

文章编号: 0253-3782(2007)02-0165-08

断层垂直形变对强远震的响应^{*}

荆 燕^{1, 2),*} 张世中¹⁾ 李 宏¹⁾ 熊玉珍¹⁾ 刘凤秋¹⁾
孙起伟¹⁾ 董建业¹⁾ 张鸿旭¹⁾ 陈葛天¹⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100083 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院

摘要 利用新型断层形变三维观测系统的垂直向观测结果,研究了两年以来 7.0 级以上强远震在非发震断层上的同震响应特征. 结果表明,非发震断层体垂直向同震形变的延迟时间、同震位移最大振幅、振动持续时间等特征与地震震级、震中距等之间存在密切联系. 断层体垂直向同震形变延迟时间与震中距线性正相关,发生地震同震形变的响应速度约为 5.5 km/s,反映了在上层花岗岩地层中面波的传播速度;同震位移最大振幅和震中距的对数、震级之间具有明显线性关系,震级越大,同震位移的最大振幅越大;地震震级是断层体垂直同震形变振动持续时间的主要影响因素,震级越大,同震形变振动持续时间越长. 根据断层仪观测数据推算得到的断层体垂直向同震形变延迟时间、同震位移最大振幅、振动持续时间的经验计算公式,对于地震同震形变研究具有一定意义.

关键词 断层垂直形变 强远震 同震响应

中图分类号: P315.72^{±5} **文献标识码**: A

引言

研究震时地形变特征与震级、震中距的关系是地震研究的重要内容,地形变数字化观测技术为此提供了重要的技术支持. 随着地形变数字化观测技术的不断提高,已观测到大量不同地震发生时刻多个观测点处的同震形变,使我们对地震过程中的地形变特征有了一定程度的认识.

受采样率不高等因素的限制,针对有关地震发生时段非发震断层体同震形变的研究相当少. 过去跨断层形变观测主要采用人工流动水准、基线观测,采样间隔比较长,仅有的几个跨断层自动化观测台站的观测采样率也多为数小时. 各种研究表明,非发震断层体的同震形变通常是在几分钟至几百分钟内完成的(牛安福等, 2005),小时级以上的采样率难以完整记录断层体同震形变活动的动态图象,甚至根本观测不到其任何信息.

最新研发的断层形变三维观测系统通过对断层体三维活动形变量的分钟采样,实时监测断层体活动的微动态特征,获得了许多过去观测不到的断层体活动信息. 本文利用新疆独山子、辽宁大连金州两个地震台投入观测两年多来的断层连续形变观测数据,探讨强远

^{*} 地震科学联合基金项目(605021)资助.
2006-07-21 收到初稿, 2006-11-14 决定采用修改稿.
[†] 通讯作者. e-mail: jeanyfeifei@hotmail.com

震对断层垂直向形变的影响.

1 基本情况

新型断层形变三维观测系统由光电型丝式断层水平形变测量仪、光电型浮子式断层垂直形变测量仪和数据采集器 3 部分组成,采用先进的线阵 CCD(charge coupled devices)数字图象传感技术和微处理技术,成功地解决了高分辨率与大量程之间的矛盾,可对断层三维运动情况进行实时监测,并实现了数据的远程自动传输(王建军,2004).经过两年多时间跟踪观测,发现在强震发生过程中断层仪所监测的断层体亦会产生类似地震仪或其它高精度形变测量仪(如应变仪、地倾斜仪等)所观测到的地震同震反应,这是过去在断层形变活动观测中没有发现的.本文将利用所搜集的大连金州地震台与独山子地震台光电型浮子式断层垂直形变测量仪的分钟值数据,研究 7.0 级以上强震发生时断层的垂直向同震形变规律.

目前已有的两台光电型浮子式断层垂直形变测量仪分别布设在新疆北天山独山子山前断裂和辽宁大连市附近的金州断裂之上.独山子台所监测的独山子山前断裂走向 $N110^{\circ}E$ 、倾向 SW、倾角约 20° ,断层测线为单测线,测线长 34.3 m,走向 $N50^{\circ}E$,与断层走向的夹角为 60° .大连金州台所监测的金州断裂走向 $NE15^{\circ}\sim 30^{\circ}$,倾向 NW,倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$.金州台断层测线有正交与斜交两条,其中光电型浮子式断层垂直形变测量仪布设在与断层正交的一条测线上,测线长度 43 m.资料表明,独山子山前断裂和金州断裂全新世以来都具有明显的活动(邓起东等,2000;李新,李涯,1998;马杏垣,1989).

2 观测资料分析

本文搜集了独山子台和金州台的断层垂直形变连续观测资料.独山子台资料始于 2003 年 10 月 27 日,止于 2006 年 6 月 30 日;金州台资料始于 2004 年 12 月 1 日,止于 2006 年 5 月 3 日.在上述相应时段内,全球共发生了 7.0 级以上强震 17 次,其中 12 次强震显示出了比较明显的断层垂直向同震形变,共 18 个震例(表 1、图 1 和图 2).

在 17 次强震中未捕捉到断层同震位移信息的地震共 5 次,分别为 2004 年 11 月 12 日帝汶岛 7.5 级地震,2004 年 12 月 24 日麦阔里岛 7.7 级地震,2004 年 12 月 24 日和 2004 年 12 月 26 日尼科巴群岛的两次 7.5 级地震,以及 2006 年 2 月 23 日莫桑比克 7.5 级地震.其中 2004 年 12 月 24 日麦阔里岛 7.7 级地震和 2006 年 2 月 23 日莫桑比克 7.5 级地震在独山子台和金州台的震中距超过 10 000 km,而其余 3 次强震的震中距也都大于 4 000 km.另外,独山子台亦未捕捉到 2005 年 5 月 14 日苏门答腊 7.0 级地震的信息.

为了方便与地倾斜、地应变等其它同震形变现象进行综合比较分析,我们在断层体垂直向同震形变研究中定义了 3 个物理特征参数,分别为延迟时间(t_y)、同震位移最大振幅(A_{\max})和振动持续时间(t_1).其中,延迟时间(t_y)是指断层测点观测到的断层同震垂直形变发生时刻与地震发生时刻之间的差值,它代表地形变能量传播所需要的时间,与地震波的传播速度和震源距离等因素有关;同震位移最大振幅(A_{\max})是指由断层仪观测资料显示出的垂直同震形变动态图象同震振幅的最大值;振动持续时间(t_1),是指在仪器采样率范围内观测到的从同震垂直形变开始发生到结束的时间长度,采样为 1 次/分钟.

表 1 断层垂直向同震形变参数

编号	台站名称	日期 年-月-日	发震时刻 时:分	地点	$\lambda_E/^\circ$	$\varphi_N/^\circ$	M	Δ /km	同震形变		
									t_y/min	A_{max}/mm	t_l/min
1	独山子	2004-09-05	18:07	日本本州	137.0	33.1	7.2	4 790	16	0.053	43
2	独山子	2004-09-05	22:57	日本本州南	136.8	33.1	7.4	4 650	17	0.173	45
3	独山子	2004-11-29	02:32	日本北海道	145.2	42.9	7.1	4 750	19	0.033	16
4	独山子	2005-03-29	00:10	苏门答腊	97.0	2.2	8.5	4 900	15	0.350	168
5	独山子	2005-08-16	10:46	日本本州东海岸	142.2	38.2	7.1	4 720	13	0.015	14
6	独山子	2005-10-08	11:50	巴基斯坦	73.6	34.4	7.8	1 490	14	0.130	44
7	独山子	2005-11-15	05:39	日本本州以东海中	144.7	38.2	7.1	4 950	16	0.024	55
8	独山子	2006-04-21	07:25	堪察加半岛	167.2	61.0	8.0	5 430	20	0.111	65
9	独山子	2006-05-03	23:26	汤加	174.2	-20.0	7.9	11 500	25	0.025	147
10	独山子	2006-05-16	23:28	苏门答腊	97.2	0.1	7.2	5 000	13	0.012	99
11	独山子	2006-05-22	19:12	堪察加	165.8	60.6	7.3	5 400	16	0.013	40
12	金州	2005-03-29	00:10	苏门答腊	97.0	2.2	8.5	4 800	14	0.350	168
13	金州	2005-08-16	10:46	日本本州东海岸	142.2	38.2	7.1	1 800	9	0.033	16
14	金州	2005-05-14	13:05	苏门答腊	98.5	0.6	7.0	4 900	16	0.007	4
15	金州	2005-10-08	11:50	巴基斯坦	73.6	34.4	7.8	4 250	14	0.130	44
16	金州	2005-11-15	05:39	日本本州以东海中	144.7	38.2	7.1	1 900	6	0.024	55
17	金州	2006-04-21	07:25	堪察加半岛	167.2	61.0	8.0	3 900	9	0.111	65
18	金州	2006-05-03	23:26	汤加	174.2	-20.0	7.9	8 600	22	0.025	147

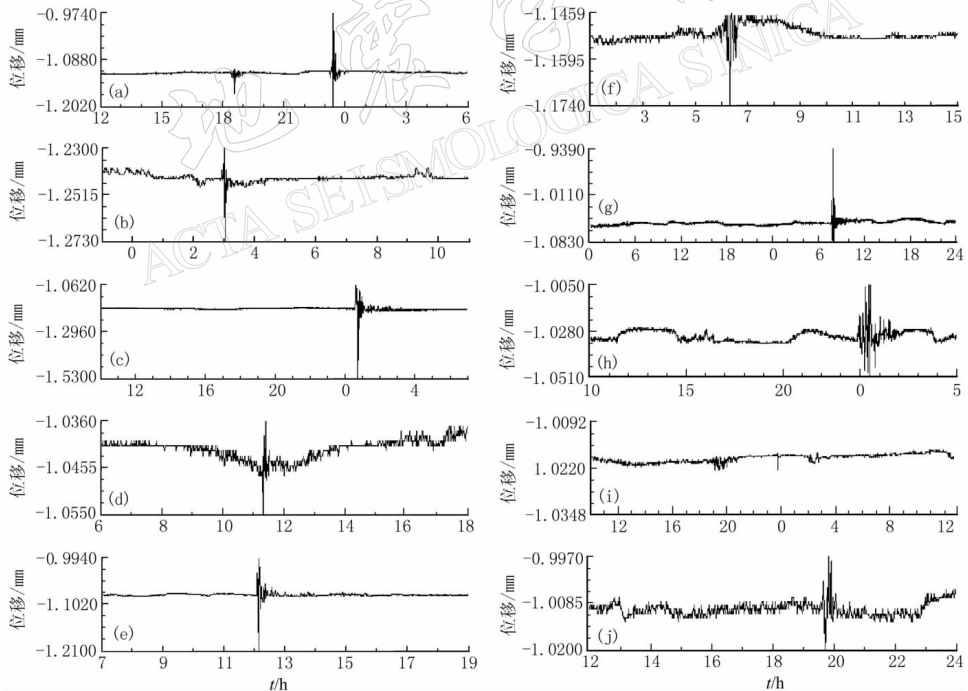


图 1 独山子台垂直向断层仪观测到的地震同震形变图

(a) 2004-09-05 日本本州 7.2 级地震和 2004-09-05 日本本州南 7.4 级地震; (b) 2004-11-29 日本北海道 7.1 级地震; (c) 2005-03-29 苏门答腊 8.5 级地震; (d) 2005-08-16 日本本州东海岸 7.1 级地震; (e) 2005-10-08 巴基斯坦 7.8 级地震; (f) 2005-11-15 日本本州以东海中 7.1 级地震; (g) 2006-04-21 堪察加半岛 8.0 级地震; (h) 2006-05-03 汤加 7.9 级地震; (i) 2006-05-16 苏门答腊 7.2 级地震; (j) 2006-05-22 堪察加 7.3 级地震

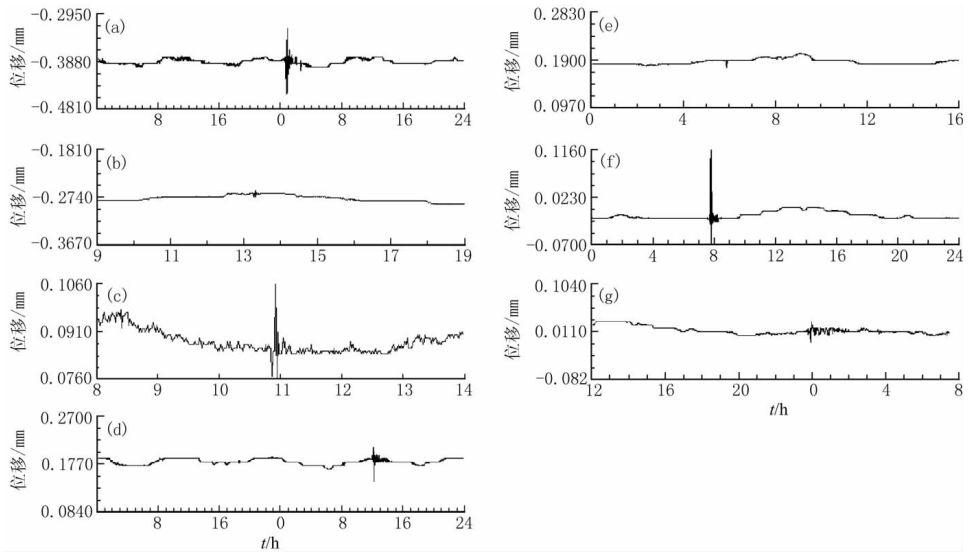


图 2 金州台垂直向断层仪观测到的地震同震形变图

- (a) 2005-03-29 苏门答腊 8.5 级地震；(b) 2005-05-14 苏门答腊 7.0 级地震；(c) 2005-08-16 日本本州东海岸 7.1 级地震；(d) 2005-10-08 巴基斯坦 7.8 级地震；(e) 2005-11-15 日本本州以东海中 7.1 级地震；(f) 2006-04-21 堪察加半岛 8.0 级地震；(g) 2006-05-03 汤加 7.9 级地震

2.1 延迟时间与震中距关系

断层同震形变的延迟时间反映了影响断层同震活动的地震波在地层中的传播快慢。地震发生后，地震波在岩石中传播的时间与其传播距离成正比。

对表 1 中断层同震形变的延迟时间和震中距进行一元线性相关性分析，得到

$$\Delta = 327.8 t_y \tag{1}$$

式中， t_y 为非发震断层体同震形变的延迟时间(单位: min)， Δ 为震中距(单位: km)，其相关系数为 0.8132，在 $\alpha=0.01$ 置信度上显著回归。

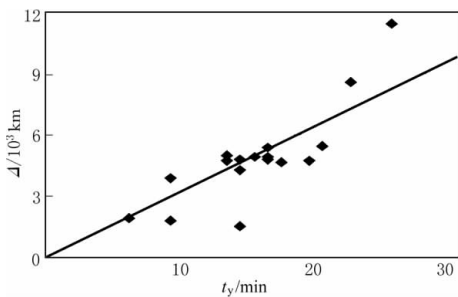


图 3 断层体垂直向同震形变延迟时间(t_y)与震中距(Δ)关系

通过延迟时间和震中距拟合方程(1)的斜率值可知，地震波传播到台站的速度为 327.8 km/min 或 5.5 km/s，反映了上层花岗岩地层中面波的传播速度(图 3)。从这个角度也验证了拟合方程的可信度，具有明显的物理意义。

2.2 同震位移最大振幅与震级及震中距关系

由地震波传播理论可知，震级越大的地震其能量越大，所产生的同震地形变量亦越大。相反，震中距越大，由于地震波传播的能量几何扩散和衰减较多，产生同震地形变的量值也

将减小。独山子、金州地震台断层仪的垂直观测结果表明，断层体的同震形变也遵循这一规律。我们对此进行了定量计算。

根据现有面波震级的计算公式(Gutenberg, 1945)

$$M_s = \lg(A_s/T)_{\max} + \sigma(\Delta^\circ) + C_s \tag{2}$$

式中, A_s 为两水平分向地动位移的矢量合成振幅, 以 μm 为单位; T 为相应的周期, 以 s 为单位; $\sigma(\Delta^\circ)$ 为面波震级起算函数, 只与震中距 Δ° (测点与震中间的大圆弧度数) 有关; C_s 为台站校正值。

用断层体最大同震垂直位移近似替代水平合成位移, 式(2)可简化为

$$M = a \lg A + b \lg \Delta + c \quad (3)$$

根据上述理论, 对表 1 中的断层体同震位移最大振幅和震中距的对数以及地震震级等进行二元线性回归分析, 得

$$M = 0.802 \lg A + 0.833 \lg \Delta + 5.586 \quad (4)$$

式中, A 为非发震断层体同震位移最大振幅(单位: mm), Δ 为震中距(单位: km), M 为震级. 其复相关系数为 0.848.

经 F 检验, $F=19.243$, 观测结果与回归方程的残差满足正态分布规律, 回归方程高度显著(图 4).

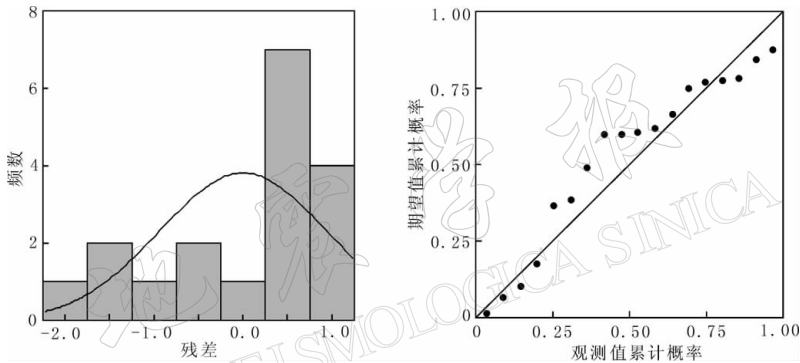


图 4 同震位移最大振幅与震级、震中距回归模型的残差直方图和正态累计概率图

2.3 同震形变振动持续时间与震级及震中距关系

断层体发生同震形变的振动持续时间与断层体受地震影响程度的大小有关, 其中发生作用的主要是地震自身能量和距离地震震源远近两个因素. 受仪器采样率的限制, 我们只能将同震形变振动持续时间的单位精确到分钟.

通过对独山子、金州台光电型浮子式断层垂直形变测量仪观测到的断层体垂直同震形变的振动持续时间和震中距的对数及震级进行二元线性回归分析, 发现断层体同震形变振动持续时间与震级和震中距之间存在下列统计关系:

$$M = 0.836 \lg t_1 + 0.006 \lg \Delta + 6.129 \quad (5)$$

式中, t_1 为非发震断层体同震形变振动持续时间(单位: min), Δ 为震中距(单位: km), M 为震级. 其复相关系数为 0.720. 进行 F 检验, 得 $F=8.069$. 式(5)中, 震中距项的系数很小, 远小于同震形变振动持续时间项的系数, 可忽略不计.

再仅对断层体垂直同震形变持续时间的对数及震级重新进行线性回归分析, 得

$$M = 0.837 \lg t_1 + 6.150 \quad (6)$$

其相关系数为 0.720. 对其结果进行 F 检验, 得 $F=17.214$, 回归方程高度显著, 且 F 检验值较回归方程(5)有较大程度提高, 观测结果与回归方程的残差值满足正态分布规律(图

5). 说明与震中距相比, 地震震级是断层体垂直同震形变持续时间的主要影响因素.

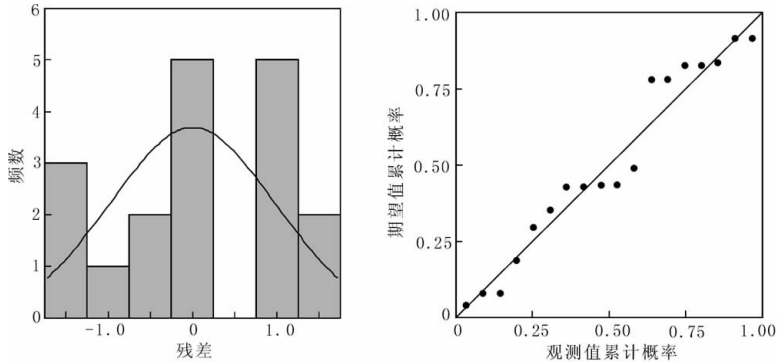


图5 同震形变振动持续时间与震级回归模型的残差直方图和正态累计概率图

3 讨论

本文研究了断层体垂直形变观测资料, 而未讨论水平形变观测结果. 其原因主要有两个: 一是独山子山前断裂和金州断裂这两个断层都是以垂直活动为主的断裂, 垂直活动分量远远大于水平分量. 尤其独山子山前断裂, 其垂直滑移速率是水平滑移速率的近 10 倍 (荆燕等, 2005). 受仪器观测精度限制, 水平同震形变虽然也有, 但不易提取出同震形变信息; 二是断层体的垂直形变是测量仪的直接观测结果, 而水平形变是通过一定数学近似计算间接得到的 (张超, 过家元, 1987), 利用其进行微小形变分析容易引入人为误差. 故文中未对断层体水平同震形变特征进行计算分析.

通过对断层体垂直同震形变特征的综合分析可以看出, 断层垂直向同震形变特征参数与发震地震的震级、震中距等因素之间存在着非常密切的联系. 具体主要表现在:

1) 断层体垂直向同震形变延迟时间与震中距线性正相关. 震中距越大, 同震形变的延迟时间越长. 断层体发生同震形变的响应速度为 327.8 km/min 或 5.5 km/s , 反映了上层花岗岩地层中面波传递的波速.

2) 断层体垂直向同震位移最大振幅与震中距的对数、震级之间具有线性关系. 震级越大, 同震形变的最大振幅越大.

3) 与震中距相比, 地震震级是断层体垂直同震形变持续时间的主要影响因素. 震级越高, 同震形变振动持续时间越长.

文中所讨论的断层同震形变特征虽与地倾斜、地应变的同震形变特征有相似之处 (牛安福等, 2005), 但更多反映出的是一定跨度范围内断层体的整体运动特征, 而非地表某一点的活动情况. 通过本文研究, 并没有观测到类似应变仪等观测到的明显阶变现象 (邱泽华, 石耀霖, 2003), 即强远震没有改变所监测断层的闭锁状态, 没有在断层上引起永久位移.

需要注意的是, 现有断层仪可用于非发震断层体同震形变研究, 但其观测精度和采样率还需进一步提高. 现有仪器分辨率为 $7 \mu\text{m}$, 仅能分辨出大于此量级的断层形变量; 采样率为 1 次/分钟, 仍存在局限. 文中我们只观测到了部分 7.0 级以上强震在非发震断层上引起的同震形变, 而未发现低于 7.0 级以下地震的同震形变. 另外, 断层同震形变的振动图

象也不如地倾斜、地应变观测所得到的同震波动图象典型。这期间除断层仪观测的变形要复杂于其它地形变仪外，现有仪器采样率较低可能也是一个重要原因。由于本文观测数据样本较少，所给出的数学拟合经验关系可能存在一定局限。随着观测数据的积累，作者将对此做进一步研究。

新疆伊犁州地震局宋光甫和辽宁金州地震台王卫红帮助搜集了本文的观测资料；审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见，使本文在原有水平上有很大提高。作者在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 2000. 天山活动构造[G]//中国活断层研究专辑. 北京: 地震出版社: 126-146.
- 荆燕, 赵营海, 张鸿旭, 等. 2005. 独山子—安集海断裂运动的单基线双分量斜跨断层监测研究[J]. 地震研究, **28**(2): 192-195.
- 李新, 李涯. 1998. 金州断裂降震效应初探[J]. 东北地震研究, **14**(2): 24-27.
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社: 129-132.
- 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.
- 邱泽华, 石耀霖. 2003. 地震造成原距离应力阶变的观测实例[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 60-64.
- 王建军. 2004. 跨断层形变自动化观测技术的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, **23**(2): 261-266.
- 张超, 过家元. 1987. 应用短水准、短基线监测断层运动的原理和方法[G]//中国地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(1). 北京: 地震出版社: 54-69.
- Gutenberg B. 1945. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **35**: 3-12.

RESPONS OF VERTICAL DEFORMATION ON FAULTS TO REMOTE STRONG EARTHQUAKES

Jing Yan^{1,2)} Zhang Shizhong¹⁾ Li Hong¹⁾ Xiong Yüzhen¹⁾ Liu Fengqiu¹⁾
Sun Qiwei¹⁾ Dong Jianye¹⁾ Zhang Hongxu¹⁾ Chen Getian¹⁾

1) *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China*

2) *School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Abstract: Vertical coseismic deformation on non-causative fault caused by remote strong earthquakes (epicentral distance $\geq 1\ 500$ km, $M_s \geq 7.0$) are observed by fault-monitoring instruments of new type during recent two years. The monitoring result shows, delay time, maximum amplitude and duration of vertical deformation on the non-causative fault have remarkable close relationship with earthquakes magnitude and epicentral distance. The delay time of vertical coseismic deformation have positive linear relationship with epicentral distance. The velocity of coseismic deformation is 5.5 km/s, close to the velocity of surface wave in granite. The logarithms of maximum amplitude of coseismic deformation and epicentral distance have remarkable linear relationship with magnitude. The greater the magnitude and the closer the epicentral distance are, the bigger the maximum amplitude of coseismic deformation on non-causative fault will be. Relative to the epicentral distance, the magnitude is the most important factor to the duration of coseismic vertical deformation on the non-causative fault. Stronger earthquake causes longer vibration duration of coseismic deformation. The experiential equation of co-seismic deformation faults obtained by this work is significant on the coseismic deformation research.

Key words: vertical fault deformation; remote strong earthquakes; co-seismic response