2 标定结果

（1）选用 2007 年 10 月至 2009 年 7 月间海原台 4 个分量应变的整时值，按月进行线性去倾，形成除去漂移的观测序列 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 。为了分析各分量的观测值是否满足校核条件，首先将 R_1 和 R_3 以及 R_2 和 R_4 分别相加，得到两条面应变曲线（图 4b），可见，两条面应变曲线的变化基本一致，满足校核条件，表明海原 YRY—4 型四分量应变仪观测到的是地层应变变化。再对除去漂移的四分量观测资料进行相对标定分析，每个月的标定系数、相关系数及标准偏差见表 1 所示。相对标定后，每个月面应变 1+3 和 2+4 的资料相关系数均显著增大，平均由 0.896 9 增大为 0.943 2，标准偏差均明显减小，平均由 0.392 3 减小为 0.204 6，标定后的数据比标定前有明显改善。

（2）由表 1 和图 2 可以得出，2007 年 10 月至今，各元件的标定系数主要分布在 0.8~1.2 之间，与理论值 1.0 基本相符。2007 年 10 月、11 月的 K 值偏低，可能与仪器安装运行时间短，还处于快速“漂移”状态有关，而 2007 年 12 月~2008 年 1 月的 K 值回到正常范围（以 0.8~1.2 为参考），2008 年 2~4 月 K 值明显偏低，最低为 0.177 0，严重偏离了理论值 1.0 的波动范围，其余时段除元件 K_3 在 2008 年 9~11 月偏低（可能与 1 次 3.8 级、1 次 4.0 级地震有关，地震参数见表 2）之后恢复外，另外 3 个元件均处于正常变化范围。 K_1 、

表 1 四分量钻孔应变仪相对标定结果
Tab 1 Relative calibration coefficients of YRY-4 borehole strain meters

年月	标定系数				相关系数		标准偏差	
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	标定前	标定后	标定前	标定后
2007年 10月	−0.053 0	0.429 1	0.623 0	0.559 8	0.971 1	0.985 0	2.168 5	0.803 5
2007年 11月	0.428 0	0.348 5	0.284 4	0.677 3	0.367 1	0.722 7	1.287 8	0.559 2
2007年 12月	0.770 7	0.764 0	1.102 7	1.114 8	0.970 0	0.985 5	0.533 6	0.308 7
2008年 1月	0.863 8	0.919 5	0.972 0	0.928 2	0.986 5	0.987 0	0.265 7	0.240 6
2008年 2月	0.380 2	0.322 9	0.272 7	0.631 0	0.225 1	0.560 3	1.316 6	0.524 5
2008年 3月	0.177 0	0.230 0	0.179 1	0.446 3	0.191 8	0.510 3	1.297 5	0.373 3
2008年 4月	0.781 2	0.427 2	0.473 8	0.860 1	0.942 8	0.982 1	1.071 6	0.438 6
2008年 5月	0.992 0	0.971 9	0.930 0	1.096 2	0.995 9	0.998 0	0.171 6	0.116 2
2008年 6月	0.987 9	0.984 7	0.897 9	1.096 9	0.995 1	0.997 3	0.125 8	0.096 7
2008年 7月	1.018 8	0.960 6	0.851 7	1.089 9	0.991 4	0.994 7	0.168 6	0.132 9
2008年 8月	0.976 2	0.917 4	0.809 7	1.145 2	0.989 6	0.994 0	0.222 7	0.169 8
2008年 9月	1.047 5	0.951 9	0.659 1	1.035 6	0.992 7	0.994 8	0.292 8	0.244 9
2008年 10月	0.994 8	0.915 4	0.717 6	0.962 3	0.974 1	0.978 9	0.273 8	0.228 7
2008年 11月	1.102 4	0.887 6	0.522 0	1.059 6	0.757 1	0.910 3	0.661 5	0.396 6
2008年 12月	1.039 1	0.977 3	0.888 9	1.084 8	0.996 7	0.998 6	0.116 8	0.076 8
2009年 1月	1.042 8	0.955 2	0.860 0	1.142 5	0.993 9	0.998 0	0.142 8	0.083 6
2009年 2月	1.031 0	0.938 3	0.863 7	1.190 1	0.994 6	0.999 0	0.167 5	0.074 4
2009年 3月	1.043 3	0.894 8	0.855 5	1.205 2	0.988 6	0.997 3	0.219 5	0.104 0
2009年 4月	1.040 0	0.883 0	0.821 1	1.189 9	0.990 6	0.996 2	0.236 4	0.150 6
2009年 5月	1.090 3	0.884 3	0.830 1	1.164 0	0.992 0	0.997 0	0.203 6	0.118 5
2009年 6月	1.106 1	0.866 5	0.862 3	1.148 1	0.986 4	0.994 9	0.174 6	0.094 0
2009年 7月	1.138 5	0.852 7	0.853 2	1.059 6	0.982 7	0.990 4	0.182 2	0.118 3
平均值	0.931 2	0.825 3	0.761 2	1.032 5	0.896 9	0.943 2	0.392 3	0.204 6

注：表中的平均值表示 2007 年 12 月至 2009 年 7 月各数的平均值。

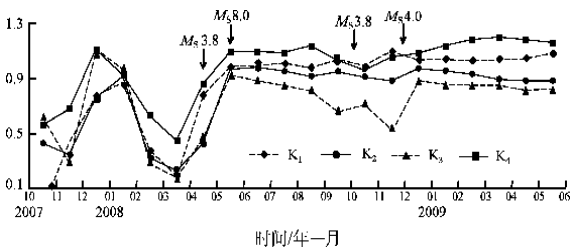


图 2 各元件的标定系数 K 值变化曲线
Fig 2 Record curves of components relative calibration coefficients

表 2 2008 年 4 次地震参数

Tab 2 Four seismic parameters in 2008

发震时刻 年—月—日	震中位置		震级 (M _S)	震中	海原钻孔距 震中距离 /km
	λ _E /(°)	φ _N /(°)			
2008—04—06	106.4	36.2	3.8	固原	78
2008—05—12	103.4	31.0	8.0	汶川	645
2008—10—03	106.3	36.0	3.8	固原	82
2008—11—24	106.3	36.3	4.0	固原	65

K₂ 和 K₄ 均有 17 个月的正常背景资料，占所用资料长度的 85%，K₃ 具有 14 个月的正常背景资料，占所用资料长度的 70%。目前，各 K 值均处于正常范围。

3 震前资料变化分析

将各分量应变的整时值按月线性去倾，分别计算面应变 1+3、2+4 和差应变 1−3、2−4，再各取以“db5”为基函数的小波分解 5 阶近似（吴立辛等，2007），如图 4b 所示，2 条面应变曲线变化形态相似，有很多重合时段，满足分量应变的校核条件。面应变和差应变资料的正常背景值清晰、平稳，受当地气压、井水位和降雨量（采用距海原台 30 km 的郑旗观测点降雨资料）的影响不大。2008 年 4 次显著地震的参数见表 2。地震震中、钻孔位置及断层分布如图 3 所示，震前的面应变和差应变异常分析如下：

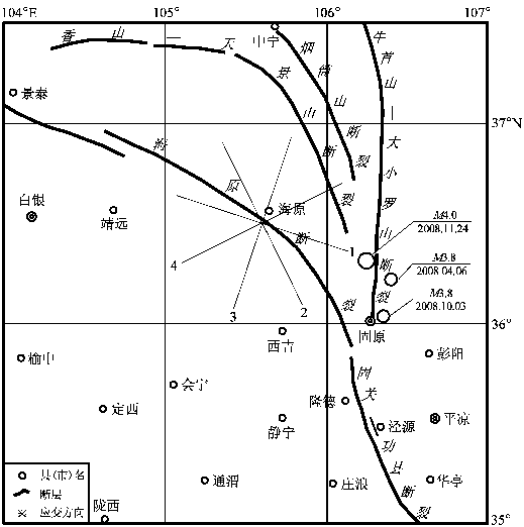


图 3 四分量钻孔应变仪位置、各分量方向、断层及震中分布图

Fig 3 Position of YRY-4 borehole strain meters and directions of components and faults and epicenters

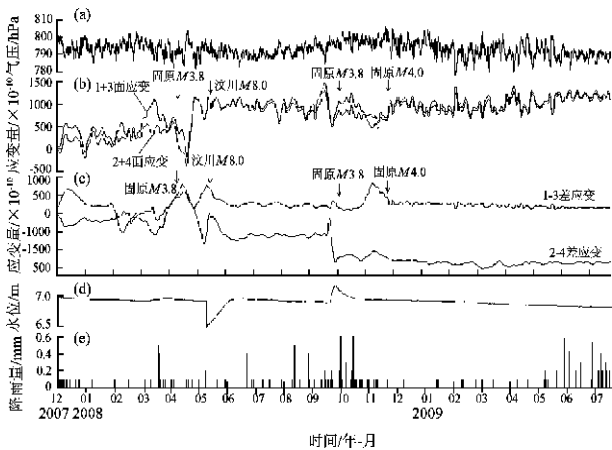


图 4 海原台气压 (a)、面应变 (b)、差应变 (c)、水位 (d) 及降雨量 (e) 变化图

Fig 4 Record curves of atmospheric pressure (a) and surface strain (b) and differential strain (c) and water level (d) and rainfall (e) at Haiyuan station

3.1 震前面应变异常分析

(1) 4月6日固原 3.8级和 5月12日汶川 8.0级地震前，面应变 1+3 曲线出现大的波动（图 4b），这可能与地震前的应变积累与调整有关。

(2) 10月3日固原 3.8级地震前，9月上旬 2 条面应变曲线同步出现上升、下降、恢复的异常变化形态，10月1日，池顺良等来短信交流“认为海原应变资料存在异常”，我们也关注到该变化，并加密会商，但限于当时资料积累时间短，

正常背景值偏少，故难以判定该应变资料为临震异常。现在“回过头”来看，认为该变化是地震前兆异常的可能性较大。首先，降雨对应变观测没有明显影响，降雨量、降雨次数均与井水位上升没有明显的相关性，而其它降雨时段相应的应变资料无异常变化。其次，钻孔水位比较平稳，对应变资料没有明显影响。汶川地震的同震效应显著，水位在震时下降了 50 cm，于 6月初恢复。9月20日~10月15日，水位出现先升后降的变化，上升幅度为 30 cm，其余时段维持在同一水平上。本次 3.8级地震前，面应变于 9月初已有升高的异常显示，而井水位是 9月20日才开始上升，即应变异常出现在水位上升之前，排除了应变异常是由水位上升因素所致的可能性。总结来看，很可能是地层应变的压性积累，导致了井孔“缩孔”，使地下裂隙水“承压”后，井水位出现明显上升现象。

(3) 11月24日固原 4.0级地震前，2条面应变曲线也出现了缓慢下降和逐步回升的异常变化。

3.2 震前差应变异常分析

(1) 4月6日固原 3.8级地震前，2条差应变曲线均出现了 2次转折、恢复的现象（图 4（c）），但不易识别。而 5月12日汶川 8.0级地震前，2条差应变曲线出现交叉和大幅度的“起落”现象，可能是大震前的地下应变积累和调整所致。

(2) 10月3日固原 3.8级地震前，差应变 1—3 曲线出现小“鼓包”现象（池顺良等，2009），之后保持平稳变化。而 2—4 差应变曲线出现突跳、大幅度下降的过程，曲线整体保持低值，持续至今。

(3) 10月20日至 11月24日固原 4.0级地震前，差应变 1—3 曲线出现上升一下降的“鼓包”现象，而差应变 2—4 曲线无异常显示。该现象与上述月标定系数 K_1 、 K_2 和 K_4 正常变化，仅 K_3 出现异常波动相一致。

4 讨论与结论

(1) 相对标定结果显示，海原四分量应变仪的元件标定系数均比较稳定，多数在理论值 1.0 附近，其正常背景清楚，占资料长度的 70% 以上。相对标定后面应变 1+3 和 2+4 的相关性更加显著，标准差明显减小，表明观测仪器稳定，观测

值可靠。由此认为, 相对标定可成为分析、评价、应用应变资料的有效方法之一。

(2) 在 5° 12汶川地震和固原 2次中等地震前, 标定系数 K值均出现了显著超正常范围的低值。相比而言, 元件 K₃的波动变化最剧烈, 11月 24日固原 4.0级地震前仅有元件 K₃出现低值异常。而元件 K₃的方向与附近海原断裂带的走向近似垂直分布 (图 3), 那么元件标定系数的变化与断层蠕动有哪些对应关系? 还有待积累资料再作讨论。

(3) 相互垂直方向上的应变之和相等成为判断四分量应变仪工作状态和资料异常的方法之一, 而差应变更加灵敏, 震前异常更为突出。海原台四分量钻孔应变的面应变、差应变及相对标定系数在 4次地震前有一定的异常显示, 为判定地震前兆异常提供了重要参考。

参考文献:

池顺良, 池毅, 邓涛, 等 . 2009. 从 5° 12汶川地震前后分量应变仪观

测到的应变异常看建设密集应变观测网络的必要性 [J]. 国际地震动态, (1): 1—12.

池顺良, 武红岭, 骆鸣津 . 2007. 钻孔应变观测中潮汐因子离散性与各向异性原因探讨—“十五”数字地震观测网络分量钻孔应变仪首批观测资料分析解释 [J]. 地球物理学进展, 22 (6): 1746—1753.

蒋靖祥, 尹光华, 哈斯高娃 . 2000. 钻孔应变仪在地震前的记录及地震预测 [J]. 地震研究, 23 (4): 411—417.

阙宝祥, 邱泽华, 池顺良 . 2009. 姑咱台四分量钻孔应变观测的实地标定 [J]. 大地测量与地球动力学, 29 (1): 36—40.

邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙 . 2005. 四分量钻孔观测的实地相对标定 [J]. 大地测量与地球动力学, 25 (1): 118—122.

邱泽华, 石耀霖 . 2003. 地震造成远距离应力阶变的观测实例 [J]. 中国科学, 33 (增刊): 60—64.

邱泽华, 唐磊, 周龙寿, 等 . 2009. 四分量钻孔应变台网汶川地震前的观测应变变化 [J]. 大地测量与地球动力学, 29 (1): 1—5.

苏恺之, 马鸿钧, 李海亮, 等 . 2003. 组合式应变观测仪的设计 [J]. 地震研究, 26 (2): 164—171.

吴立辛, 卫定军, 李国斌, 等 . 2007. 小波分析方法在宁夏短水准资料分析中的应用 [J]. 地震研究, 30 (1): 49—53.

朱航 . 2003. 四川地区应力应变和重力的地震短临前兆异常特征 [J]. 地震研究, 26 (增刊): 141—148.

The Relative Calibration and Its Application of 4—component Borehole Strain Observation in HaiYuan Station

WU Lixia ZHANG Liqiang LIGuo-bin GUO Hong-bin

(Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region Yinchuan 750001 Ningxia China)

Abstract

The relative calibrated result of 4—component borehole strain observation in Haiyuan station indicate the correlation between the sum of the calibrated component 1 and 3 and the one of component 2 and 4 increases significantly with fewer standard error and it hold goodness of fit with check condition of the 4—component strain meter. The result illustrates the observations data are credible. The strain data are minus trend and hold the surface strains 1+3 and 2+4 and the differential strains 1—3 and 2—4. The data of the surface strain and differential strain and calibration coefficients display the abnormal changes before the earthquakes such as M_s 3. 8 in Guyuan June fourth 2008 M_s 8. 0 in Wenchuan May twelfth 2008 M_s 4. 0 in Guyuan Oct third 2008 and M_s 3. 8 in Guyuan Dec 24th 2008. The result indicates the relative calibration and its application of strain observation will be benefit for distinguishing precursory abnormal before earthquake.

Key words borehole strain observation relative calibration precursory abnormal before earthquake surface strain differential strain