

黄建平、石耀霖、孙玉军等, 2012, 气温变化对唐山地震台跨断层形变观测的影响, 中国地震, 28(2), 222 ~ 230。

气温变化对唐山地震台跨断层形变观测的影响

黄建平^{1, 2)} 石耀霖²⁾ 孙玉军³⁾ 李文静⁴⁾

1) 中国地震局地震预测研究所, 北京市复兴路 63 号 100036

2) 中国科学院研究生院计算地球动力学实验室, 北京市玉泉路甲 19 号 100039

3) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

4) 中国地震局第一监测中心唐山台, 河北唐山 063001

摘要 利用三维热-弹性模型有限元方法, 模拟了唐山地震台及其周边地区在地表温度呈不同幅度的周期性变化的情况下, 对台站短基线观测的影响, 并对由于地表温度变化产生的应变进行了估算。计算结果表明, 由于温度差异造成的观测桩距离的年变化幅度达到 2mm 左右, 这与目前台站观测数据的年变化幅度基本一致, 表明台站观测数据包含了温度的重要影响。另外, 台站各基线桩的位移序列相对于温度变化滞后了 1 ~ 1.5 个月的时间。同时发现, 台站短基线各测段的实际观测数据存在着同步的趋势性变化, 这不是稳定年变化的温度变化能解释的, 因此这种趋势变化可能与局部应力场调整或者断层活动有关。

关键词: 有限元 温度变化 唐山台 跨断层观测

[文章编号] 1001-4683(2012)02-0222-09

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

由于地壳结构的不均匀性, 地壳在内力和外力的作用下就会产生不均匀地壳形变, 导致地壳某些特殊部位上的应力-应变积累。当这一积累应变达到地壳的极限应变值时, 或已有断层上的应力积累达到了断层的抗剪强度时, 地壳便突然破裂, 发生地震。我们把这种与地震的孕育和发生过程直接有关的地壳形变过程称为地震地壳形变^①。孕震过程中的地震地壳形变称为地壳形变或地壳形变前兆, 但这一过程比较缓慢(速率约 1 ~ 2mm/a), 不易被发觉(张晁军等, 2005)。而且, 影响观测数据的因素很多, 除了仪器和人为因素外, 还有诸多的环境因素, 如气温、降雨和地下水的抽取, 都会对地形变观测造成影响, 对于提取和地震相关的有意义信息形成干扰(王若柏等, 2000)。尽管可以采用种种数据处理方法对这些干扰

[收稿日期] 2012-03-01

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(0207690236)和国家自然科学基金(41104030)共同资助

[作者简介] 黄建平, 男, 1979 年生, 助研, 博士, 主要研究方向为地球动力学。Email: huangjianping@seis.ac.cn

① 何世海, 2000, 定点地壳形变, 见: 中国地震局人事教育司等, 地震分析预报技术骨干培训教材(下), 177 ~ 220。

因素进行剔除和判定(刘权威,1996;胡卫建等,2002;Zadro et al,1987;Moro et al,1998;Garavaglia et al,2000;Matsumoto et al,2003a、2003b),但在目前的认识水平下,干扰和地震前兆信息有时难以区分,给前兆信息的提取带来很大困难。因此,要从原始观测数据中找出“地震地壳形变”,就需要考虑这些非地震因素对地壳形变的作用。

跨断层短水准和短基线测量是寻找地震地壳形变的观测手段之一。由于该手段测量点位于地表,因此温度的变化对于短基线和短水准观测有重要的影响。前人通过多道维纳滤波(吴大铭等,1983)、多元线性回归(卢良玉等,1990)、卡尔曼滤波(游丽兰等,1992)等方法来试图消除温度的影响,但尚未见到从物理机制的角度对短基线和短水准测量受温度变化的影响给出的定量估计和分析结果。

近年来,随着数值模拟技术在地球动力学领域的不断发展,一些研究者开始用有限元方法来定量计算温度变化对应力、应变的影响(曹建玲等,2005;孙玉军等,2008a、2008b)。同时,已有的GPS研究表明,唐山地区的主要断裂带活动速率低,地表变形小,应变速率数量级为 10^{-9} /a(李延兴等,2006;朱守彪等,2010)。而笔者前期利用唐山台站的短基线测量计算得到的应变结果达到 10^{-5} /a,与GPS的计算结果存在着显著的差异,而且发现不论是哪种考虑断层活动因素的动力学模型(刚性地块断层错动、均匀弹性变形无断层错动、均匀弹性变形加上断层错动),都不能完善地解释观测数据。换句话说,观测数据的解释不能仅用均匀弹性变形加断层错动,还有其他非均匀变形的因素(黄建平等,2010)。

基于已有研究,本文立足于讨论这种非均匀变形的一种可能机制,即不均匀的热胀冷缩引起的效应。为定量估计单纯的地面温度变化带来的应变变化,本文采用有限元方法,结合唐山台局部地质结构特点,对气温变化产生的位移及热弹性应变作了模拟分析,进而解释台站应变与大区域应变之间存在差异的原因。

1 模型的建立

在地形平坦、介质均匀的情况下,气温变化造成的地下应力应变场是有理论解的。唐山地震台场地基本平整,观测场地内除了有两个地震遗址和几颗树木外,均为平地。台站周围有部分普通建筑,多为平房和临时性简易建筑。因此,根据该范围内的温度变化可以将场地分为3种类型:①观测场地所在的露天场地;②有篷遮挡的地震遗址;③周围房屋。据此建立的三维模型顶视图如图1所示。其中,观测场地长度所占面积约 $24 \times 48\text{m}^2$,为了尽可能减小边界条件的影响,研究中加大了研究区域,将其延伸到 $300 \times 300\text{m}^2$ 。模型深度为10m,这样的深度基本超过了地表温度年变化的影响深度(金旭等,2010)。

3种类型场地温度变化函数分别为:

① 观测场地所在的露天场地温度。该段温度随时间变化,其函数由原始记录温度通过非线性拟合获得,即

$$T(t) = 11.78 - 14.60 \times \sin(2\pi \times t/365.06 + 1.27) \quad (1)$$

其中 T 为温度, t 是时间序号,拟合结果见图2。

② 有篷遮挡的地震遗址的地表温度。因为有篷遮挡,该地区不受阳光照射,但四面透风,该温度变化和相隔30m左右的百叶箱内自计温度计温度一致。本文随机选择以2009年1月、5月两个月的观测温度(细点线)和百叶箱温度(细实线)为例(图3),发现在1月和

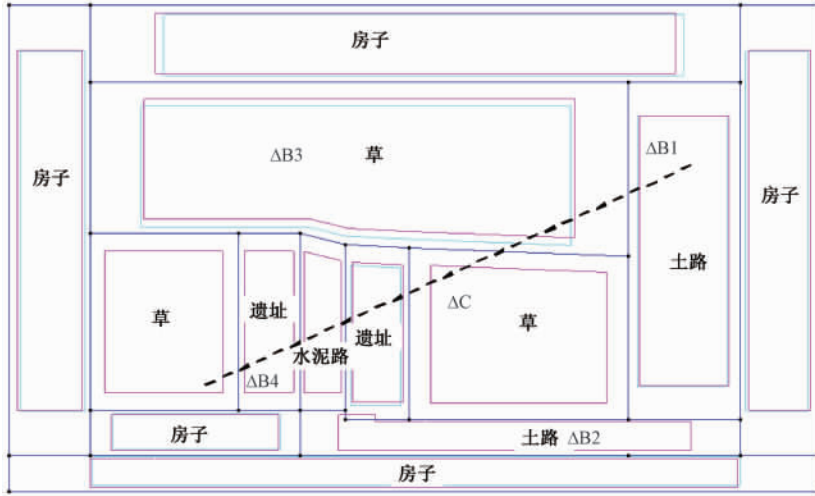


图 1 场地分类平面示意图

三角符号及字母数字 (B1, B2, B3, B4, C) 分别表示短基线桩的位置和编号, 虚线表示断层的位置

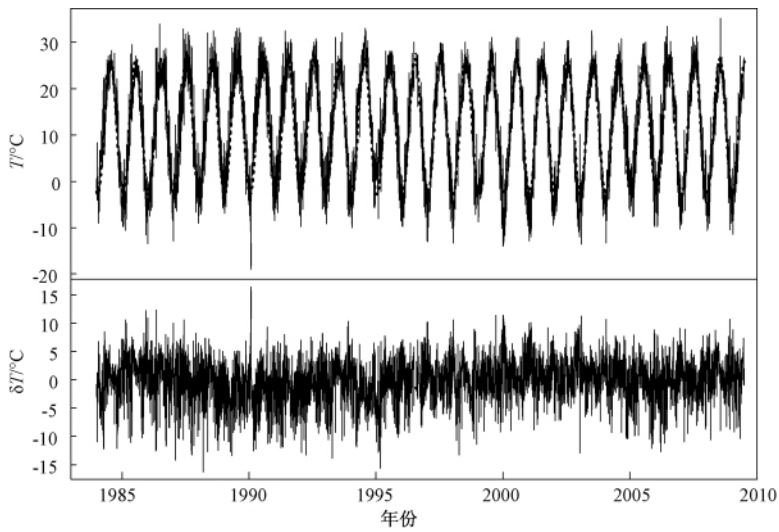


图 2 观测场地所在的露天场地温度时间序列及函数拟合

上图: 实线代表观测值, 点线代表拟合值; 下图: 拟合差

5 月, 两个地区温度的差值时间序列都稳定 (图 3 中间粗虚线), 计算两个序列的均值分别是 4.37 和 4.02, 用 t 检验二者均值是否相等, 得到的 p 值为 0.1083, 即以 95% 的置信度认为二者均值相同。再考虑人工读数带来的误差, 可以认为两个月份的平均温差是相同的。则遗址处的温度函数为

$$T(t) = 7.58 - 14.60 \times \sin(2\pi \times t/365.06 + 1.27) \tag{2}$$

③房屋内的温度。根据日常观测, 室内的温度由于供暖和空调的原因, 变化幅度较小, 其变化函数为

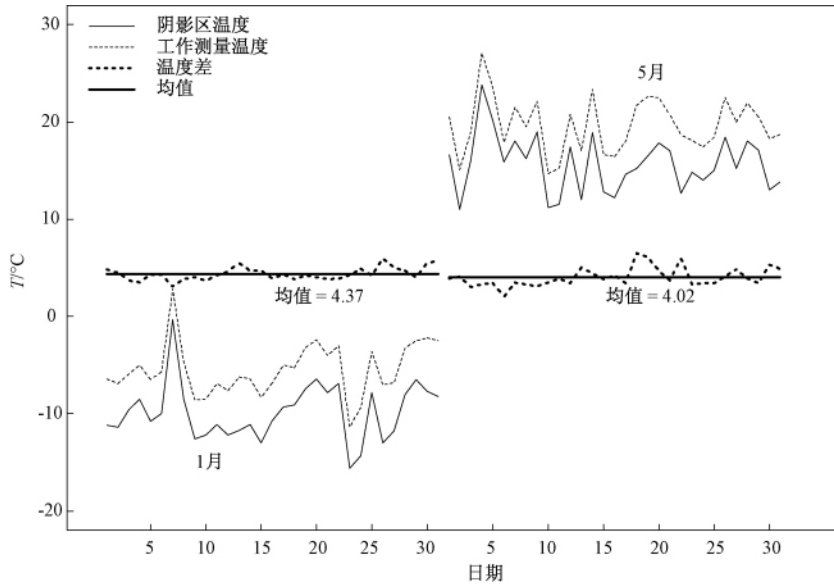


图3 2009年1月、5月场地观测温度和百叶箱内自计温度计相同时间内温度对比分析

$$T(t) = 26 - 3.2 \times \sin(2\pi \times t/365.06 + 1.27) \quad (3)$$

根据场地结构,采用直角坐标系,并假定所研究区域的地下介质是均匀线热弹性体,因此,可以采用如下方程求解温度暂态变化和相应的热应力-应变变化

$$\text{热传导方程} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (4)$$

$$\text{平衡方程} \quad \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad (5)$$

$$\text{本构方程} \quad \sigma_{ij} = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)} e_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{1+v} e_{ij} - \frac{E}{1-2v} \alpha (T - T_0) \quad (6)$$

模型的热边界条件设置为:除地表层温度变化分别采用方程(1)~(3)外,其它边界为绝热边界。模型的力学边界条件为:地表为自由界面,四周侧面边界水平法向位移为0,切向位移自由;底边界为水平位移自由,垂向位移为0。在方程(4)~(6)中, T_0 为参考的初始温度, T 为时间 t 时刻的温度, κ 为热扩散系数, E 为杨氏模量, μ 为泊松比, α 为热膨胀系数。计算中这些系数均采用国际单位制, $\kappa = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $E = 70 \text{ GPa}$, $\mu = 0.25$, $\omega = 2 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 模拟结果与初步分析

2.1 各观测点的温度和位移量

利用有限元的方法对以上模型进行分析,采用四结点单元类型,对观测场地的部分区域进行网格加密,单元数为52479,节点数为258366。单元尺度在观测场地近地表处为0.1m。

首先,采用 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m} \times 0.5\text{m}$ 划分网格,20天的步长,计算时间20年,结果发现在第17年时脱离初始暂态影响而接近稳定的周期性变化。

然后,以粗糙模型的温度为初始条件,采用步长为 1 天,精细计算年变化,以计算 20 年后的结果进行分析。图 4.5 给出了由于台站地表物性差异造成的台站区域在各观测点的温度年变化以及在各观测点产生的位移量。

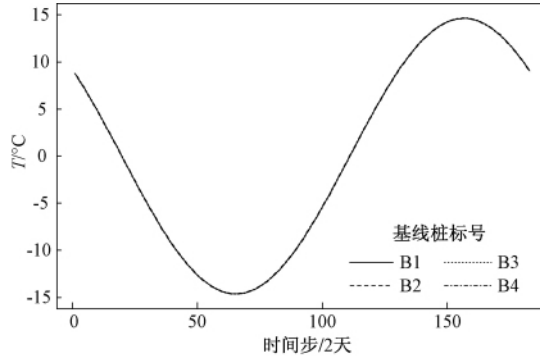


图 4 短基线各桩位置的地表温度变化

B1、B2、B3、B4 分别代表基线 1~4 桩位(下同)

图中 4 条曲线完全重合在一起,是因为预设的 4 个桩的场地条件和起始温度都是一样的。

图 5 分别给出了短基线各桩位的 U (EW 向)、 V (NS 向)和 W (UD 向)位移时间序列,各桩位的水平位移差别较大,最大年变幅度达到 2mm 左右,最小的年变幅度不到 0.1mm,而各桩位的垂向位移差别较小,年变化幅度基本都在 0.6mm 左右。由图 5(a)可见,短基线各桩位的 U 序列趋势分为相反的两类,位于断层西侧的 3、4 号桩为一类,4 号桩的变化幅度比 3 号桩的稍大。位于断层东侧的 1、2 号桩为一类,1 号桩的变化幅度大于 2 号桩。总体来看,靠近断层的两个桩位,1、4 号桩的位移变化幅度大于远离断层的 2、3 号桩两个桩位的 U 位移,而 1、4 号桩的连线测段正是近乎平行断层走向的跨断层测段,即与断层走向夹角很小,约 6° ;而 2、3 号桩的连线测段与断层夹角较大,约 116° 。

由图 5(b)可见,短基线各桩位的 V 序列趋势分为 3 类,即 2、4 号桩为一类,变化幅度基本一致;1 号桩变化幅度最小,基本没有变化;3 号桩变化幅度与 2、4 号桩基本一致,但方向刚好相反。结合桩位的位置,可以发现,1、4 号桩位于断层的上盘,2、4 号桩位于断层的下盘。

从图 5(c)发现短基线各桩位的 W 序列趋势基本一致,与温度变化趋势也基本相同,1、3 号桩位的位移幅度稍大于 2、4 号桩位。

同时,和各桩位点的温度变化序列相比,各桩位的位移变化有不同程度的时间延迟。桩位点的最低温度位于第 65 步,而 1~4 号桩的位移相对极值时间点分别位于 80,73,82,75,即位移变化和温度变化有 16~34 天(每个时间步是 2 天)的时间滞后。

2.2 温度变化造成的各测段距离变化

为了和台站实际测量的各桩之间的距离年变化进行对比,这里做了进一步的计算。

设观测场地内两个观测点 A 和 B,初始坐标分别为 (x, y, z) 和 (x', y', z') ,由模型计算得到的两个点的位移序列分别是 (u, v, w) 和 (u', v', w') ,则两点之间初始距离和距离变化为

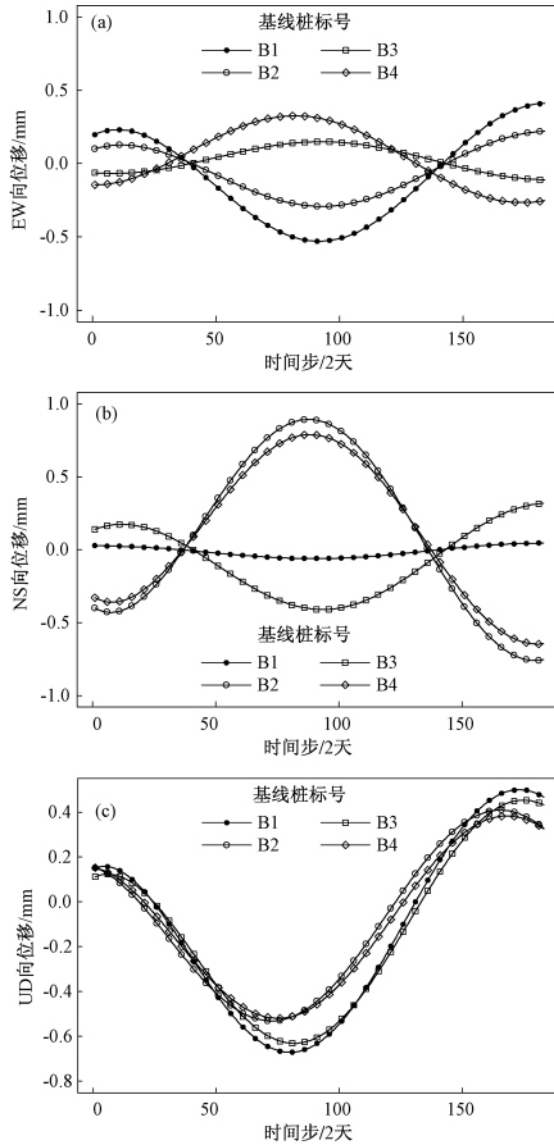


图5 短基线各桩位的位移时间序列

$$\begin{aligned}
 |AB| &= \sqrt{(x' - x)^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \\
 |A'B'| &= \sqrt{(x' + u' - x - u)^2 + (y' + v' - y - v)^2 + (z' + w' - z - w)^2} \quad (7) \\
 \Delta AB &= |A'B'| - |AB| \\
 &= \sqrt{(x' + u' - x - u)^2 + (y' + v' - y - v)^2 + (z' + w' - z - w)^2} \\
 &\quad - \sqrt{(x' - x)^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}
 \end{aligned}$$

台站 4 个桩的点位初始位置依次为 B1 (70.40, 21.74), B2 (66.50, -1.86), B3 (29.10, 30.96), B4 (25.9, 1.0)。为方便比较, 依次计算 B12, B23, B34, B41 等 4 个测段的距离变化

(图 6)。由图 6 可见,在 1 年之内,由于地面温度的差异造成的短基线各桩之间的距离变化还是比较显著的,幅度最大可以超过 2mm,最小的约 1.5mm(基线 1~2 测段)。这表明地表温度的差异已经足以影响到短基线观测的结果。另外,由图 6 还可见,在不同测段温度变化造成的位移变化幅度有若干时间的差异,出现极值变化的时间点略有差异,极值时间点依次在:88,90,90 和 88,即基线 B12 和 B41 测段最先出现变化,然后是 B23 和 B34,其出现的时间基本上是在温度达到最低(时间点:68)之后近 40 天(每步 2 天),即一个半月左右的滞后。同时,根据理论计算的结果也显示,跨断层的位移量(B12, B23, B34, B41)要比断层同侧段的位移(B13, B24)量大。

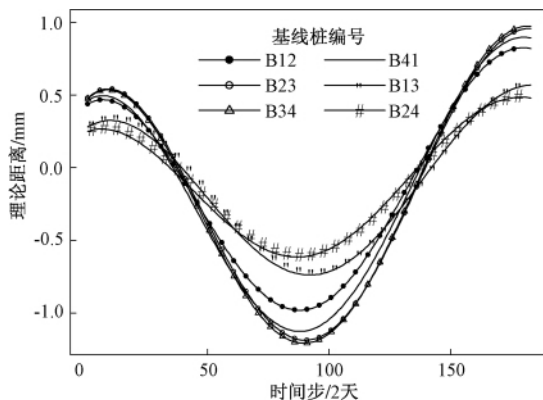


图 6 温度变化造成的短基线各测段距离相对变化结果

3 讨论与结论

本文利用有限元方法,模拟计算了在地表温度变化范围条件下,地表的位移变化及其应变序列。结果表明:

(1) 在同样的气温变化条件下,由于地面物性的差异的存在,不同测量桩点的位移量是有差别的,而且这种位移大小与断层的走向相关,即随着两侧点连线与断层走向夹角逐渐增大,地表温度变化带来的影响也越大。但比较特殊是 B12 测段的结果,其连线几乎与断层走向垂直,但其长度变化却比 B41 测段(与断层走向近乎平行的斜交)还要小,具体原因还有待于进一步分析。初步推断可能与 1、2 号桩位都靠近居民房,且居民房有人活动有关。

(2) 由于室内温度、地震遗址温度和观测场地温度的差异,造成的地面基线桩间相对位移年变化幅度为 2mm 左右,这与目前台站短基线观测的年变化幅度基本相当,温度的变化足以影响台站对场地下方唐山 5 号断层活动特征的研究。因此,需要合适的方法来消除温度带来的巨大影响。

(3) 虽然台站测量场地很小,只有约 24m × 50m,但从模拟结果仍可以发现同样的地面气温变化对形变测量的影响有一个半月左右的滞后。由于模型和实际场地条件的差异,这种滞后的时间尺度有所不同,可能不同测段的滞后时间都不相同,这需要今后深入分析。

(4) 根据模型计算得到的由于温度差异造成的各桩位的热应变数量级在 $10^{-5}/a$,这与 GPS 观测计算得到的唐山地区的应变速率 $10^{-9}/a$ 相差甚远。这可能有两方面的原因:一是

台站目前的观测结果主要是地表温度差异产生的,并未反映台站所在的唐山 5 号断层的运动,但这不能解释台站观测数据的阶段性趋势性变化,这种趋势性变化的动力学来源不是在唐山的局部区域,而是可能和周边地区的大地震孕育相关(黄建平等,2011);二是 GPS 观测计算得到的是整个唐山地区面上的平均结果,但在紧靠断层的短距离范围内可能会存在着较大的应力应变变化,而台站的这种变化可能就的确反映了其所在的 5 号断层的运动特征(谢觉民等,1999)。

(5) 值得注意的是,本研究中得到的认识还是基于台站场地是横向均匀物理性质的条件,仅考虑了地表气温变化造成的应变数量。如果能够获取更多的资料(院子、屋内、道路、观测墩、地下物质和地表温度变化的详细热物理性质资料)支持,在模型中考虑侧边界对垂直向位移的限制以及断层的活动作用,得到的应变变化会比本研究中的结果更大。

(6) 笔者试图用模拟计算的结果与实际观测相比较,但最为困难的是地表不同部位的年度变化虽然有典型的资料,但并没有各个点的详实的观测资料。因此,目前只能大致分为 3 类。对地下热性质横向不均匀性也没有测量资料。因此,目前的结果在数量级上可以与实测比较,但难以确切对比。另外,实际观测的时间序列带有趋势特征,而且不同测段的趋势特征在不同时期均有差异,这在笔者其他文章中已有论述。因此,很难选择哪一段实际观测来与模拟结果进行比较。

致谢: 本文是第一作者在中国科学院研究生院计算与地球动力学实验室攻读博士学位期间的部分研究成果,在此对给予帮助的张怀老师和陈石等同学表示感谢。

参考文献

- 曹建玲、石耀霖, 2005, 地表温度年变化对地应力和地倾斜的影响, 中国科学院研究生院学报, **22**(3), 303 ~ 308。
- 黄建平、石耀霖、李文静, 2010, 从跨断层短基线观测计算地应变的方法探讨——以唐山台地形变数据为例, 地球物理学报, **53**(5), 1118 ~ 1126。
- 黄建平、李文静, 2011, 唐山台短水准、短基线数据分段特征, 地震, **31**(2), 50 ~ 58。
- 胡卫建、张俊山、谢智等, 2002, 荷载对钻孔应变测值影响的实验及力学解析, 地震, **22**(3), 95 ~ 104。
- 金旭、陈晓冬、管彦武, 2004, 气候变化对浅层地温测量影响的改正, 地球学报, **25**(5), 579 ~ 582。
- 李延兴、徐杰、陈聚忠等, 2006, 邢台、渤海、海城和唐山大地震震中区现今应变场的基本特征, 华北地震科学, **24**(2), 36 ~ 39。
- 刘权威, 1996, 地壳形变干扰因素有效性的判别, 测绘学报, **25**(2), 95 ~ 103。
- 卢良玉、徐心同、马秉圭, 1990, 金县台短水准干扰因素的剖析及海城地震前形变异常可靠性的研究, 见: 国家地震局科技监测司, 地震监测与预报方法清理成果汇编——大地形变分册, 86 ~ 92, 北京: 地震出版社。
- 孙玉军、李杰、曹建玲等, 2008a, 深部洞室中微小温度年度变化足以造成地应变年度变化, 地震学报, **30**(5), 464 ~ 473。
- 孙玉军、李杰、曹建玲等, 2008b, 山东泰安台温度年变化对地应变与地倾斜影响的模拟研究, 见: 中国地震局地震预测研究所等, 中国地震预报探索, 460 ~ 466, 北京: 地震出版社。
- 王若柏、谢觉民、薄万举, 2000, 跨断层的定点地壳形变研究及发展前景, 国际地震动态, (6), 5 ~ 9。
- 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**(1), 31 ~ 38。
- 谢觉民、华彩虹, 1999, 唐山地震震断层动态及其与较强晚期余震的关系, 地震地质, **21**(1), 18 ~ 20。
- 游丽兰、刘大杰、黄加纳等, 1992, 跨断层测量资料的卡尔曼滤波数学模型, 中国地震, **8**(3), 44 ~ 52。
- 朱守彪、张培震、石耀霖, 2010, 华北盆地强震孕育的动力学机制研究, 地球物理学报, **53**(6), 1409 ~ 1417。
- 张晁军、石耀霖、马丽, 2005, 慢地震研究中的一些问题, 中国科学院研究生院学报, **22**(3), 258 ~ 269。

- Garavaglia M, Moro G D, Zadro M, 2000, Radon and tilt measurements in a seismic area: Temperature effects, *Phys Chem Earth*, **25** (3), 233 ~ 237.
- Matsumoto N, Kitagawa G, Roeloffs E A, 2003a, Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan-I, Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses, *Geophy J Int*, **155**, 885 ~ 898.
- Matsumoto N, Roeloffs E A, 2003b, Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan-II, Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties, *Geophy J Int*, **155**, 899 ~ 913.
- Moro G D, Zadro M, 1998, Subsurface deformations induced by rainfall and atmospheric pressure: Tilt strain measurements in the Italy seismic area, *Earth Planet Sci Lett*, **164** (1), 193 ~ 203.
- Zadro M, Plenizio E, Ebblin C, et al, 1987, Influence of groundwater table level variations and of rainfall on tilting in the Friuli area, Italy, *Acta Geophysica Polonica*, **35**, 323 ~ 338.

Effect of air temperature variation on the cross-fault deformation observations at the Tangshan seismic station

Huang Jianping^{1, 2)} Shi Yaolin²⁾ Sun Yujun³⁾ Li Wenjing⁴⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) Lab of Computational Geodynamics, Graduate University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100039, China

3) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

4) Tangshan Deformation Station of the First Crust Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tangshan 063001, China

Abstract The finite element method (FEM) of 3D linear elastic model has been used to calculate the effect of ground temperature variation with different amplitudes to the baseline observation in and around Tangshan seismic station. And the strain induced from the ground temperature variations was also estimated. The results show that the yearly amplitude of the displacement among bench marks induced by the temperature variation can be up to 2mm or so, which is almost the same as that of the yearly variation of the data observed at the station. This means that the effect of the temperature is included in the data. What's more, the displacements among 4 bench marks and their strain serials are delayed about 1 or 1.5 months compared with the temperature changes. At the same time, there are synchronous trend changes in the 4 segments, which cannot be explained from the temperature variation and may be connected with the strain adjustment and/or fault movements.

Key words: Finite element method (FEM) Temperature variation Tangshan seismic station Cross-fault observation