

研究简报

地应力测量结果的校验和震前观测事实

康仲远

杨修信 王廷韫

(北京联合大学经济管理学院) (国家地震局地壳应力研究所)

任庆维

曾祥桐

蒋荣发*

(宁夏回族自治区地震局) (广东省地震局) (国家地震局兰州地震研究所)

摘要

广东省琼中和甘肃省永靖两地应力站的观测资料,在经过统计分析处理和力学校验后表明,1982年1月25日广东省崖县4.1级地震和1984年1月6日甘肃省武威5.5级两次地震前,相对稳定的区域应力场在孕震后期可能分别受到扰动。测区附加应力状态变化的共同特征是:(1)最大水平主应力曲线呈现非线性变化;(2)主应力方向发生系统偏转;(3)应力的变化趋势在震后迅速恢复稳定,但附加应力水平有所下降。

关键词 附加应力状态的变化特征;崖县地震;武威地震;四分向探头测值互检;地应力

一、引言

地震的发生既需要构造和介质性质方面的条件,又取决于地壳应力的现代活动。某些大地震前的小震活动和前兆观测结果,表明存在区域应力场在震前发生变化的事实^[1-8]。因此,对地应力场变化过程的研究,已成为地震预测和活动构造研究的重要课题。地应力作用的结果,在某一时间段内并不一定使岩体发生显著变形,在构造上也可能无任何踪迹可寻,但它却可能对岩石的物理力学性质产生某些影响。所以,在现场测量岩石物理力学性质的变化,在地震监测中有着重要的意义。测量地应力随时间的变化过程,是使地震预报和活断层研究在一般地质工作的基础上向动态、定量研究发展的一种探索和尝试,所以日益广泛地受到人们的重视^[9]。地应力应变相对观测中,应力场在震前受到扰动的事实是引人注目的。

本文讨论的是1982年1月25日广东省崖县地震和1984年1月6日甘肃省武威地震前后,用钻孔地应力相对测量方法观测到的一些结果。

二、资料的处理与分析

广东省琼中地应力站($19^{\circ}01'N$, $109^{\circ}50'E$)于1979年4月正式投入观测。测孔深度

1985年8月8日收到本文初稿,1988年4月26日决定采用。

* 韩德润和伊志华分别参加了本文前期讨论和计算数据的录入工作。

71.94m, 钻孔岩性为混合岩。该台采取了控制观测室温度、井口保温等项措施, 以排除或消减外界干扰因素的影响, 并进行了湿度、温度、水位等项辅助观测。1982年崖县发生的这次4.1级地震(震中距74km), 是琼中应力站建站以来100km范围内一次相对较强的地震活动(图1a)。

甘肃省永靖地应力站($35^{\circ}48'N, 103^{\circ}19'E$)于1982年6月开始观测, 测孔深75.41m, 为黑云母石英片岩。1984年武威5.5级地震(震中距230km)是该站附近一次较强的地震活动(图1b)。

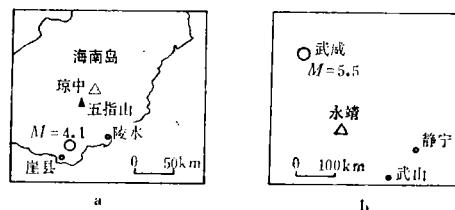


图1 地应力台站与震中位置略图

a. 琼中站和1982年1月25日崖县地震; b. 永靖站和1984年1月6日武威地震

上述两台站均安装有四分向压磁测量探头。在前兆手段清理评价工作中, 琼中台被评为一类台, 永靖台为二类台¹⁾。其元件性能良好, 并分别用CD-2型精密电感电桥和4103型压磁应力仪(分辨率优于 $10\mu H$ 测量精度为0.5%)观测²⁾。在探头安装和观测条件等方面也符合规范要求, 而且观测资料连续。因此可对其观测结果作进一步的处理分析。

由于干扰因素的存在以及测量系统自身的不稳定性, 观测值的变化是地应力变化、系统干扰、趋势漂移和随机误差的综合结果^[10]。为了对观测值进行校正, 在测孔中一般还安放了不与井壁接触的对比观测元件(悬空元件), 其读数的变化与孔径的变化无关。通常, 干扰记录、受力元件和悬空元件的观测记录曲线往往同步变化, 说明在一般情况下干扰对测值影响较大。

为了提高观测结果的信噪比, 我们先用逐步回归方法消除受力元件和悬空元件测值中的趋势变化, 然后用悬空元件测值对受力元件测值进行校正。最后利用校正后的数据计算测区的附加应力状态。对琼中台

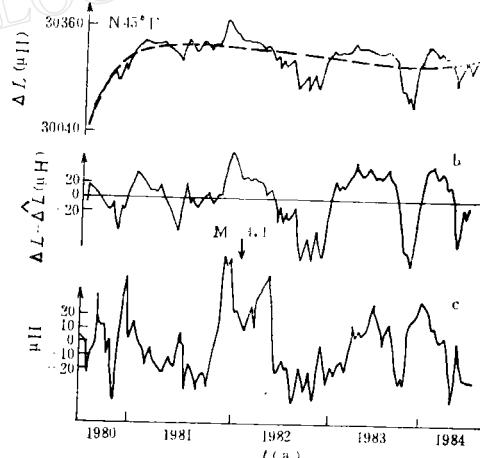


图2 琼中台N45°E方向元件观测曲线和
处理结果曲线;

- a. 原始观测曲线(旬均值),虚线为趋势拟合线
- b. 消除趋势后的曲线
- c. 用悬空元件测值校正后的曲线

1) 葛丽明、蒋红娣, 全国地应力(电感法)台站基本情况调查, 1984。

2) 黄锡定, 地应力相对测量电感法仪器分析与评价, 1984。

N45°E 方向元件测值的处理结果如图 2 所示。

为了对观测结果进行对比分析,在测量探头中安装了四个不同水平方向的受力元件,相邻元件的夹角为 45°。根据测量原理^[11],由这四个元件测值的不同组合,可求出四组平面应力状态。如果元件测值的变化是由钻孔变形引起的,在元件测量灵敏系数可靠的前提下,这四组数值应当一致,并可将其均值作为测区真实附加应力状态的估计值。

按测量原理^[11],同一时刻四组元件测值求得的四个应力状态是否一致,可用关系式

$$\frac{\Delta L_1}{\lambda_i^*} + \frac{\Delta L_3}{\lambda_i^*} = \frac{\Delta L_2}{\lambda_i^*} + \frac{\Delta L_4}{\lambda_i^*} \quad (1)$$

是否成立来检验。式中 ΔL_i 是第 i 号元件测值的变化量; λ_i^* 是 i 号元件的实际测量灵敏系数 ($i = 1, 2, 3, 4$)。由于元件在井下与孔壁的耦合状态与室内率定时可能不同,一般来讲, λ_i^* 与室内率定的灵敏系数 λ_i 会有差异。设 $\widehat{\Delta L_i^*}$ 是经数据处理后得到的元件测值的变化。将 λ_i 和 $\widehat{\Delta L_i^*}$ 代入(1)式得

$$\frac{\widehat{\Delta L_1^*}}{\lambda_1} + \frac{\widehat{\Delta L_3^*}}{\lambda_3} = \frac{\widehat{\Delta L_2^*}}{\lambda_2} + \frac{\widehat{\Delta L_4^*}}{\lambda_4} \quad (2)$$

显然,由于 λ_i 不一定等于 λ_i^* ,所以即使 $\widehat{\Delta L_i^*}$ 是由应力变化引起的,(2)式也不一定成立,即四组应力状态也可能不一致。可见,如何确定元件的实际测量灵敏系数是该问题的关键。

对琼中和永靖站的观测资料,在经提高信噪比的处理之后,我们作了(2)式是否成立的检验。(2)式可改写为

$$\left(\frac{\widehat{\Delta L_1^*}}{\lambda_1} + \frac{\widehat{\Delta L_3^*}}{\lambda_3} \right) / \left(\frac{\widehat{\Delta L_2^*}}{\lambda_2} + \frac{\widehat{\Delta L_4^*}}{\lambda_4} \right) = 1 \quad (3)$$

将处理过的资料代入(3)式,我们得到序列

$$k_j = \left(\frac{\widehat{\Delta L_{1j}^*}}{\lambda_1} + \frac{\widehat{\Delta L_{3j}^*}}{\lambda_3} \right) / \left(\frac{\widehat{\Delta L_{2j}^*}}{\lambda_2} + \frac{\widehat{\Delta L_{4j}^*}}{\lambda_4} \right) \quad j = 1, 2, \dots \quad (4)$$

研究发现,虽然序列 k_j 并不恒等于 1,但在某些时段,其值却稳定在某个常数附近,而且这一特点不因对 λ_i 的适当调整而改变。从图 3 可以看出,不同的比值序列相对稳定的时段基本相同。

假设将室内率定的元件灵敏系数 λ_i 代入(4)式后,在序列 k_j 相对稳定的时段内有

$$k_j \doteq k_0 = \text{constant} \quad (5)$$

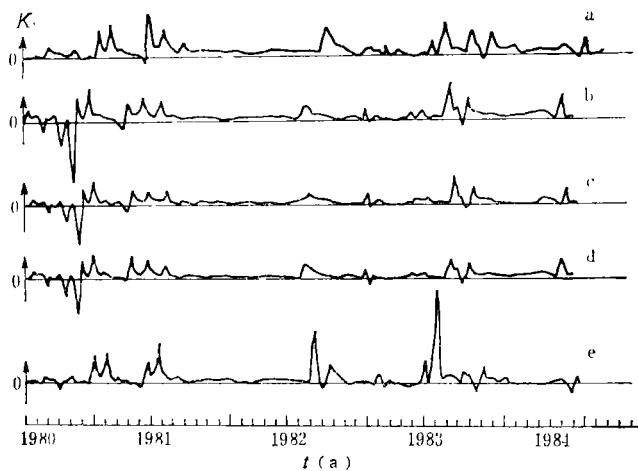
取元件实际测量灵敏系数的一种估计值为^[12]

$$\hat{\lambda}_1^* = k_0 \lambda_1, \hat{\lambda}_2^* = \lambda_2, \hat{\lambda}_3^* = k_0 \lambda_3, \hat{\lambda}_4^* = \lambda_4. \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式,那么在该时段内就有

$$k_j^* = \left(\frac{\widehat{\Delta L_{1j}^*}}{k_0 \lambda_1} + \frac{\widehat{\Delta L_{3j}^*}}{k_0 \lambda_3} \right) / \left(\frac{\widehat{\Delta L_{2j}^*}}{\lambda_2} + \frac{\widehat{\Delta L_{4j}^*}}{\lambda_4} \right) = \frac{k_j}{k_0} \doteq 1 \quad (7)$$

对灵敏系数作上述调整之后,在上述时段内所计算出的四组应力状态的一致性同时也得到了保证,从而能比较真实地估计该时段内测区应力状态的变化。

图3 广东省琼中站检验序列 k_i 曲线

a. 按室内率定灵敏系数计算 b. 由室内灵敏系数作一次迭代计算 c. 按合理初值计算
 d. 按合理初值迭代一次计算 e. 选灵敏系数的校正值为 1.05, 1, 1, 1 计算

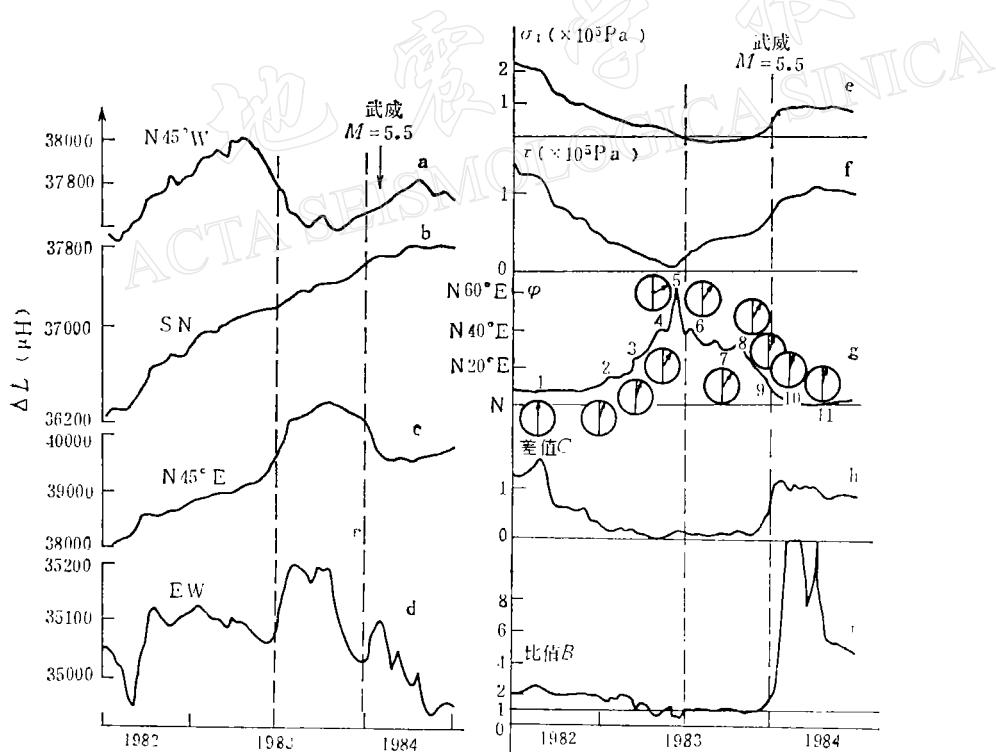


图4 永靖站原始观测曲线和应力状态曲线

a-d. 原始观测曲线 e. 最大主应力 σ_1 曲线 f. 剪应力 τ 曲线
 g. 主应力方向 φ 曲线 h. 差值 C 曲线 i. 比值 B 曲线

表1列出了对琼中站的计算结果。表中上角标为(1)和(2)的各量, 分别是由两种元件测值组合计算出的。结果表明, 琼中站自1980年7月到1984年6月, 在两个时段内,

表 1 琼中地应力站四分向探头互校计算结果(应力单位: $\times 10^4 \text{ Pa}$)

时 间 (旬)	比值* B	差值** C	两组最大主应力大小及差			两组最小主应力大小及差			两组最大主应力方向及差(度)		
			$\sigma_1^{(1)}$		$\sigma_1^{(2)}$	$\sigma_2^{(1)}$		$\sigma_2^{(2)}$	$\sigma_3^{(1)}$		$\varphi^{(2)}$
			$\sigma_1^{(1)}$	$\Delta\sigma_1$	$\sigma_1^{(2)}$	$\sigma_2^{(1)}$	$\Delta\sigma_2$	$\sigma_2^{(2)}$	$\sigma_3^{(1)}$	$\sigma_3^{(2)}$	$\varphi^{(1)}$
互 校 成 立 阶 段 ↑	810721	1.10	0.12	1.39	1.23	0.16	0.67	0.65	0.03	-68.79	-69.07
	810801	1.16	0.13	1.01	0.85	0.16	0.35	0.32	0.03	-67.83	-67.91
	810811	0.97	0.19	0.97	0.72	0.24	0.38	0.34	0.04	-66.77	0.08
	810821	1.11	0.10	1.02	0.89	0.13	0.43	0.41	0.02	-67.93	0.33
	810901	1.04	0.05	1.22	1.16	0.06	0.63	0.62	0.01	-71.37	0.33
	810911	1.20	0.20	1.16	0.21	0.25	0.57	0.53	0.04	-65.84	0.91
	810921	1.08	0.08	1.01	0.08	0.07	0.47	0.46	0.02	-66.35	0.18
	811001	1.08	0.08	1.16	1.01	0.11	0.51	0.49	0.02	-66.52	0.14
	811011	1.05	0.06	1.28	1.20	0.08	0.70	0.68	0.01	-64.48	0.38
	811021	1.01	0.01	0.94	0.93	0.01	0.35	0.35	0.00	-58.45	0.13
互 校 成 立 阶 段 ↓	811101	1.09	0.08	0.97	0.99	0.09	0.33	0.33	0.02	-51.38	2.07
	811111	1.21	0.11	0.76	0.63	0.12	0.17	0.13	0.04	-47.92	4.24
	811121	1.30	0.12	0.72	0.60	0.13	0.05	-0.01	0.05	-42.51	4.59
	811201	0.19	0.22	0.20	0.02	0.18	-0.52	-0.65	0.13	-33.50	-24.45
	811211	0.61	0.31	0.03	-0.23	0.26	-0.75	-0.95	0.20	-33.52	9.04
	811221	0.49	0.44	0.03	-0.29	0.32	-0.66	-0.99	0.33	-31.45	12.43
	820101	0.51	0.56	-0.09	-0.47	0.38	-0.76	-1.20	0.44	-32.40	19.17
	820111	0.63	0.31	-0.18	-0.32	0.13	-0.59	-0.91	0.32	-13.12	24.51
	820121	0.82	0.16	-0.29	-0.33	0.04	-0.75	-0.94	0.19	8.51	12.12
	820201	1.06	-0.05	-0.53	-0.52	0.01	-0.91	-0.85	0.07	26.69	27.40
互 校 成 立 阶 段 ↑	820211	1.21	-0.17	-0.44	-0.40	0.04	-1.02	-0.81	0.21	30.55	33.92
	820221	1.12	-0.08	-0.34	-0.32	0.02	-0.78	-0.68	0.10	29.16	30.68
	820301	1.14	-0.09	-0.31	-0.29	0.02	-0.74	-0.63	0.11	29.27	31.04
	820311	1.18	-0.13	-0.41	-0.38	0.03	-0.87	-0.71	0.17	24.65	25.56
	820321	1.20	-0.16	-0.52	-0.49	0.04	-0.93	-0.73	0.20	23.41	24.05
	820401	1.10	-0.06	-0.32	-0.30	0.01	-0.75	-0.67	0.08	25.76	0.58
	820411	1.02	-0.02	-0.64	-0.63	0.00	-1.11	-1.08	0.02	26.17	26.34
	820421	0.86	0.20	-0.71	-0.76	0.04	-1.09	-1.33	0.24	27.08	0.16
	820501	0.89	0.15	-0.74	-0.77	0.04	-1.09	-1.27	0.19	32.45	25.48
	820511	0.85	0.23	-0.83	-0.88	0.05	-1.07	-1.36	0.29	26.49	24.48
互 校 成 立 阶 段 ↓	820521	0.84	0.26	-0.83	-0.89	0.06	-1.12	-1.45	0.33	17.31	19.82
	820601	0.80	0.32	-0.79	-0.86	0.08	-1.07	-1.47	0.40	10.77	17.12
	820611	0.58	0.31	-0.22	-0.29	0.07	-0.40	-0.78	0.39	16.66	6.35
	820621	0.21	0.25	0.03	-0.04	0.07	0.12	-0.42	0.30	44.47	3.72
	820701	3.37	0.17	0.26	0.21	0.05	0.09	0.11	0.20	43.29	13.95
	820711	6.92	0.21	0.25	0.19	0.05	0.11	-0.14	0.26	41.17	10.44
	820721	0.84	0.26	-0.83	-0.89	0.06	-1.12	-1.45	0.33	17.31	29.52

注: * $B = \left(\frac{\hat{\Delta}L_1^*}{\hat{\Delta}L_1^*} + \frac{\hat{\Delta}L_2^*}{\hat{\Delta}L_2^*} \right) / \left(\frac{\hat{\Delta}L_3^*}{\hat{\Delta}L_3^*} + \frac{\hat{\Delta}L_4^*}{\hat{\Delta}L_4^*} \right)$; ** $C = \left(\frac{\hat{\Delta}L_1^*}{\hat{\Delta}L_1^*} + \frac{\hat{\Delta}L_4^*}{\hat{\Delta}L_4^*} \right) - \left(\frac{\hat{\Delta}L_2^*}{\hat{\Delta}L_2^*} + \frac{\hat{\Delta}L_3^*}{\hat{\Delta}L_3^*} \right)$ 。

上述两组应力状态最大主应力差的平均值为 $0.14 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，附加主应力方向的平均差值为 1.4 度。在野外观测条件下，在长达 8 个月的连续观测中，由不同元件测值组合计算出的应力状态存在这样的误差，应当是允许的。

同样处理永靖站的资料也得到类似的结果（图 4）。

由于测量系统分辨能力的限制，只有在地应力相对变化加强的时段，即应力变化因素对观测值的变化起主导作用时，其四组应力状态才可能基本一致。琼中站和永靖站的资料表明，只是在台站附近发生中强地震前后，几组应力状态才出现较明显的一致性。

三、地应力震前变化特征

研究武威地震和崖县地震前应力站的观测结果，我们对地壳应力场在震前的变化特征得到以下几点认识：

1. 最大主应力和剪应力在震前出现非线性的变化（图 4e, f），反映了应力加强—相对减弱的反向变化过程。断层失稳突变之后，应力又迅速恢复，但应力变化水平相对有所下降。这说明地震前的应力积累过程与时间的关系可能是非线性的。震后地壳应力场又调整到新的平衡状态。
2. 测区附加主应力方向在震前表现出系统的偏转，震后又恢复到原来较稳定的指向上去（图 4g）。这说明在孕震过程中，特别是在其后期，震源附近一定范围内的应力场可能受到某种统一的力学机制的控制。
3. 由于震前地壳应力场变化的加剧，测孔受到比通常强得多的应力作用，致使应力变化有可能成为影响元件测值发生变化的主要因素。因而，由不同元件测值组合得到的多组应力状态基本一致。它可表现为比值 B 近于 1，而差值 C 接近零（图 4h, i）。

参 考 文 献

- [1] 葛培基，1983. 形变测量和道孚地震. 地震学报, **5**, 226—233.
- [2] 章光月，1983. 1975 年 2 月 4 日海城地震 ($M = 7.3$) 的前震序列. 地震学报, **5**, 1—13.
- [3] 张超，1983. 压扭性断裂的震前应力场与地应力异常变化. 地震学报, **5**, 185—194.
- [4] 郑治真、刘元壮、胡祚春、吕苑苑、景天永、张耀国，1979. 根据地下水资料的数字滤波探讨唐山大地震的孕育过程. 地球物理学报, **22**, 267—280.
- [5] 吴大铭、韩大宇，1983. 用多道维纳滤波方法处理唐山地震前后的大灰厂三种形变资料. 地震学报, **5**, 31—38.
- [6] 华祥文，1980. 唐山强震前后北京、天津周围地区应力的变化过程. 地震学报, **2**, 130—145.
- [7] 陈运泰、黄立人、林邦慧、王新华，1979. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式. 地球物理学报, **22**, 201—217.
- [8] 马宗晋、傅征祥、张郢珍、汪成民、张国民、刘德富，1982. 1966—1976 年中国九大地震. 地震出版社.
- [9] 徐煜坚，1982. 论活动断裂，中国活动断裂. 10—12，地震出版社.
- [10] 唐仲远，1983. 随机时序分析方法对地震信息的识别. 地震, **3**: 1—9.
- [11] 潘立亩，1981. 测量地应力的钻孔变形法. 地应力测量的原理和应用, 1—47，地质出版社.
- [12] 任庆维、张文孝、唐仲远、杨修信，1986. 确定地应力探头灵敏度校正系数的一种数学方法. 中国地震, **2**, 1, 79—84.

A METHOD FOR TESTING CRUSTAL STRESS MEASUREMENTS AND THE OBSERVATIONS BEFORE TWO EARTHQUAKES

KANG ZHONGYUAN¹⁾, YANG XIUXIN²⁾, WANG TINGYUN²⁾, REN QINGWEI³⁾,
ZENG XIANGTONG⁴⁾ AND JIANG RONGFA^{5)*}

Abstract

The observations from two crustal stress observatories at Qongzhong (Guangdong Province) and Yongjing (Gansu Province) show that the relatively stable regional stress field might have been disturbed during the late preseismic stages before the Yaxian earthquake ($M=4.1$) of Jan. 25, 1982 in Guangdong Province and the Wuwei earthquake ($M=5.5$) of Jan. 6, 1984 in Gansu Province. The characteristics of change of the additional stress state in the observation area are: 1. The curves of the major horizontal principal stress show nonlinear changes; 2. A systematic rotation of the principal directions of additional stress takes place; 3. The tendency of change of the stress recovers with considerable speed after the seismic events, but the values of additional stress has decreased.

1) The College of Economic Management, Beijing Union University;

2) Institute of Earth's Crust Dynamics, State Seismological Bureau;

3) Seismological Bureau of Ningxia Huizu Autonomous Region;

4) Seismological Bureau of Guangdong Province;

5) Lanzhou Seismological Institute, State Seismological Bureau.

* Han Derun and Yi Zhihua took part in the discussion of earlier stage and the data inputting respectively.