

朱航, 苏琴, 杨涛, 闻学泽, 王双绪. 2010. 耿达短水准观测资料在汶川  $M_s8.0$  地震前后异常的辨别. 地震学报, 32(6): 649-658.

Zhu Hang, Su Qin, Yang Tao, Wen Xueze, Wang Shuangxu. 2010. Identifying anomalous change of short-line leveling on Gengda site pre- and after  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 32(6): 649-658.

## 耿达短水准观测资料在汶川 $M_s8.0$ 地震前后异常的辨别\*

朱 航<sup>1),\*</sup> 苏 琴<sup>1)</sup> 杨 涛<sup>2)</sup> 闻学泽<sup>3,1)</sup> 王双绪<sup>4)</sup>

1) 中国成都 610041 四川省地震局

2) 中国成都 610031 西南交通大学土木工程学院

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

4) 中国西安 710054 中国地震局第二监测中心

**摘要** 耿达短水准 AB 测线观测资料 2006—2007 年出现了累计 4.59 mm 的张性变化, 但同时段该场地 A 点附近进行建筑施工, 这引起了该变化是否属于汶川地震前兆异常的争论. 通过对耿达短水准场地现场地质和观测环境考察, 在综合分析观测资料和场地内建筑施工有关信息的基础上, 使用岩土力学分析程序计算施工对 A 点点位的影响的数值解. 结果显示, 建筑施工导致了约 3.6 mm 的竖向沉降, 这与同时段短水准观测的 A 点点位的变化幅度相似, 发展趋势一致. 认为耿达短水准 AB 测线测值从 2006—2007 年出现的变化是由于 A 点附近建筑施工影响所致. 本文还对耿达短水准观测的 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s8.0$  地震同震变化进行了分析, 认为 A 点位于很厚的洪积扇上, 当汶川地震发生时, 在强烈地震动的作用下, 洪积层内部空隙结构产生崩溃性破坏, 从而形成地表的下沉, 其沉降幅度与类似烈度条件下黄土场地的沉降幅度相当.

**关键词** 汶川地震 龙门山断裂带 耿达短水准场地 前兆异常

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.06.003

中图分类号: P315.72<sup>+3</sup>

文献标识码: A

### Identifying anomalous change of short-line leveling on Gengda site pre- and after $M_s8.0$ Wenchuan earthquake

Zhu Hang<sup>1),\*</sup> Su Qin<sup>1)</sup> Yang Tao<sup>2)</sup> Wen Xueze<sup>3,1)</sup> Wang Shuangxu<sup>4)</sup>

1) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

2) Geotechnical Engineering Department of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

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

4) Second Monitoring Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

**Abstract:** A total of 4.59 mm tensional change appeared in Gengda site fault-cross short-line leveling route AB observational data from 2006 to 2007, but a

\* 基金项目 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2009020904)和公益性行业科研专项经费项目《汶川地震观测环境与震兆信息深入研究》资助.

收稿日期 2009-08-19 收到初稿, 2010-04-12 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: zhuhang1234@163.com

construction project surrounding leveling point A was carried out in the same period. This led an argument on whether the change is a precursory anomaly, or not, of the May 12, 2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake. This paper introduced the field geological and environmental investigations at Gengda leveling site, and then, by using a rock and soil mechanics computation program and analyzing comprehensive observation data and construction information, we numerically calculated point A's vertical displacement possibly induced by the construction. The calculated result shows that a subsidence of about 3.6 mm is caused by the construction progress, and its variation is similar to the leveling data change in range and trend. Therefore, we draw the conclusion that the change of Gengda leveling route AB observational data from 2006 to 2007 is caused by the construction works near point A. We also analyzed the coseismic change of Wenchuan earthquake observed by Gengda leveling. Because point A is located on a very thick proluvial fan, and when the Wenchuan earthquake occurred, the internal gap structure of torrential deposit damaged by strong ground motion, as a result, the ground surface subsided, and its subsidence range is similar to the loess field under the same seismic intensity condition.

**Key words:** Wenchuan earthquake; Longmenshan fault zone; Gengda short-line leveling site; precursory anomaly

## 引言

2008年5月12日发生的汶川  $M_s8.0$  地震,其微观震中(破裂起始点)在龙门山断裂带的中央断裂上.震后野外考察表明,汶川地震破裂了龙门山断裂带的中央断裂中—北段和前山断裂的中段,而后山断裂未发现地表破裂(徐锡伟等,2008).耿达短水准场地位于震中的北西方向约13 km处,跨龙门山断裂带的后山断裂.观测资料显示,相对于2006年1月的测值,从2006年5月—2007年9月出现了累计4.59 mm的变化.如果该变化反映了断层活动,那么断层上盘相对于下盘下降,为张性正断运动.

针对这一变化,四川省地震局测绘工程院曾派人进行现场考察和异常核实,发现自2006年2月以来,耿达场地A点(断层上盘点)附近开始进行居民小区建设,因此水准测值出现的异常变化源自施工对点位的影响,该变化不是地震前兆异常<sup>①</sup>.

汶川地震发生后,牛安福等(2009)认为耿达短水准测值2006—2007年的变化可能受到了观测环境改变影响.但有部分研究者将该变化作为汶川地震的巨大前兆异常(焦青等,2008;薄万举等,2009;周硕愚等,2009),并以此为主要依据之一,推导出板内逆冲型强烈地震孕育发生的“压升冲降”模型,并以此解释了为什么汶川地震是一个以水平压性变形和垂直形变为主孕育的逆冲型地震,而耿达测点观测到显著张性正断活动的原因(薄万举等,2009).

目前,汶川地震前耿达短水准测值变化是否属于地震前兆异常已成为震后科学总结工作的焦点之一,因此有必要对该变化进行全面、科学的研究,得到合理可信的结论.

本研究收集了耿达场地建筑施工的有关信息,在现场地质和观测环境考察的基础上,

<sup>①</sup> 苏琴,段明.2007.耿达短水准场地异常核实报告.四川省地震局测绘工程院.

使用岩土力学数值计算方法计算了场地内建筑施工引起的  $A$  点点位的沉降变化。

## 1 场地与资料介绍

耿达短水准场地位于四川省汶川县耿达乡, 概略经纬度为  $103.3^{\circ}\text{E}$ ,  $31.1^{\circ}\text{N}$ 。场地建于 1983 年 9 月, 由  $A, B, C, D$  四个点组成  $AB$  和  $CD$  两个单独测段,  $AB$  长 440 m,  $CD$  长 520 m, 分别监测近似平行的耿达和七层楼沟断层。1985 年 5 月 6 日开始两测线同时观测。在观测初期, 因通向  $CD$  测线的路被塌方截断而弃测。 $AB$  测线从 1988 年以后每年观测 3 期, 1992 年以后固定为每年的 1, 5, 9 月观测。汶川地震发生前的最后一期观测资料为 2008 年 1 月, 后因公路损毁严重, 直至 2009 年 3 月又观测了一期。

根据点位志记载,  $AB$  测线跨龙门山断裂带后山断裂的南延部分, 即耿达断层。断层产状为走向  $N30^{\circ}\text{E}$ , 倾向  $NW$ , 倾角  $70^{\circ}-80^{\circ}$ 。两盘均为志留系茂县群(sm<sub>x</sub>)的一套绿色、灰绿色绢云母千枚岩夹薄层结晶灰岩和灰白包块状白云岩。沿断层线有黑云母花岗岩( $\gamma_2$ )呈透镜状出露是其最大标志。 $AB$  测线的  $A$  点为土层点, 位于原水电工程处附近一小山包下面, 周围乱石堆砌, 建场时点位低于地面 1 m 左右;  $B$  点位于一陡崖下面基岩上, 点位稳定。

图 1 是耿达短水准 1985 年 5 月—2008 年 1 月的观测曲线。为了方便与下面计算结果对比分析, 定义曲线下降为张性运动, 即  $A$  点相对于  $B$  点下降。自开始观测至 2006 年 1 月, 耿达短水准的测值变化较小, 年变规律不清晰, 观测曲线在 2 mm 范围内波动(图 1)。

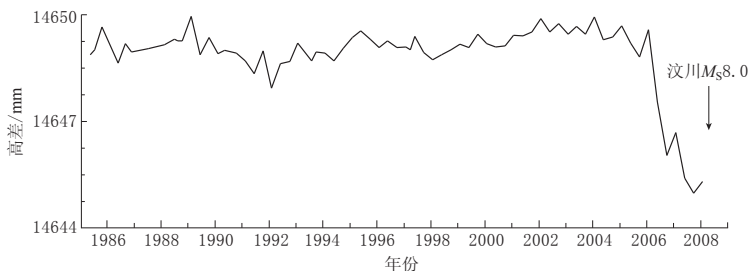


图 1 耿达短水准观测曲线

Fig. 1 The short-line leveling observation at Gengda site

从 2006 年 5 月开始, 观测曲线出现了大幅度张性变化( $A$  点相对于  $B$  点下降), 累计变化量为 4.59 mm, 这是观测以来的最大幅度变化。震后于 2009 年 3 月 18 日观测了一期, 进入场地后发现该场地并未被破坏, 但观测资料显示出现了 241.9 mm 的张性变化。

## 2 现场考察及建筑施工情况

### 2.1 地质与观测环境考察

现场地质考察认为, 耿达短水准场地  $AB$  测线并未跨过龙门山断裂带后山断裂的主断裂, 而是跨过其二级断裂。该断裂的活动水平较弱。

耿达短水准场地的  $B$  点位于映秀—日隆公路旁的一处出露的基岩上, 点位稳定;  $A$  点位于渔子溪东岸的第四系全新统洪积扇上,  $A$  点附近原为退耕还竹的荒地, 局部为农舍, 地势起伏较大, 总体呈斜坡状, 北高南低, 平均坡度为  $7.3^{\circ}$ 。

在观测场地内, 最明显的环境变化是  $A$  点附近建成了一个办公及住宿区(图 2), 小区

的业主是四川卧龙巴蜀龙潭水电有限责任公司，设计单位是四川省轻工业研究设计院. 小区占地  $21\times 667\text{ m}^2$ ，共有 3 层建筑 7 栋，两层建筑 1 栋. 汶川地震未对该小区房屋造成结构性破坏，目前尚有人居住.

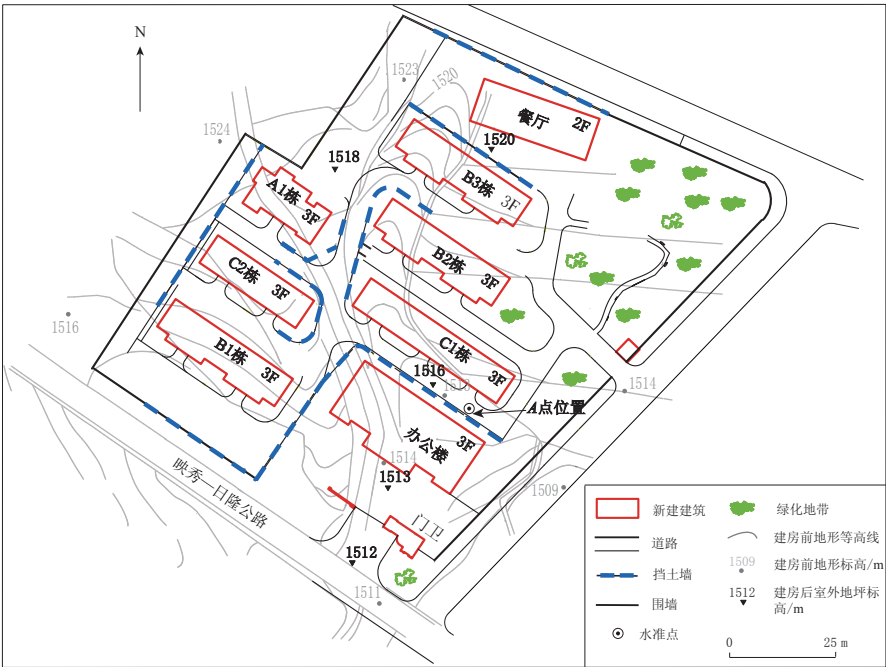


图 2 耿达短水准场地的 A 点与附近环境. 底图由四川省轻工业研究设计院提供  
Fig. 2 Leveling point A of Gengda site and its sorrondings. The base map is provided by Sichuan light industrial research and designing institute

A 点位于办公楼与 C1 栋住宿楼之间，其南西侧为高 3 m 的挡土墙. 施工前 A 点距地表 0.5 m，后因该处填方，A 点位于目前地表下约 3 m 处. 施工单位在 A 点处修建了一个窖井，井内南西壁上开了一个水平圆孔并穿过挡土墙，使水准观测视线由窗户通过办公楼.

2.2 建筑施工情况

据四川卧龙巴蜀龙潭水电有限责任公司提供的资料，该小区主体建筑工程从 2006 年 3 月 27 日开工，2007 年 11 月 19 日结束，历时约 1 年半. 具体工程进度见表 1.

表 1 四川卧龙巴蜀龙潭水电有限责任公司  
办公及住宿区工程进度

Table 1 Construction project’s work progress of  
Sichuan Bashulongtan Hydropower Co. , Ltd

工程进展项目	开始时间 年-月-日	结束时间 年-月-日
土石开挖	2006-03-27	2006-05-18
重型机械施工	2006-03-27	2006-05-18
地基(包括基脚)	2006-04-27	2006-06-22
第一层	2006-05-18	2006-07-19
第二层	2006-06-08	2006-10-25
第三层	2006-06-17	2006-10-31
楼顶	2006-09-20	2006-11-08
塔吊拆除	2007-03-10	2007-03-12
地面	2006-10-12	2007-11-19

3 A 点点位沉降计算

目前有关耿达短水准测值 2006—2007 年的变化是否属于地震前兆异常争论的关键在

于,该时段 A 点附近修建小区是否会导致 A 点点位下降. 某些分析认为不会造成 A 点点位下降,但没有提出确切的证据(焦青等, 2008; 薄万举等, 2009; 周硕愚等, 2009),也没有进行相关计算. 本文应用岩土工程专用数值计算程序 FLAC<sup>3D</sup>, 使用有限差分方法计算了耿达场地 A 点附近施工与 A 点点位的变化, 从而辨别施工与耿达短水准测值变化之间的关系.

由于 B 点是基岩点, 本研究假设 B 点点位不变, 那么 AB 测线的测值变化即为 A 点点位的变化. 结合耿达短水准 2006—2007 年的共计 6 期测值与表 1 列出的工程进度, 将 A 点点位的变化与工程进度对应情况列于表 2, 对 2006 年 1 月 18 日观测的测值增量归零, 表中负值代表 A 点点位下降.

表 2 A 点点位的测值变化与工程进度对应情况

Table 2 Comparison between observed changes of leveling point A and construction progress

观测日期 年-月-日	测值增量/mm	累积变化量/mm	工程进度
2006-01-18	0	0	施工前
2006-05-20	-2.03	-2.03	挖基脚后修第一层开始
2006-09-19	-1.51	-3.54	第三层完成, 开始修楼顶
2007-01-19	0.64	-2.90	楼顶完成
2007-05-22	-1.27	-4.17	塔吊撤除
2007-09-20	-0.42	-4.59	地面处理基本完成

3.1 计算软件

岩土工程结构的数值解是在满足基本方程(平衡方程、几何方程、本构方程)和边界条件下推算建立的. 由于基本方程和边界条件多以微分方程的形式出现, 因此, 将基本方程近似地改用差分方程(代数方程)表示, 把求解微分方程的问题改换成求解代数方程的问题, 这就是所谓的差分法. 有限差分法的基本思想是把连续的定解区域用有限个离散点构成的网格来代替, 把连续定解区域上的连续变量的函数用在网格上定义的离散变量函数来近似; 求解有限差分方程组就可以得到原问题在离散点上的近似解, 然后再利用插值方法便可以从离散解得到定解问题在整个区域上的近似解. 有限差分法数值计算在岩土工程中得到了广泛的应用(黄润秋, 许强, 1995; 谢和平等, 1999; 寇晓东等, 2001; 徐强等, 2002; 杨涛等, 2004, 2006).

本研究采用美国 Itasca Consulting Group 开发的三维快速拉格朗日分析( fast Lagran-sian analysis of continua)有限差分计算程序 FLAC<sup>3D</sup>. 该程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为, 特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形. 它主要有如下一些特点(Itasca Consulting Group, Inc, 2002):

1) 应用范围广泛, 可以模拟复杂的岩土工程或力学问题. FLAC<sup>3D</sup> 包含了 10 种弹塑性材料本构模型, 有静力、动力、蠕变、渗流、温度 5 种计算模式, 各种模式间可以互相耦合, 以模拟各种复杂的工程力学行为. FLAC<sup>3D</sup> 可以模拟多种结构形式, 如岩体、土体或其它材料实体, 梁、锚元、桩、壳以及人工结构如支护、衬砌、锚索、岩栓、土工织物、摩擦桩、板桩等. 另外, FLAC<sup>3D</sup> 设有界面单元, 可以模拟节理、断层或虚拟的物理边界等.

2) FLAC<sup>3D</sup> 具有强大的内嵌程序语言 FISH, 使得用户可以定义新的变量或函数, 以适应用户的特殊需要. 例如, 利用 FISH, 用户自己设计 FLAC<sup>3D</sup> 内部没有的特殊单元形态;

用户可以在数值试验中进行伺服控制；可以指定特殊的边界条件，自动进行参数分析；可以获得计算过程中节点、单元参数，如坐标、位移、速度、材料参数、应力、应变、不平衡力等.

3.2 计算模型

根据四川省轻工业研究设计院提供的卧龙巴蜀龙潭水电有限责任公司办公及住宿区总平面图，并结合现场实测资料，建立了有限差分法计算模型. 为简化计算，仅考虑 A 点附近的办公楼和 C1 栋住宿楼的修建过程对 A 点点位的影响，建立一个二维垂直剖面  $J-J'$ . 该剖面通过这两栋建筑和 A 点， $J-J'$  长度 45.01 m. 计算剖面的地表位置如图 3a 所示.

关于施工场地下方洪积层的厚度，由于在布设水准场地时未挖探槽，所以准确的厚度未知. 但从设计单位了解到，在小区工程设计前曾委托西南石油局地勘总公司第三分公司进行了岩土工程勘察，在工程场地内布了 60 个勘探孔，实际孔深范围为 7.30—10.60 m，均未到达基岩，可判断洪积层厚度大于 10 m；场地地基土均为上部杂填土、耕植土层和下部砂砾石层. 距离  $J'$  处最近的勘探孔的钻探剖面如图 3b 所示，该孔深度为 8.10 m. 通过对周围裸露基岩点高程的测量，可以大致拟合工程区的基岩面埋深，推论得到 A 点位置基岩面在 A 点以下 13.3 m. 假设基岩表面水平，据此得到计算模型中  $J'$  处的洪积层厚度约为 13.5 m；考虑场地地形得到  $J$  处的洪积层厚度 16.9 m. 计算剖面如图 3c 所示，划分的计算网格如图 3d 所示.

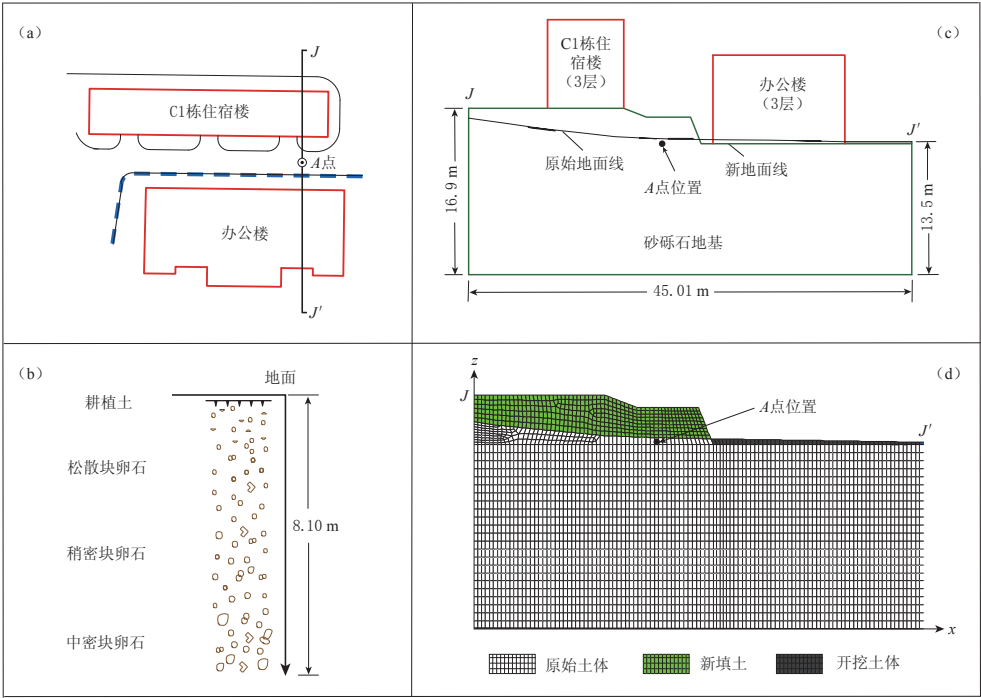


图 3 计算剖面及计算网格

(a) 剖面  $J-J'$  的地表位置；(b)  $J'$  处附近的钻探剖面；(c) 计算剖面  $J-J'$ ；(d)  $J-J'$  计算网格

Fig. 3 Computation cross section and its grids

(a) Surface location of cross section  $J-J'$ ; (b) drill record near  $J'$ ; (c) computation cross section  $J-J'$ ; (d)  $J-J'$  computation grids

3.3 计算工况

根据表 2 所示资料，设计了 3 种计算工况：

工况一. 初始应力状态，对应 2006 年 1 月 18 日工程开始前的状态.

工况二. 平整场地，对应 2006 年 5 月 20 日平场后修楼前的应力状态.

工况三. 楼房施工，对应 2007 年 5 月 22 日楼房修筑完工后一段时间的应力状态.

3.4 基本计算参数及边界条件

现场调查表明，该区地基土为洪坡积砾石土，砾石大小混杂，分选差，空隙内部充填细砂. 由于土层物质成分差别不大，分层界线不明显. 为分析地基土的变形演变规律，可采用综合计算参数. 假定地基土为弹性材料，参考类似工程资料，采用如下经验计算参数(杨涛等，2004)：

弹性模量  $E=150\text{ MPa}$ ，泊松比  $\mu=0.32$ ，重度  $\gamma=19\text{ kN/m}^3$ .

根据计算模型(图 3d)所处的地形和荷载条件，只考虑地基在荷载作用下沉降变形及应力影响深度，故模型边界条件  $x$  向(水平方向)两边取  $x$  方向水平约束， $y$  向(模型平面的法向)取  $y$  方向水平约束；竖向底部为基岩面， $z$  方向(竖直方向)下边界取固定支座约束. 坐标系采用右手螺旋法则.

3.5 计算结果

通过计算，得到了各工况的 A 点沉降曲线(图 4)和建筑工程结束后计算剖面  $J-J'$  的网格位移矢量(图 5).

1) 工况一(初始应力状态). 该工况对应原始应力状态，即 2006 年 1 月 18 日工程开始前的状态，地形为原始地形. 此时赋予岩体以相应的计算参数，计算至初始平衡，通过分析模型的应力状态是否符合实际来判断计算模型是否正确. 该工况假定 A 点的位移为零，为初始变形状态，后续各工况的变形值均是相对于该工况的变形.

2) 工况二(平整场地). 该工况为平整场地后的计算结果，对应 2006 年 5 月 20 日平场后修楼前的状态. 进行了挖填施工，C1 栋住宿楼区为填方工程，办公楼区为挖方工程，平场后的地形为现今地形，如图 3c 所示. 图 4 的前半部分曲线为工况二的竖向沉降计算结果，A 点所在的位置相对于工况一发生了约 2.4 mm 的竖向沉降.

3) 工况三(楼房施工). 该工况模拟平整场地后进行楼宇施工，对应 2006 年 5 月 22 日楼房修筑完工后一段时间的状态. 采用地面加等效荷载的方法模拟楼层施工，按照建筑结构荷载规范(GB50009-2001)，每层楼近似按 15 kPa 的均布荷载模拟，3 层楼房即在建筑场地施加 45 kPa 的均布荷载. 同时，宿舍楼与办公楼间的道路为施工机械进出的交通要道，按路面 15 kPa 的均布荷载考虑施工车辆的影响.

图 4 的后半部分曲线为工况三的 A 点竖

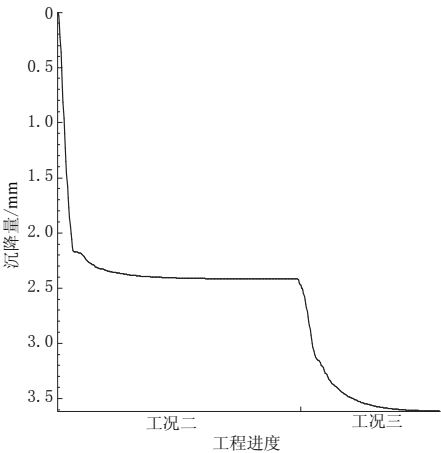


图 4 A 点沉降计算结果曲线

Fig. 4 Computation result of leveling point A's subsidence



向沉降计算结果. A 点所在的位置相对于工况一发生了约 3.6 mm 的竖向沉降, 在工况二的沉降水平上继续下沉了约 1.2 mm.

为了更直观地观察场地的变形特性, 图 5 显示了计算剖面  $J-J'$  的网格位移矢量. 建筑工程结束后, C1 栋住宿楼下的浅层位置发生的位移最大, 这是由于填方和建房的双重加载所致; 而办公楼下位移相对较小, 因为该处在工况二时挖方, 有一个卸载过程.

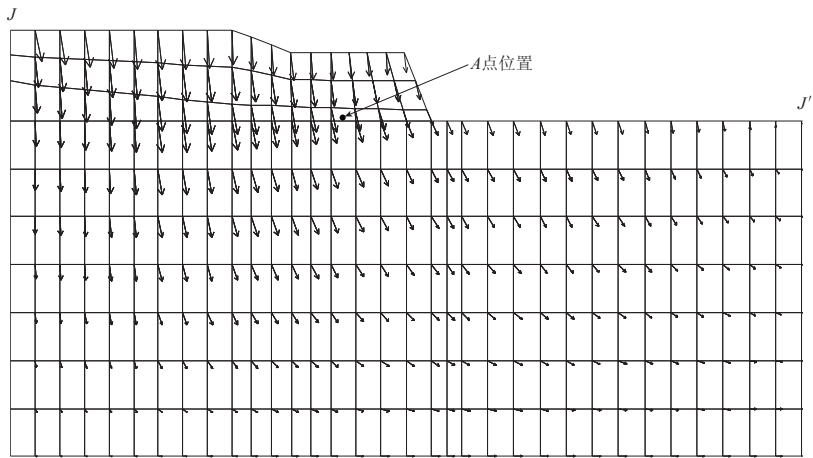


图 5 计算剖面  $J-J'$  的网格位移矢量

Fig. 5 Computed grid displacement vectors of cross section  $J-J'$

3.6 建筑施工与耿达短水准测值变化关系分析

对比 A 点附近建筑施工导致的 A 点在各工况沉降的计算曲线(图 4)与同时段短水准观测的 A 点点位的变化(表 2), 可见在工况二结束时, A 点沉降计算值约为 2.4 mm. 实际观测值显示 A 点下降了 2.03 mm, 二者非常接近. 工况三结束后, 由于楼宇施工加载, A 点沉降计算值显示继续下降约 1.2 mm, 而同期实际观测值显示 A 点继续下降了 2.56 mm.

在整个施工过程中, 短水准实际观测曲线与因施工导致沉降的计算曲线的发展趋势是一致的, 均表现为 A 点的沉降. 二者的量值存在较小的差异, 主要来源于计算模型的简化. 首先我们假定地基土为弹性材料, 但是当应力超过其弹性极限后, 变形增加较快, 此时除了产生弹性变形外, 还将产生部分不可恢复的塑性变形, 计算中没有考虑这个因素; 其次仅计算了两栋楼房下方的剖面, 没有考虑其它楼房修建的影响. 另外, 一些工程作业也无法加入计算, 如 A 点处填方后的夯实. 因此, 实测值应该大于计算值. 2007 年 1 月的测值显示 A 点点位上升 0.64 mm(表 2). 经了解当时已近春节, 工程处于停工状态, 工程车辆撤出引起的减载效应可能导致 A 点卸荷回弹. 另外自 2004 年以来, 每年的 1 月 A 点点位均上升, 因此 2007 年 1 月的上升变化也符合年变规律(图 1).

综上可以认为, 耿达短水准 AB 测线测值从 2006 年 5 月—2007 年 9 月出现的变化, 是由于 A 点附近建筑施工影响所致.

4 A 点点位的同震沉降

2008 年 5 月 12 日汶川地震发生后, 由于路况原因耿达场地短水准未及时进行观测,



直至 2009 年 3 月 18 日观测了一期, 结果显示相对于 2008 年 1 月的测值出现了 241.9 mm 的张性变化, 即 A 点继续相对于 B 点下降。

我们认为这主要是汶川地震的同震变化。震后野外考察表明, 龙门山断裂带后山断裂未发现地表破裂(徐锡伟等, 2008), 因此耿达短水准出现的巨大同震变化不应是后山断裂破裂的结果。另外, 汶川地震在龙门山断裂带的中央断裂和前山断裂造成的地表破裂均为压性逆冲, 与耿达场地短水准观测结果相反, 因此耿达短水准观测到的张性同震变化是由其它原因导致的。

由于耿达短水准场地的 A 点位于很厚的洪积层上, 洪积物含水率较高而强度较低, 在强烈的地震动载荷作用下容易产生破裂、滑移和液化, 出现地震沉陷。耿达场地距离汶川 8.0 级地震震中约 13 km, 在Ⅷ度烈度区内。

对于黄土场地震陷现象已发表了大量的研究成果。王兰民等(2008)通过现场爆破试验, 对地震动诱发条件下黄土地震陷的监测结果进行了模拟, 分析了爆破模拟地震动导致的黄土地震陷的分布、发展特征及其影响因素。王峻等(1997)根据黄土震陷试验分析计算预测方法对黄土地震陷量的预测研究也表明, 非饱和黄土在遭受Ⅷ度烈度地震作用时震陷量可达数十厘米。张冬丽等(2002)将有限元方法应用于黄土地基的震陷量预测, 定量地研究了黄土地基地震沉陷特性与场地条件、基础形式、土动力特性等因素的相关关系。计算结果表明, 原状非饱和黄土地基在Ⅷ度烈度地震动作用下, 土层深度为 15 m 时, 最大震陷量可以达到 19.7 cm。

为了研究耿达场地的震陷现象, 我们使用另外一个实际震例进行类比, 即 1995 年 7 月 22 日甘肃永登 5.8 级地震, 其极震区地震烈度为Ⅷ度, 极震区黄土沉陷达 20—40 cm(王峻等, 2005)。与黄土相比, 洪积物的含水率更高, 结构更为疏松, 所以强度较低。可以认为, 当汶川地震发生时, 在强烈地震动的作用下, 耿达场地所处的洪积扇内部空隙结构产生崩溃性破坏, 从而形成地表的下沉; A 点点位沉降 24.2 cm, 代表洪积扇的整体沉降水平, 这与类似烈度条件下黄土场地的沉降幅度相当。

## 5 讨论与结论

通过对耿达短水准场现场地质和观测环境考察, 在综合分析观测资料和场地内建筑施工的有关信息的基础上, 使用岩土力学分析程序计算了场地内施工对 A 点点位的影响的数值解。结果显示, 建筑施工导致了约 3.6 mm 的竖向沉降, 这与同时段短水准观测的 A 点点位的变化幅度相似, 发展趋势一致。因此认为耿达短水准 AB 测线测值从 2006 年 5 月—2007 年 9 月出现的变化, 是由于 A 点附近建筑施工影响所致。

本文还对耿达短水准观测的汶川地震同震变化进行了分析, 认为 A 点位于很厚的洪积扇上, 当汶川地震发生时, 在强烈地震动的作用下, 洪积层内部空隙结构产生崩溃性破坏, 从而形成地表的下沉, 其沉降幅度与类似烈度条件下黄土场地的沉降幅度相当。

汶川地震震后科学总结工作应该建立在对观测资料科学分析和对观测异常严格论证的基础之上。如果从前兆异常的辨识出现错误, 将会影响我们对震前构造运动, 乃至地震孕育和发生机理等方面的认识。通过本文的实例可以看出, 在土层中布设水准观测点是造成耿达短水准测值变化是否属于汶川地震前兆异常争论的关键因素。目前和今后一段时间, 我国处于基本建设的高速发展阶段, 可能在一些观测场地内进行建筑施工, 而土层点抗干

扰的能力弱,一旦出现干扰将给观测资料的分析带来困难.因此,采用基岩观测点是十分必要的.

感谢王兰民研究员对本文初稿提出的宝贵意见和建议.

### 参 考 文 献

- 薄万举,杨国华,张风霜. 2009. 汶川  $M_s8.0$  地震孕震机理的形变证据与模型推演[J]. 地震, **29**(1): 85-91.
- 黄润秋,许强. 1995. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, **14**(4): 346-354.
- 焦青,杨选辉,许丽卿,王博. 2008. 汶川 8.0 级地震前后龙门山断裂活动特征浅析[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(4): 7-11.
- 寇晓东,周维垣,杨若琼. 2001. FLAC<sup>3D</sup>进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, **20**(1): 6-10.
- 牛安福,张凌空,闫伟,贾晓东,李晓帆. 2009. 汶川地震前南北地震带中北段地形变化特征的研究[J]. 地震, **29**(1): 100-107.
- 王峻,王兰民,李兰. 1997. 黄土地震陷量的试验预测[J]. 西北地震学报, **19**(2): 62-66.
- 王峻,王兰民,李兰. 2005. 永登 5.8 级地震中黄土震陷灾害的探讨[J]. 地震研究, **28**(4): 393-397.
- 王兰民,孙军杰,徐舜华,秋仁东,何丽君,胡明清,吴志坚. 2008. 爆破模拟地震动条件下黄土地震陷研究[J]. 岩石力学与工程学报, **27**(5): 913-921.
- 谢和平,周宏伟,王金安,李隆忠, Kwasniewski M A. 1999. FLAC<sup>3D</sup>在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, **18**(4): 397-401.
- 徐强,严明,黄润秋. 2002. 某水电站左岸深裂缝对工程荷下边坡稳定性影响的 FLAC<sup>3D</sup>分析[J]. 地质灾害与环境保护, **13**(1): 81-84.
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,马保起,陈杰,周荣军,何宏林,田勤俭,何玉林,王志才,孙昭民,冯希杰,于贵华,陈立春,陈桂华,于慎鄂,冉勇康,李细光,李陈侠,安艳芬. 2008. 汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, **30**(3): 597-629.
- 杨涛,周德培,周应华. 2004. 用 FLAC<sup>3D</sup>分析高边坡的开挖病害[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社: 723-726.
- 杨涛,周德培,苏金蓉. 2006. 大变形有限元法分析边坡稳定性[J]. 山地学报, **24**(1): 101-104.
- 张冬丽,王兰民,王玉华. 2002. 有限元分析方法在黄土地震陷预测中的应用[J]. 西北地震学报, **24**(3): 208-214.
- 周硕愚,吴云,施顺英,陈志遥. 2009. 汶川 8.0 级地震前断层形变异常及与其它大震的比较[J]. 地震学报, **31**(2): 140-151.
- Itasca Consulting Group, Inc. 2002. *FLAC<sup>3D</sup>, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension, Version 2.1, User's Manual*[M]. USA: Itasca Consulting Group, Inc.