

强震前钻孔应变异常变化分析*

马 震, 张晓清

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 利用 2007 年以来青海省 6 套 YRY-4 分量钻孔应变仪数据, 对青海地区 $M \geq 6.0$ 强震前的前兆异常信息进行研究, 并对异常特征进行总结。结果显示: 格尔木、门源分量钻孔应变在 2008 年青海海西 6.3 级地震前出现了较为可靠的中短期异常, 在周边 6 级以上地震发生前未发现明显临震异常信息。

关键词: 钻孔应变; 短临异常; 面应变; 剪应变

中图分类号: P315.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)增刊-0088-06

0 引言

随着前兆数字化观测的建设和发展, 青海省地震局于 2006 ~ 2007 年相继在格尔木、德令哈、门源、湟源、乐都和玉树 6 个台站各架设了一套 YRY-4 型分量钻孔应变仪, 目前已积累了近 7 年的连续观测数据。在仪器正常观测期间, 青海省及周边发生了 2008 年四川汶川 8.0 级、2008 ~ 2009 年青海海西 6.3、6.4 级和 2010 年青海玉树 7.1 级等强震, 为研究分量钻孔应变在强震前的前兆异常变化特征和前兆异常信息提取提供了基础。

YRY-4 型分量钻孔应变仪包括四分量应变探头、水位气压辅助观测探头, 仪器系统应变分辨率 5×10^{-11} , 数采采样率为每分钟一次 (池顺良等, 2009)。近年来, 随着观测资料的积累, 获得了一些关于分量钻孔应变资料不同时间尺度前兆异常的研究成果 (宋治平等, 2003; 周龙寿等, 2009; 尹继尧, 朱元清, 2012; 毕永强等, 2013), 如 2013 年四川芦山 7.0 级地震前出现的明显的应变阶跃异常有可能是强震的临震前兆信号 (池顺良等, 2013); 库尔勒钻孔应变观测记录到的固体潮畸变现象可能是震前的异常信号 (王在华等, 2011); 汶川地震前一年多, 位于龙门山断裂带西南端的姑咱台钻孔应变仪开始记录到异常应变变化, 这种异常变化以短周期 (数分钟至数小时) 的“毛刺”形态为特征 (邱泽华等, 2010)。上述

研究提取和识别了一些震前的异常现象和特征, 但综合各个方面的研究进展, 全国 40 余套钻孔应变仪器在震前捕捉到相对较为可靠的前兆异常信息仍然相对偏少。

检验一个观测变化是否为地震前兆异常, 需要 3 个判据: (1) 有正常背景; (2) 非干扰影响; (3) 与地震相关 (邱泽华等, 2009)。经过 7 年左右的资料积累和前期基础研究工作的完成, 对青海分量钻孔应变资料动态变化特征及主要干扰变化有了较深入的认识, 这是研究分量钻孔应变资料在地震前异常变化的基础。本文利用青海钻孔分量孔应变资料的分钟值及整时值数据资料, 对青海地区 $M \geq 6$ 强震前的前兆异常信息进行了研究, 并对异常特征进行了总结。

1 资料的可靠性及干扰分析

YRY-4 型分量应变仪有 4 个独立分量, 比平面应变三分量观测系统多一个分量的观测数据, 具有检验观测数据真实性的自检功能。其中自检条件为: 1 路数据 + 3 路数据 \cong 2 路数据 + 4 路数据 (\cong 为相似符号) (池顺良等, 2009)。利用四分量钻孔应变仪器的自检功能对青海省 6 套钻孔应变资料进行了可靠性分析 (门源台钻孔应变仪器第 2 分量损坏, 无法分析), 结果显示, 格尔木、德令哈、湟源、乐都 4 个台站分量钻孔应变数据自检效果较好, 1 路数据 + 3 路数据与 2 路数据 + 4 路数

* 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 青海省科技厅基础研究项目“运用 GPS 与数字化地震资料开展青海及邻区强震危险性研究” (2013-Z-710) 资助.

据具有很高的相似性，且长趋势变化形态完全一致（图1）。这说明这些分量钻孔应变观测数据真实可靠，可以用于前兆异常信息的提取分析。在2010年4月14日玉树7.1级地震前，数据自检结果较好，地震发生后自检结果不理想，两项面应

变计算结果呈反向变化趋势，于2011年初开始逐步恢复至相似趋势形态。玉树钻孔应变观测点位于玉树7.1级地震发震断裂带附近，距离震中仅40 km左右，因此出现的面应变不相似现象可能与玉树地震的发生密切相关。

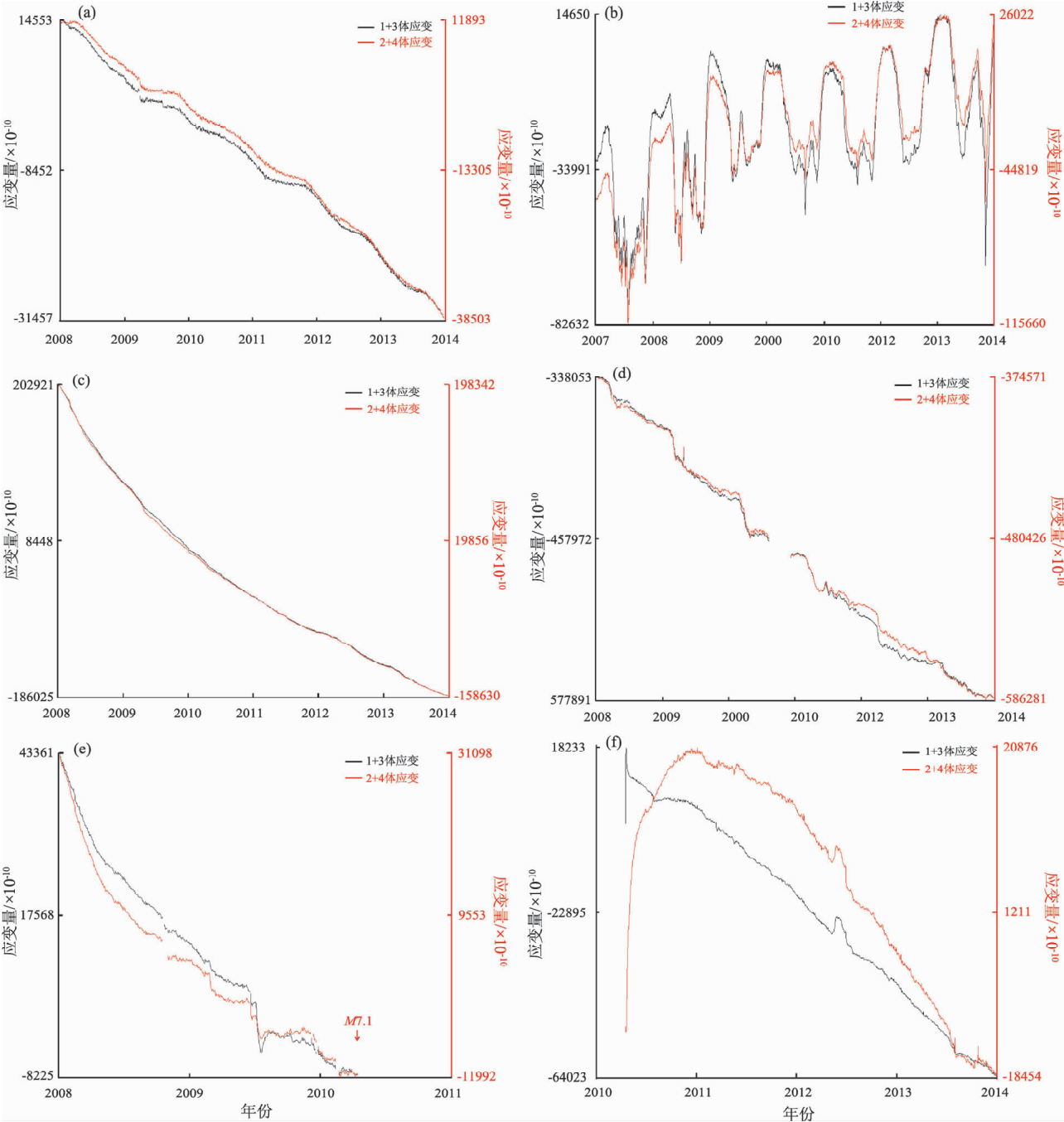


图1 分量钻孔应变自检结果

(a) 格尔木台数据；(b) 德令哈台数据；(c) 湟源台数据；(d) 乐都台数据；(e) 玉树台震前数据；(f) 玉树台震后数据

Fig. 1 Self-checking result of component borehole strain

(a) data of Golmud Station; (b) data of Delingha Station; (c) data of Huangyuan Station; (d) data of Ledu Station;
(e) data of Yushu Station before the earthquake; (f) data of Yushu Station after the earthquake

根据以往的研究发现，由于观测点环境差异，分量钻孔应变资料的主要干扰因素存在明显差异（马震等，2011）。气压干扰最具普遍性，格尔木、门源钻孔应变资料的主要干扰为气压干扰；水库

蓄水是德令哈钻孔应变资料除气压干扰外最主要的干扰因素；地下水位变化对湟源、玉树、乐都钻孔应变资料造成了明显干扰；强降雨量对玉树钻孔应变资料造成了显著干扰（表1）。

表 1 分量钻孔应变台站概况
Tab. 1 General situation of component borehole strain stations

台站名称	测点位置		钻孔岩性	钻孔深度/m	第一分量方位/(°)	主要干扰
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$				
格尔木	36.24	94.68	花岗岩	40	28	气压、温度等
德令哈	37.37	97.38	花岗岩	43.5	28	水库蓄水等
湟源	36.66	101.2	花岗岩	40.5	76	气压、地下水等
门源	37.47	101.4	花岗岩	47.4	7	气压等
乐都	36.55	102.4	花岗岩	47.6	20	气压、地下水等
玉树	33.02	97.02	花岗岩	39.5	-44	地下水、降水等

2 短临异常分析

分量钻孔应变资料在一些近震及较远强震前可能存在固体潮畸变、阶跃等临震异常信息（王在华等，2011；池顺良等，2013），但多数固体潮畸变或阶跃变化往往与观测仪器、地下水位及降水等干扰存在密切关系（卢双苓等，2012；高丽娟等，2013）。

研究青海及邻区 $M \geq 6$ 强震前 3 个月的分量钻孔应变资料变化特征，结果发现钻孔应变资料在震前出现的固体潮畸变和阶跃变化较少，这种现象与地震不存在明显的对应关系，在没有显著地震事件时也存在较多此类变化。

与气压、地下水位辅助观测资料进一步对比分析发现，分量钻孔应变出现的固体潮畸变现象多数与气压变化有关。青海境内 6 套钻孔应变资料中格尔木台的固体潮畸变现象最为普遍且幅度最大，频繁出现数倍于日变固体潮幅度的变化。以 2013 年 1~4 月格尔木钻孔应变第 1 分量数据为例，对比分析了钻孔应变资料出现的数倍于固体潮日变幅度的变化与同时段的气压变化的数据，发现该时段钻孔应变出现的所有数倍于固体潮日变幅度的畸变均与气压变化直接相关，并与气压呈负相关关系（图 2）。因此，青海省分量钻孔应变资料中的固体潮畸变及阶跃现象地震前兆意义不明显。

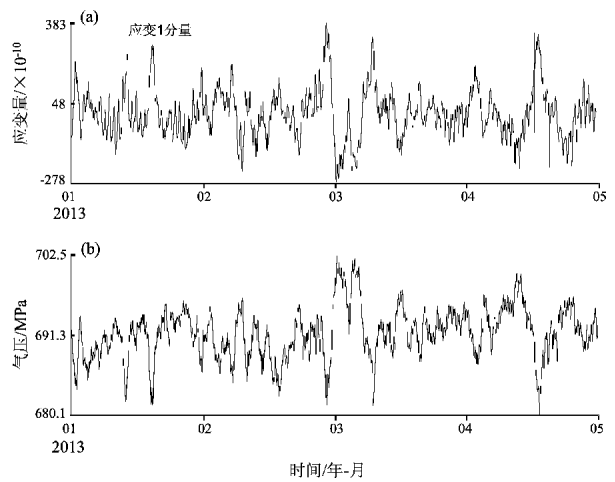


图 2 格尔木钻孔应变与气压数据曲线
Fig. 2 Curve of borehole strain and air pressure recorded by Golmud Station

3 趋势异常分析

青海境内的 6 套分量钻孔应变仪观测资料的可靠性分析结果表明，分量钻孔应变资料长趋势变化真实可靠，分量钻孔应变日均值数据能够较好地去除固体潮汐及同震的影响，使观测资料反映出较可靠的长趋势动态变化。6 套分量钻孔应变资料长趋势动态变化特征分析结果显示，在 2008 年 11 月 10 日青海海西 6.3 级地震前格尔木和门源钻孔应变出现了较为可靠的异常变化。

3.1 格尔木钻孔应变异常

格尔木钻孔应变仪架设于2006年10月, 自架设以来观测资料稳定可靠。仪器架设在格尔木市以南约25 km的戈壁滩中, 观测点紧邻昆仑山, 基本无人干扰, 除气象因素干扰外无明显环境干扰。从图3可以看出, 2007~2013年钻孔应变变化趋势呈现出3个阶段, 第一阶段为2007年7月~2008年8月, 钻孔应变以较快速率变化为主; 第二阶段为2008年9月~2010年8月, 钻孔应变曲线整体趋势较为平缓, 变化速率较小; 第三阶段为2010年9月~2013年12月, 该阶段钻孔应变1、4分量呈快速压性变化趋势。以上变化趋势与青海地区2007~2013年 $M \geq 6$ 地震活动存在明显对应关系, 2007年以来青海地区的3次 $M \geq 6$ 地震均处于格尔木钻孔应变变化较为平缓的第二阶段, 其中2008年青海海西6.3级、2009年海西6.4级地震震中位于观测点北东约185 km处。因此可以认为, 格尔木分量钻孔应变资料长趋势变化动态与周边强震活动存在明显相关关系。

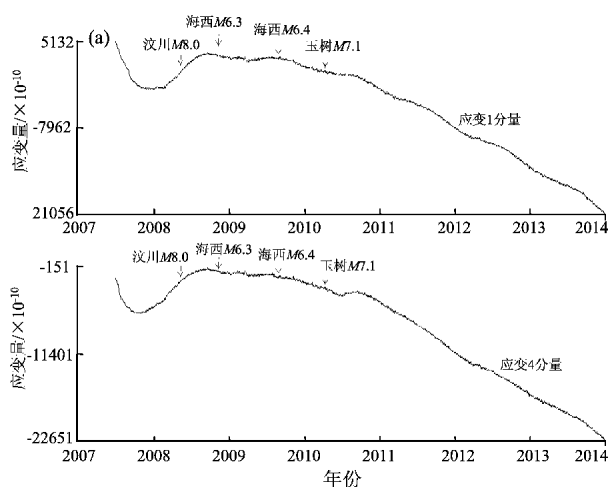


图3 格尔木钻孔应变1(a)、4(b)分量日均值曲线

Fig. 3 The daily mean value curve of borehole strain of component 1 (a) and 4 (b) recorded by Golmud Station

分量应变仪测量数据可以分解为面应变和剪应变。面应变来自两路互相垂直的径向位移之和, 剪应变则来自两路垂直径向位移之差。剪应变数据可做到不受测长基准杆本身长度变化造成的漂移和探头处地层温度变化引起的漂移影响(池顺良等, 2009)。剪应变数据可以更好地反映地壳应

力场变化, 也更有利于分析前兆异常。格尔木钻孔应变1-3、2-4剪应变计算结果显示(图4), 2008年11月10日青海海西6.3级地震前存在显著中短期前兆异常。钻孔应变剪应变从2007年11月开始逐渐呈快速变化状态, 在地震发生前1个月变化速率开始逐渐减缓, 此次异常过程变化速率明显大于其它时段。地震发生后该异常速率明显减缓但仍在持续发展, 2009年8月28日震中附近再次发生6.4级地震后该项异常结束。截至2013年12月, 钻孔剪应变处于缓慢回返过程中, 2011年以来存在年变特征。

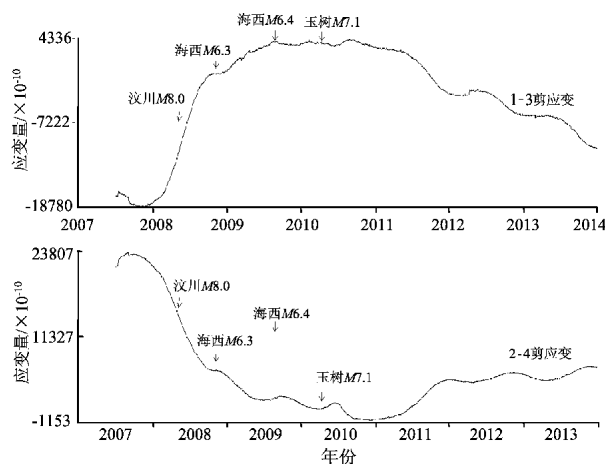


图4 格尔木钻孔应变剪应变曲线

Fig. 4 Curve of shear strain of 1-3 (a)、2-4 (b) recorded by Golmud Station

3.2 门源钻孔应变异常

门源钻孔应变仪架设于2007年6月, 经过半年的耦合阶段, 2008年以来观测资料长期较为稳定, 该测点周围无明显环境干扰。第2分量自仪器架设以来存在故障数据不可用, 其余分量数据稳定可靠。门源钻孔应变资料自2008年以来长期呈压性变化特征, 第4分量曲线存在较为稳定的年变特征。2012年下半年该资料出现了巨幅压性变化过程, 变化幅度达到 10^{-4} , 2013年以来变化速率明显减缓, 但异常仍在持续, 至今无地震对应。

门源钻孔应变日均值数据1+3面应变与1-3剪应变计算结果显示, 该测项资料在2008年11月10日青海海西6.3级地震前出现了显著异常变化。2008年汶川8.0级地震发生后, 门源钻孔应变1+3面应变数据出现转折加速变化, 该变化持续了近半年, 10月25日后该异常变化出现转折回返, 11

月 10 日发生了海西 6.3 级地震 (图 5)。门源钻孔应变观测点距离地震震中约 485 km。异常出现过程中无人干扰,仪器工作正常,地下水位稳定。此次变化开始时间与汶川 8.0 级地震发生时间一致,说明本次变化与汶川地震的发生存在密切关系,从这个角度我们也可以认为海西 6.3 级地震可能是汶川地震后发生的调整地震。

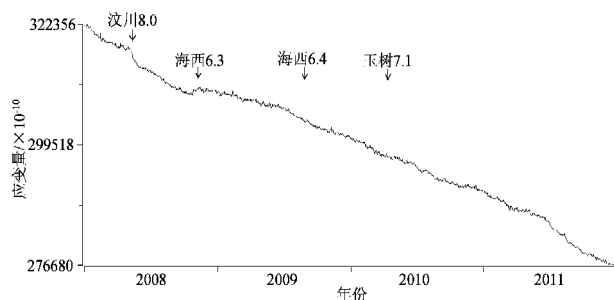


图 5 门源分量钻孔应变 1+3 面应变曲线

Fig. 5 Curve of 1+3 plane strain of component borehole strain at Menyuan Station

4 结论和讨论

笔者分析了青海省 6 套分量钻孔应变资料后认为,出现较为可靠的震前异常的资料仅有格尔木和门源两个观测点,且均为 2008 年青海海西 6.3 级地震前出现的中短期趋势性异常。2010 年青海玉树 7.1 级地震前,钻孔应变资料无明显异常变化。

格尔木和门源分量钻孔应变出现的前兆异常持续时间均为半年左右,分别在地震发生前 1 个月、半个月出现转折现象,此现象可能是临震异常信息。这两次异常回返现象的震例对我们今后利用分量钻孔应变资料判断地震发生时间具有参考意义。

出现较为可靠的前兆异常的测项格尔木和门源是 6 套钻孔应变测项中观测环境最好、资料最为稳定的两个测项。其余 4 个测项资料中包含有大量地下水位、水库蓄水及河流流量变化信息,这些干扰信息均较难剔除,对前兆异常的信息提取和震例总结工作带来巨大困难。德令哈钻孔应变观测点距离 2008~2009 年海西 6.3、6.4 级地震震中仅 135 km 左右,距离发震断裂带不足 20 km,分析长趋势变化,德令哈钻孔应变资料在震后存在明显趋势转折现象,但该观测资料受水库蓄水干扰严重,无法提取短期前兆异常信息。因此,钻孔应变资料干扰因素的深入分析及干扰信息的定量剔除工作对有效利用观测资料具有重要意义。

参考文献:

- 毕永强,王琳,王宝鹏,等. 2013. 安图 M3.7 及柳树 M4.3 地震前后 YRY-4 钻孔应变观测曲线异常形态[J]. 世界地质,32(3):579-582.
- 池顺良,迟毅,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,刘琦,池毅,等. 2013. 2013 年芦山 M_s 7.0 地震的震前及临震应变异常[J]. 地震学报,35(3):296-303.
- 马震,张晓清,马玉虎. 2011. 青海省钻孔应变资料典型干扰特征分析[J]. 高原地震,23(1):53-58.
- 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.
- 邱泽华,张宝红,池顺良,等. 2010. 汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化[J]. 中国科学,40(8):1031-1038.
- 宋治平,武安绪,王梅,等. 2003. 小波分析方法在形变数字化资料处理中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,23(4):21-27.
- 王在华,徐长银,李尚伟,等. 2011. 库尔勒铁门关钻孔应变震前固体潮畸变现象分析[J]. 内陆地震,25(3):229-237.
- 尹继尧,朱元清. 2012. 上海佘山钻孔形变观测资料正常背景噪声变化特征分析[J]. 地震研究,35(1):36-41.
- 周龙寿,邱泽华,唐磊,等. 2009. 用中国钻孔应变台网资料检验大震“前驱波”[J]. 地震,29(3):67-78.

Analysis on Borehole Strain Anomaly before the Strong Earthquakes

MA Zhen, ZHANG Xiao-qing

(*Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

Abstract

Analyzing the observation data recorded by 6 sets of component borehole strain meter of YRY-4 in Qinghai Province Since 2007, we found that there were reliable short-term trend anomaly in component borehole strain data at Golmud and Menyuan Stations before Haixi $M6.3$ earthquake on Nov. 10, 2008 in Qinghai, and no obvious short impending anomaly information before $M \geq 6.0$ earthquake in the surrounding area.

Key words: borehole strain; short-impending anomaly; plane strain; shear strain