

龚丽文, 邓志辉, 陈丽娟, 严兴, 郭卫英. 2019. 基于台址构造环境的有限元建模分析——以黔江台为例. 地震学报, 41(1): 80–91. doi: [10.11939/jass.20170133](https://doi.org/10.11939/jass.20170133).

Gong L W, Deng Z H, Chen L J, Yan X, Guo W Y. 2019. Analyses of finite element model based on station's tectonic environment: Taking Qianjiang station for example. *Acta Seismologica Sinica*, 41(1): 80–91. doi: [10.11939/jass.20170133](https://doi.org/10.11939/jass.20170133).

基于台址构造环境的有限元建模分析 ——以黔江台为例^{*}

龚丽文^{1),†} 邓志辉²⁾ 陈丽娟¹⁾ 严 兴²⁾ 郭卫英¹⁾

1) 中国重庆 401147 重庆市地震局

2) 中国广州 510070 广东省地震局

摘要 为更好地应用形变观测数据、挖掘观测数据的物理含义, 本文以黔江台为例, 基于台址资料建立有限元模型, 并结合仪器工作原理进一步分析观测数据. 黔江台的台址构造环境较复杂, 长期受到 NW 向压力的作用, 发育大量 NE 向断层和褶皱, 这些对该台站的观测数据均会产生一定影响. 关于黔江台形变观测数据的有限元模型分析结果显示, 志留纪页岩在压力作用下发生上隆弯曲变形, 形成背斜, 岩层整体朝 SE 倾斜, 上覆岩层垂向变形大于水平变形, 断层和褶皱轴的倾向影响着应力的传递. 结合黔江台长期形变观测数据分析, 本文认为模型结果合理地解释了压性构造背景下伸缩仪观测结果显示为张性的成因机理, 垂直摆倾斜观测数据的长期趋势与模型结果一致, 也得到了统一的机理解释, 表明台址构造环境的有限元分析, 有助于更好地认识和应用形变观测数据, 可增强对观测数据物理本质的理解.

关键词 台址环境 形变观测 有限元分析 黔江台

doi: 10.11939/jass.20170133 中图分类号: P315.72 文献标识码: A

Analyses of finite element model based on station's tectonic environment: Taking Qianjiang station for example

Gong Liwen^{1),†} Deng Zihui²⁾ Chen Lijuan¹⁾ Yan Xing²⁾ Guo Weiyang¹⁾

1) Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China

2) Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China

Abstract: The site environment is the most direct factor affecting the observation data. In order to better apply the deformation observation data and find out the related physical meaning, this paper built a finite element model based on the deformation data from Qianjiang station, and further analyzed the observation data based on the working principle of the instrument. The tectonic environment of Qianjiang station is complex, a large number of northeast-trending faults and folds were developed due to the long time pressure in northwest direction, which has a certain influence on the observation data. The data analysis results based on the finite element

* 基金项目 2017 年度震情跟踪课题(2017010231)和地震科技星火计划项目(XH17026)共同资助.

收稿日期 2017-12-18 收到初稿, 2018-05-20 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: glw777@126.com



model show that the Silurian shale appears as an uplift bending deformation and forms an anticline under the pressure, the whole rock layer is inclined to the southeast direction, the vertical deformation of the overlying rock is greater than the horizontal deformation, and the tendency of fault and fold-axis has influences on the transmission of stress. According to the long-term observation data from Qianjiang station, the results of the model can reasonably explain the mechanism of the expansion of the telescopic instrument under the structural background of the pressure. Furthermore, the model results are consistent with the long-term trend of the vertical pendulum, which is more in line with the physical meaning of the actual observation, that is, the finite element analysis of the site structure environment will help us to better understand and apply the deformation observation data, and thus explore the actual physical meaning of the observed data.

Key words: station's environment; deformation observation; finite element analysis; Qianjiang station

引言

地形变观测被公认为是目前最有效的地震前兆监测手段之一,自1966年邢台地震后我国就开始设站进行地形变的连续观测(吴翼麟, 1990; 张国民, 2002),经多期规划调整,目前已发展成多学科、多方法的综合观测,并初步实现了观测的数字网络化(秦家林, 2015)。大量的地形变观测数据被初步用于前兆异常识别和强震地点预测研究(严尊国等, 2000; 江在森, 武艳强, 2012),但随着观测资料的日益丰富及观测数据的长期积累,我们注意到同台同物理量不同仪器的观测数据有较大差异,部分仪器的观测结果与区域构造背景明显不符,给观测数据的物理解释造成了一定困难,同时也影响了前兆异常的可靠性。因此,结合仪器观测原理和台址环境建模作进一步分析,从而深化对观测数据的认识是十分必要的。

地震地质建模的研究由来已久,早在20世纪80年代就开始引用数值模拟方法(England, McKenzie, 1982),特别是将有限元建模方法用于三维非线性多场耦合复杂建模分析,目前已成为主流的建模分析方法之一(Parsons, 2002),在走滑断层活动过程(Xing, Makinouchi, 2002)、地震孕育机理(Xing et al, 2004; 邓志辉等, 2011)、滑坡形成机制(申通等, 2014)、构造应力与历史地震(祝爱玉等, 2015)、活动地块地壳形变差异(唐方头等, 2003)、介质不均匀性和断层倾角对同震位移场影响(李锋, 黄金水, 2011)的模拟以及地壳运动动力学机制的有限元分析(叶正仁, 王建, 2004)等方面均有很多应用。此外,针对地电台址的介质条件和构造环境也有过初步的数值模拟研究(阮爱国, 赵和云, 1991; 赵和云, 阮爱国, 1992),但基于山体上形变台站的应力环境的数值模拟研究相对缺乏,基底应力场与山体中观测到的应力变化是否一致目前尚存在很大争议。为此,本文拟以黔江仰头山上的形变综合台黔江台为例,结合实际构造地质资料建立有限元模型,分析台址环境对观测数据的影响,以期解释前兆观测结果的真实物理意义。

1 黔江台简介

黔江台地处重庆市黔江区仰头山,海拔1 020 m,属于渝东南武陵山区。武陵山区的地貌受地质拼接控制,以低中山为主,山脉走向多与构造线方向一致,其中仰头山是NE走向山脉的一段,其NW方向有区域内最高的八面山,其SE方向为黔江向斜,地势低洼,阿蓬江贯

穿其中(图 1a). 黔江台位于 NE 向彭水基底断裂与黔江断裂之间, 距台站 4 km 处有第四纪仰头山断层(1856 年小南海 $M6\frac{1}{2}$ 地震即发生在该断层上)通过(图 1b), 而断裂可能影响区域应力场的分布(曹建玲等, 2013).

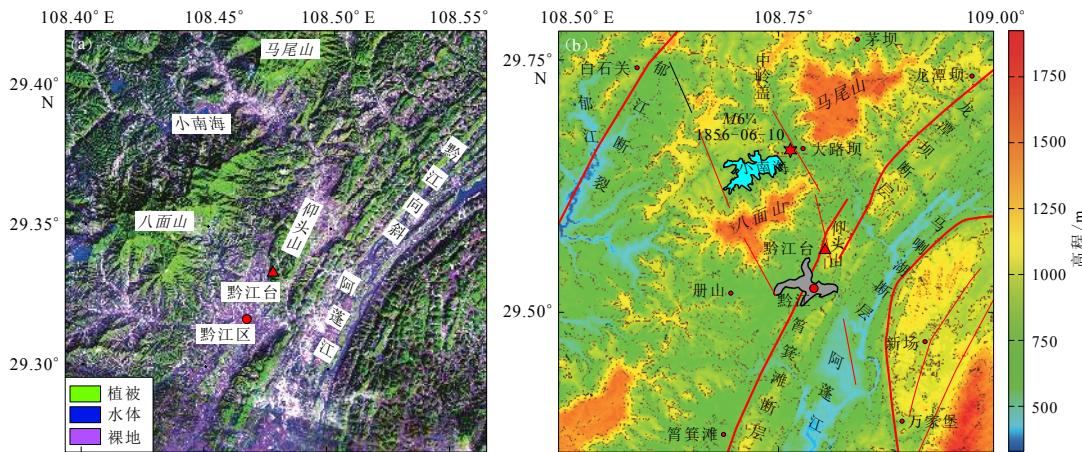


图 1 黔江台地理位置图(a)和构造地貌分布图(b)

Fig. 1 The location of Qianjiang station (a) and its geomorphic distribution (b)

黔江台配置 SS-Y 伸缩仪、DSQ 水管仪和 VS 垂直摆等三套形变仪器, 均安装在同一个观测硐室, 其中水管仪和伸缩仪的基线布设相同, 分别监测该区域的应变和倾斜变化, 每套仪器分南北和东西分量. 三套仪器均能记录到明显的固体潮, 数据连续性较好, 同震记录丰富.

2 黔江台地质环境

黔江台位于上扬子台坳、渝东南断褶隆起区, 区域内 NNE 向褶皱群呈带状分布, 以隔槽式褶皱为主, 背斜轴部发育正断层, 盖层中逆冲推覆构造发育, 断层的新生性较强. 此外, 新生代的山间盆地和断陷盆地也较为发育.

2.1 地层特征

黔江地区新生代以来遭受了比较强烈的剥蚀, 地层出露良好(图 2a), 其中以古生界地层发育最佳, 下古生界发育最全, 分布最广, 上古生界假整合于中志留统之上, 发育较差, 缺失早中泥盆统和早晚石炭统的沉积; 中生界假整合于长兴组之上, 三叠系分布广泛, 中侏罗统与上白垩统之间为角度不整合接触; 新生界第三系和第四系不甚发育, 零星分布, 角度不整合于老地层之上(丁仁杰, 李克昌, 2004).

观测硐室的台基为二叠系栖霞灰岩, 厚约 68 m; 其下为泥盆系泥灰岩夹砂岩, 岩层相对较薄; 基底出露大量志留统泥页岩.

2.2 岩性特征

结合黔江区域的地层分布特征, 该区域出露的岩性主要为砂岩、灰岩和页岩(图 2b), 由于不同岩性的物质成分和结构均不相同, 其物理特性和岩石力学参数具有很大差异(叶金汉等, 1991). ① 砂岩. 岩性较硬, 年代较新, 上白垩统为砂质灰质细砾岩和石英砂岩, 中侏罗统石英粉砂岩和长石砂岩互层, 上三叠统为细至粗粒石英砂岩及岩屑砂岩, 中三叠统上部为白云质、钙质石英砂岩; ② 灰岩. 岩性致密, 岩溶裂隙发

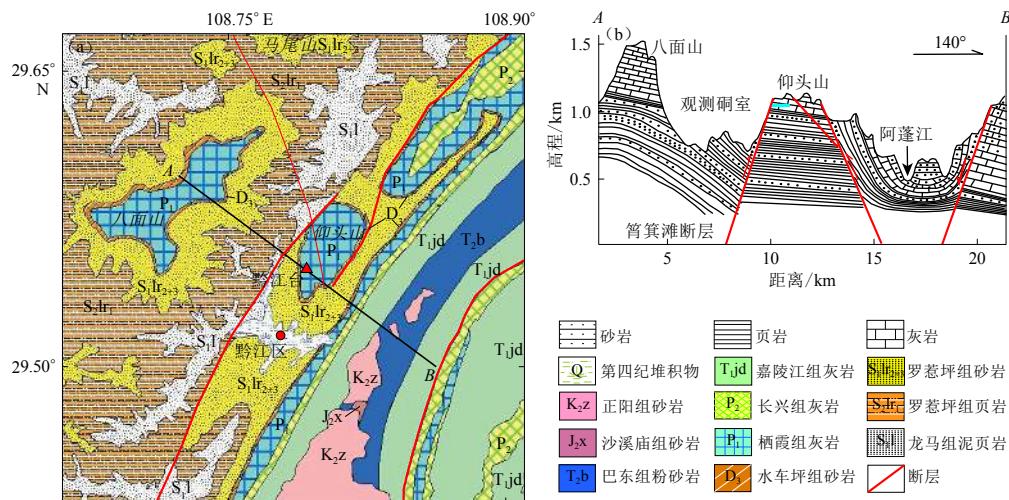


图 2 黔江区域地质图(a)及台站地质剖面图(b)

Fig. 2 The regional geological map (a) and stratigraphic profile (b) in Qianjiang region

育, 中三叠统下部为薄—厚层灰岩、灰质白云岩及白云岩, 下三叠统为中厚—巨厚层白云岩和灰岩互层; 上二叠统为中—厚层含硅质团块和条带灰岩, 下二叠统为中—巨厚层灰岩, 夹硅质层; 上泥盆统上部为泥质灰岩; ③页岩, 岩性较软, 主要为下二叠统梁山组炭质页岩、中志留统罗惹坪组粉砂质页岩和下志留统龙马溪组页岩.

2.3 构造特征

黔江区域的盖层变形以 NE 向构造(NE 向褶皱及其伴生断裂)为主体构造格架, 断层走向和褶皱轴向以 NE 向为主, 相互平行交替排列, 同时存在少数 NNE 和 NNW 向派生构造. 褶皱主要为铜西向斜, 位于黔江台的东南部, 呈 NE 走向, 核部出露白垩系和三叠系新地层, 与邻近的背斜构成箱状褶皱.

黔江地区 NE 向断裂与 NNE 向褶皱伴生形成盖层断裂, 当褶皱完全发育后, 地壳持续缩短进而导致错断, 平行于褶皱轴线发育逆冲断层和逆掩断层, 如黔江断裂, 总体走向为 N40°E, 全长约 140 km, 在平面上由近于平行的 4 条断裂组合形成右阶斜列式结构, 以阶区为界, 黔江断裂分为北、中、南三段, 黔江台位于龙潭坝断裂与筲箕滩断裂(中南段)的交界处; 该断裂剖面上, 破碎带比较发育, 断层岩主要为碎裂岩、角砾岩、方解石脉和断层泥, 为晚更新世活动断层. 与褶皱轴直交发育派生的正断层, 如仰头山断层, 距黔江台约 4 km, 总体走向为 290°—320°, 断续展布约 12 km, 倾向 SW 或 NE, 倾角为 70°—80°, 具有逆滑左行平移性质, 断裂破碎带发育, 由碎裂岩、角砾岩、方解石脉和团块组成, 1856 年该断层上发生重庆辖区最大的小南海 M6.4 地震, 活动性较强(刘玉亮, 2009).

3 黔江台应力环境

重庆地处中国南北构造带的东侧, 属于东、西部板块运动的中间过渡地区. 从前述构造运动、活动断裂、褶皱的形成过程分析, 该区域断褶构造的形成和地壳的缩短、隆升分别与印度板块和太平洋板块碰撞、俯冲所产生的挤压相联系, 反映了印度板块与太平洋板块两侧在挤压动力条件下对区域新生代构造应力场的影响和制约.

丁仁杰和李克昌(2004)通过汇集经绝对年龄测定或有确切证据认定的近 30 条第四纪活

动断层资料, 依据其力学性质和运动方式, 确定其正应力方向, 同时基于现代地震震源机制解的 P 轴轴向, 结合新构造运动形迹(图 3), 综合推断出重庆辖区新生代构造应力场的基本特征。

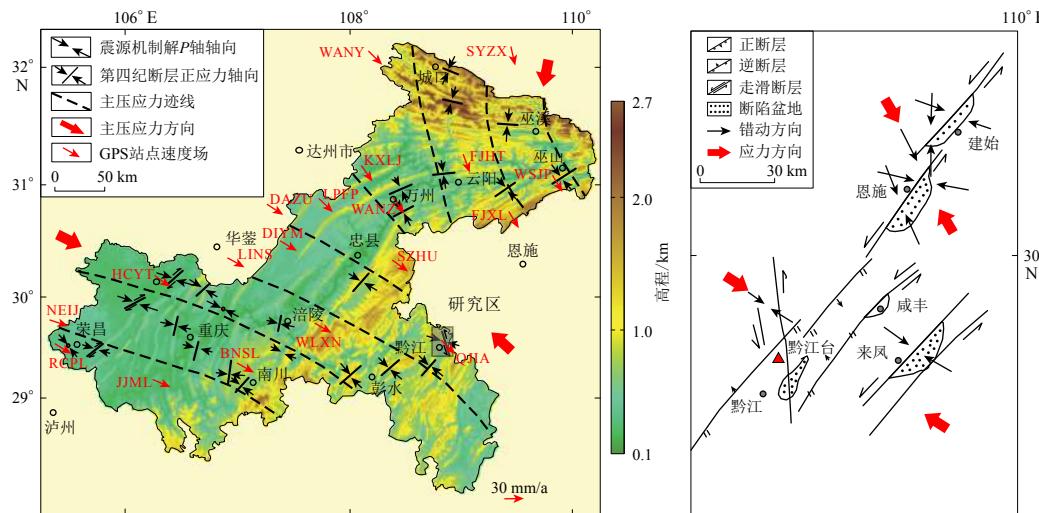


图 3 重庆辖区应力环境及黔江地区应力示意图(改自丁仁杰和李克昌, 2004)

Fig. 3 The stress environment in Chongqing area and the stress distribution in Qianjiang region (modified from Ding and Li, 2004)

3.1 构造应力环境

构造应力分析主要结合重庆辖区第四纪活动构造展布的空间位置、力学性质、运动方向及区域地震的震源机制反演进行。该区域的新构造运动是在 NNE 向倾斜的古地势环境下发展演化而来, 现阶段地壳活化, 持续掀斜抬升运动(李伦炯, 1997); 受 NW 向压应力和深部滑脱层的影响, 该区域发育大量的隔槽式褶皱和逆冲推覆构造, 其轴向多为 NE 向, 垂直于区域应力方向; 而第四纪断层的力学性质表现为 NE 向断层的逆滑(左行)运动; 近 NS 向或 NNE 向断层表现为强烈压性逆冲性质; 反演所得正应力轴向整体为 WNW 方向, 反映该区域的主应力迹线方向为 WNW 向(颜丹平, 汪新文, 2000; 颜丹平等, 2008)。徐纪人等(2008)的中国大陆中强地震的震源机制解表明该区域的 P 轴方位集中在 280° — 290° 和 340° — 350° 的范围内, 而辖区内发生的统景 $M5.2$, $M5.4$ 和荣昌 $M5.2$ 地震, 其震源机制解 P 轴轴向分别为 287.5° 和 320° , 与断层运动所表现出的正应力轴向基本吻合。因此, 渝西-渝东南地区所形成的主应力迹线, 由西向东呈 WNW 向缓缓弯曲转为 NW 向(图 3)。主应力迹线形态与该断褶构造的力学性质基本吻合, 而现代地震震中地震构造的正应力方向与震源主压应力轴向基本一致, 也证明了现代构造应力场对新生代构造应力场的继承性。

3.2 GPS 应力场

结合全球导航卫星系统资料可知, 印度板块以 (37 ± 0.2) mm/a 的平均速度沿 NNE 方向运动(Malaimani *et al*, 2008), 但在北部坚硬地块的阻挡下, 青藏地块发生明显的缩短、隆起并向东部逃逸, 这使得川滇地块向 SE 方向运动(张培震等, 2002), 而辖区 GPS 站点(全球国际地球参考 2008 框架)以大约 30 mm/a 的速度向 SE 方向运动。陈涛等(2013)结合重庆辖区 2008—2012 年 GPS 资料, 应用块体整体旋转线性应变模型获取了该地区的水平形变场和应变

场,结果显示该区域的应变以压应变为主,方向近似NW向,主压应力方向与大范围构造应力场基本一致。[杨淑贤等\(2005\)](#)利用地形变测量、震源机制解和钻孔应力测量等资料,综合分析认为重庆辖区新构造期现代构造应力场的作用方向具有明显的分区性,其中黔江区域的应力主要受到NW向的挤压。综上所述,多种研究结果一致认为研究区域内的应力场以NW向压应力为主,各种应变参数处于 10^{-8} 量级。

4 有限元建模分析

有限元分析是利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,通过有限的相互作用的单元去逼近无限未知量的真实系统,从而将复杂问题简单化并求得近似解。随着科技的不断发展,涌现出大量的有限元分析工具,其中Ansys软件常用于地质工程的应力和结构分析。经过不断更新,Ansys软件的有限元分析功能越来越强大,涵盖结构、静力、动力、流体、电磁及多场耦合等多领域分析。本文选用Ansys16.0中的Workbench模块进行建模分析。

4.1 问题描述与假设条件

自2008年观测以来,黔江台的三套仪器工作正常,积累了丰富的观测资料,经对比分析可知:①在基线布设完全相同的情况下,倾斜类仪器的映震能力远远高于应变类仪器;②两套倾斜仪能记录到明显的固体潮,而应变仪固体潮幅度较小,特别是东西分量几乎记录不到固体潮;③两套倾斜仪的长期趋势不一致,垂直摆观测趋于东南倾,而水管仪观测没有明显的倾斜方向。以上现象除受仪器观测原理影响外,还可能与台址环境有关,因此有必要对其进行建模分析,解释数据差异产生的原因。

由于实际台址环境较复杂,且针对大量的物理量只有定性的研究,为了便于建模分析,本文设定以下假设:①山体模型。因该地区山体、褶皱及断裂均沿NE方向展布,本文以SW向的地质剖面为基准,并沿其法线方向(NE向)拉伸形成的几何体模拟实际的山体模型;②地质条件。因该区域的地质构造条件较复杂,可能存在局部破裂或岩性的不均一性,而该模型是针对山体整体的受力变形,故对岩性和构造要素作简单的均一化处理;③应力环境。因该区域内的应力场以NE向压应力为主,应变大小为 10^{-8} 量级,本文设置的应力载荷为 10^8 量级,方向指向SE向。

4.2 模型建立与分析

4.2.1 几何模型建立

黔江台位于NE向仰头山体内,沿山体两侧均有同方向的断裂和褶皱分布,构造格局较复杂,区域主压应力方向为SE方向([图4a](#))。本文选用与应力方向大致相同的AB剖面图建模分析([图4b](#)),既保留了整个山体的构造框架,又利于简化模型分析结果的显示。

台址的应力状态除受构造要素影响外,还与该区域的岩石力学性质相关,尤其是当岩石力学性质差异较大时,较软的岩石更容易受力变形。正如[图4b](#)所示,该区域出露的岩性主要为志留纪页岩、泥盆纪砂岩及二叠纪灰岩,以及受断裂破碎作用形成的碎裂岩,这几种岩石的成因、成分、结构及岩石力学性质均不相同,因此,本文结合实际地质资料,参考岩石力学参数表([叶金汉等, 1991](#)),设定介质模型的材料参数,列于[表1](#)。

4.2.2 模型分析

1) 网格划分。网格划分的目的是使模型离散化,并利用适当数量的网格单元得到相对精确的解。网格划分的工具有多种,本文选用Workbench中的自动网格划分工具,该工具自

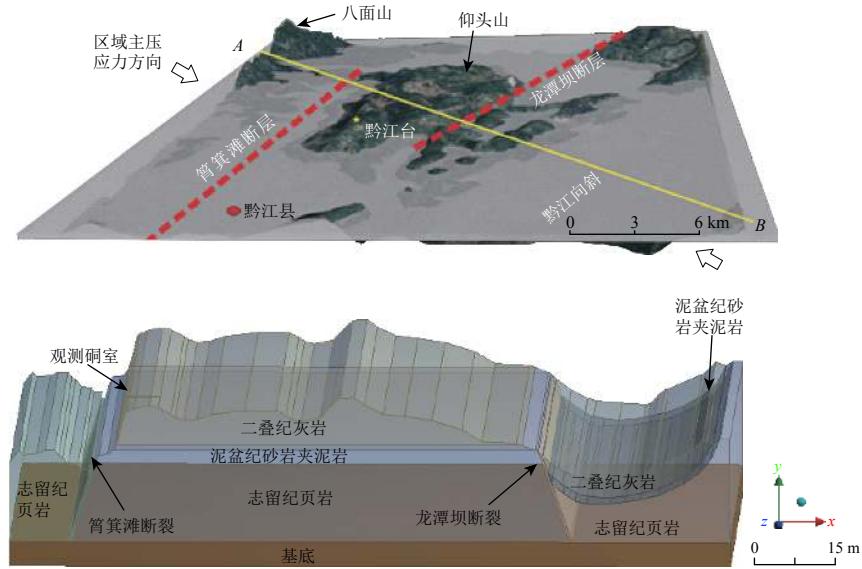


图 4 黔江台址环境(a)和几何建模示意图(b)

Fig. 4 The environment (a) and geometric modeling (b) of Qianjiang station

表 1 模型介质岩石力学参数汇总表

Table 1 The rock mechanics parameters of model medium

岩性	容重/(10^3 kg·m $^{-3}$)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	剪切模量/GPa	体积模量/GPa
灰岩	2.70	96	6.00	0.35	2.22	6.66
砂岩	2.58	75	4.00	0.30	1.54	3.33
页岩	2.49	50	2.66	0.20	1.11	1.48
断层	1.32	20	0.91	0.18	3.88	4.73

动优化网格划分类型, 可满足模型要求。网格的疏密程度直接影响到计算结果的精度, 但是网格加密会增加CPU计算时间, 需要更大的存储空间。为保证模型网格密度和计算质量, 综合考虑计算精度和计算量, 本文选取网格尺寸为1.5 m(几何模型的规模为百米级), 其它参数均采用默认值, 满足模型的需求。

2) 接触关系。当几何体存在多个部件时, 需要确定部件之间的相互关系, 部件的接触关系影响其间的荷载传递方式。Workbench提供多种接触类型, 但由于不同岩层间的摩擦系数和黏合系数很难确定, 且岩层之间不存在滑脱现象, 本文采用直接绑定接触, 符合模型的需求。

3) 边界条件。载荷和约束是Ansys软件求解计算的边界条件, 是以所选单元的自由度形式定义的, 本文主要分析台址环境受力变化特征, 因此载荷主要选择力载荷工具的压力载荷, 方向为SE向, 大小为100 MPa。考虑到垂向上重力与下地壳的支持力处于平衡状态, 模型的基底采用垂向结构约束; 而台址东南侧为华南板块, 比较稳定, 为防止模型移动, 模型的东南端采用固定约束。

4.3 模型结果解释

本模型主要研究在SE向应力的挤压下, 台址山体的等效应力分布特征和变形特征, 其中: 等效应力分布主要反映山体受挤压后的应力传播途径, 而变形特征则显示山体不同部位的变形程度, 包括水平变形和垂向变形。图5给出了有限元模型的分析结果。

等效应力分布结果(图 5a)显示: 在 NW 向应力的挤压下, 区域等效应力的分布受构造要素影响较大, 特别是在断层破裂带, 应力的方向发生明显变化, 远离断层后恢复正常; 当岩层具有明显弯曲褶皱时, 等效应力较集中于向斜轴部岩层弯曲角度较大的地方。

总体变形结果(图 5b)显示: 受挤压后, 山体明显缩短, 越接近力源, 变形幅度越大; 岩性较软的志留纪页岩和断层碎裂岩更容易变形, 而较硬的灰岩和砂岩变形幅度较小, 使得山体变形不均匀, 下部页岩在力的作用下水平缩短, 垂向上增厚, 向上推挤上覆岩层形成上拱的背斜, 这与实际的地貌相符合。此外, 由于岩层之间存在摩擦力和黏附力, 上覆岩层也能记录到部分水平变形(图 5c), 但其变形幅度远小于对应的垂向变形(图 5d), 特别是山体西北部垂向变形最大, 造成山体岩层倾向 SE 方向。

结合总体变形和等效应力结果可知: 黔江仰头山受 SE 方向的挤压, 其变形和应力均集

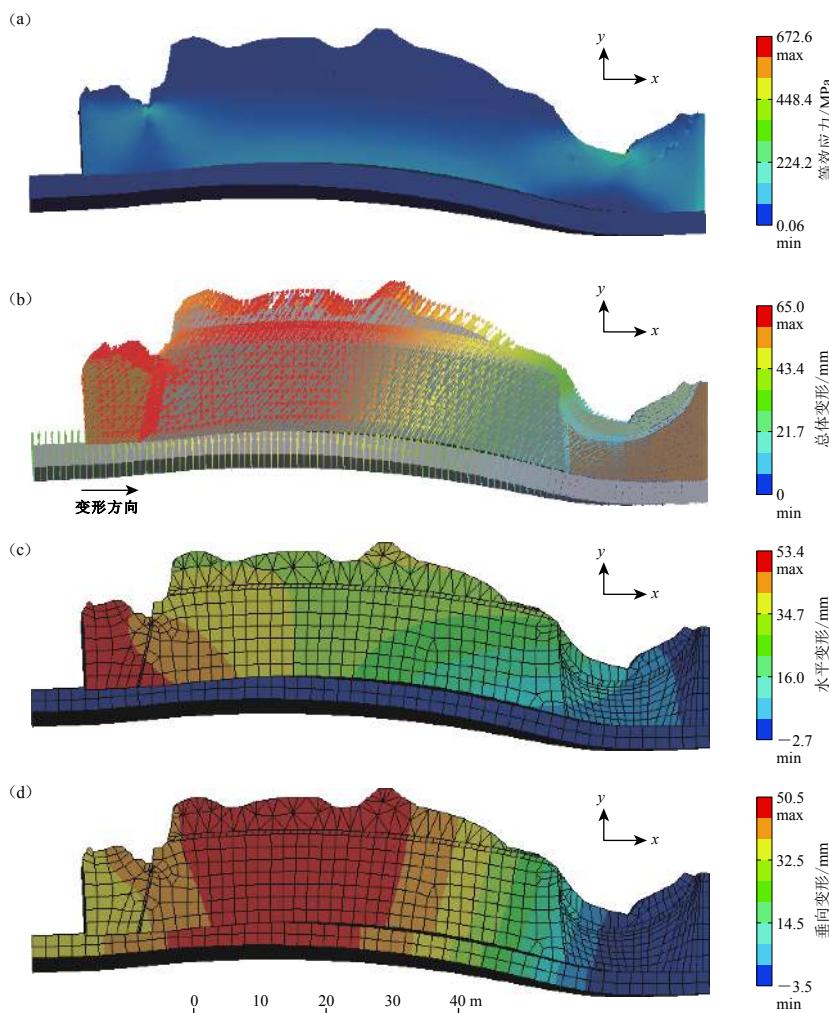


图 5 有限元模型分析结果

(a) 等效应力分布; (b) 总体变形; (c) 水平变形; (d) 垂向变形

Fig. 5 The results of finite element model analyses

(a) Equivalent stress distribution; (b) Total deformation; (c) Horizontal deformation; (d) Vertical deformation

中在山体基底，下部的志留纪页岩发生塑性缩短而向上隆起；上部的二叠纪灰岩受力不再是水平挤压，而是垂向上抬升，使得上覆岩层上拱形成一定弧度，越接近背斜的轴部，其变形越大，对应的上覆岩层弯曲拉张。在上拱的同时，由于岩层自身倾向SE方向，加剧了台站向SE方向倾斜的趋势（图6）。

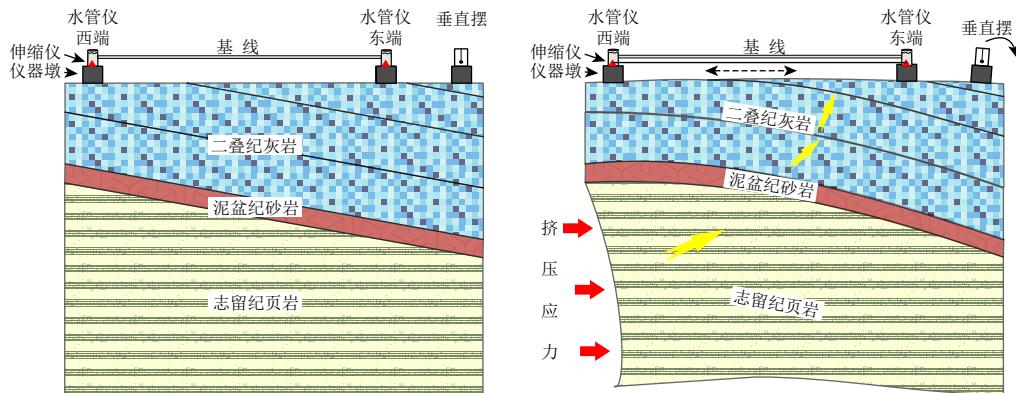


图6 变形前(a)、后(b)形变仪器观测数据的变化模式图

Fig. 6 The change pattern of observation data from deformation instrument before (a) and after (b) deformation

4.4 模型验证

黔江台有倾斜观测和应变观测，前者用于观测地壳垂向上的变形，后者用于观测地壳水平向上的变形。观测仪器均布设在仰头山山腰的硐室内，基岩为二叠纪灰岩，观测时段长达十余年，均能记录到清晰的固体潮和同震形变波，灵敏度和精度较高，观测结果可靠。因此，本文选用该台长期积累的观测资料来检验有限元模型的可靠性。黔江台伸缩仪和垂直摆的东西分量均呈稳定持续上升变化趋势（图7），反映了观测点位的张性变化和东倾变化与模型计算结果一致，即岩层持续上拱，地表弯曲拉张，山体持续向岩层倾向方向倾斜。

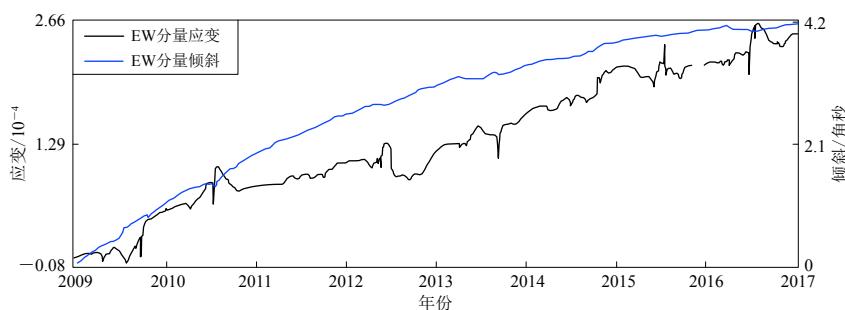


图7 黔江台伸缩仪(EW)和垂直摆(EW)长期趋势变化

Fig. 7 Long-term trends of extensometer (EW) and vertical pendulum (EW) in Qianjiang station

综上所述，黔江台能记录到区域应力场的形变信息，但受岩石力学性质和构造要素的影响，台址的变形与山体基底的变形具有一定的差异性，台站记录到的形变并不能完全反映区域应力变化，而是区域应力与构造条件及岩石力学参数的综合反映。因此，定点形变台站观测到的形变信息并非完全是区域应力场的信息，而是经台址构造环境改变后的信息，这是导致其观测结果与构造应力背景不一致的主要原因。

5 讨论与结论

台站区域范围内的断层、褶皱、岩性及岩层特征是构成台站构造环境的主要因素。由于不同台站具有其独特的台址构造环境, 仪器观测数据差异性较大, 观测数据的物理意义不明确。以往的研究大多是结合数据曲线形态、时频特征、固体潮及同震信息来提取前兆异常, 研判震情形势(即传统的经验预报方法); 而关于数据曲线变化的物理意义及前兆机理方面的研究较少, 这也正是下一步物理预报所急需解决的问题之一。因此, 本文通过地质模型将观测数据与台址环境有机地结合在一起, 探寻数据变化的内在本质。

黔江地区构造较复杂, 岩性变化差异较大, 长期受NW向挤压应力的影响, 使得该区域出现大量的褶皱和断层, 这些构造要素在一定程度上影响着区域应力场的大小和方向。本文对黔江台的台址资料进行全面收集和整理, 并以此为依据建立有限元模型, 分析观测数据不同趋势变化的成因机理, 得到以下结论:

1) 有限元模型分析结果显示: 在NW向压力的作用下, 岩性较软的页岩和断层碎裂岩更容易发生变形, 而上覆的砂岩和灰岩变形较小; 页岩在压力作用下不断塑性缩短, 其上覆岩层上拱形成背斜, 并倾向SE方向, 使得上覆岩层垂向变形大于水平变形; 等效应力的分布受断层及褶皱轴的倾向影响较大, 均与实际地貌相符。此外, 该模型分析结果有助于理解黔江台仪器观测数据的物理意义。

2) 建模结果表明, 受岩石力学性质和断层构造要素影响, 台址的变形与基底的变形存在差异, 台站仪器记录到的形变不完全反映区域应力, 而是区域应力与构造条件及岩石力学参数的综合反映, 基于此对形变观测数据进行分析, 能更好地理解观测数据变化的指示意义。

参 考 文 献

- 曹建玲, 张晶, 王辉, 方颖. 2013. 首都圈现今断层活动方式的数值模拟[J]. 地震, 33(3): 116-123.
- Cao J L, Zhang J, Wang H, Fang Y. 2013. Numerical simulation of fault deformation in the capital region of China[J]. *Earthquake*, 33(3): 116-123 (in Chinese).
- 陈涛, 瞿伟, 王宏超. 2013. 三峡重庆库区现今地壳形变特征分析[J]. 地球物理学进展, 28(4): 1795-1800.
- Chen T, Qu W, Wang H C. 2013. Analysis on characteristics of present-day crustal deformation in Chongqing area of Three Gorges reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 28(4): 1795-1800 (in Chinese).
- 邓志辉, 宋键, 孙君秀, 陶京玲, 胡勤乾, 马晓静, 姜辉, 李红. 2011. 数值模拟方法在地震预测研究中应用的初步探讨(I)[J]. 地震地质, 33(3): 660-669.
- Deng Z H, Song J, Sun J X, Tao J L, Hu M Q, Ma X J, Jiang H, Li H. 2011. Preliminary study on application of numerical simulation methods to earthquake prediction research (I)[J]. *Seismology and Geology*, 33(3): 660-669 (in Chinese).
- 丁仁杰, 李克昌. 2004. 重庆地震研究[M]. 北京: 地震出版社: 68-71.
- Ding R J, Li K C. 2004. *Research of Earthquakes in Chongqing*[M]. Beijing: Seismological Press: 68-71 (in Chinese).
- 江在森, 武艳强. 2012. 地壳形变与强震地点预测问题与认识[J]. 地震, 32(2): 8-21.
- Jiang Z S, Wu Y Q. 2012. Crustal deformation and location forecast of strong earthquakes: Understandings and questions[J]. *Earthquake*, 32(2): 8-21 (in Chinese).
- 李锋, 黄金水. 2011. 介质不均匀性和断层倾角对同震位移场影响的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学, 31(5): 52-60.
- Li F, Huang J S. 2011. Numerical simulation of influences of medium heterogeneity and dip of fault on coseismic displacement[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(5): 52-60 (in Chinese).
- 李伦炯. 1997. 川黔湘毗邻区的新构造运动[J]. 四川地质学报, 17(2): 110-114.
- Li L J. 1997. Neotectonism in the juncture of Sichuan, Guizhou and Hunan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 17(2): 110-114 (in Chinese).

- 刘玉亮. 2009. 重庆黔江地区第四纪构造活动与地震地质研究[D]. 广州: 中山大学: 10–84.
- Liu Y L. 2009. *Study on Quaternary Tectonic Movements and Seismo-Geology in Qianjiang Area of Chongqing Municipality*[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University: 10–84 (in Chinese).
- 秦家林. 2015. 地壳形变测项概论[J]. 防灾减灾学报, 31(1): 22–29.
- Qin J L. 2015. Introduction to observation data of the earth crust deformation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 31(1): 22–29 (in Chinese).
- 阮爱国, 赵和云. 1991. 地台区构造条件的三维有限元数值模拟[J]. 西北地震学报, 13(4): 22–28.
- Ruan A G, Zhao H Y. 1991. Numerical simulation of 3-D finite element method of the structure condition of geoelectrical station[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 13(4): 22–28 (in Chinese).
- 申通, 王运生, 吴龙科. 2014. 重庆小南海滑坡形成机制离散元模拟分析[J]. 岩土力学, 35(增刊2): 667–675.
- Shen T, Wang Y S, Wu L K. 2014. Discrete element simulation analysis of formation mechanism of Xiaonanhai landslide in Chongqing city[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 35(S2): 667–675 (in Chinese).
- 唐方头, 张培震, 邓志辉. 2003. 强震造成的活动地块地壳形变差异探讨[J]. 地震地质, 25(4): 655–663.
- Tang F T, Zhang P Z, Deng Z H. 2003. Difference of crustal deformation in active blocks caused by great-earthquakes[J]. *Seismology and Geology*, 25(4): 655–663 (in Chinese).
- 吴翼麟. 1990. 定点形变前兆预报地震的观测技术与分析方法[J]. 地震, (5): 33–46.
- Wu Y L. 1990. Observatory techniques and data analyses for earthquake prediction by precursors observed at deformation stations[J]. *Earthquake*, (5): 33–46 (in Chinese).
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J]. 地球物理学报, 51(3): 770–781.
- Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y. 2008. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(3): 770–781 (in Chinese).
- 颜丹平, 汪新文. 2000. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析[J]. 现代地质, 14(1): 37–43.
- Yan D P, Wang X W. 2000. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan, Hubei and Hunan[J]. *Geoscience*, 14(1): 37–43 (in Chinese).
- 颜丹平, 金哲龙, 张维宸, 刘少峰. 2008. 川渝湘鄂薄皮构造带多层拆离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制[J]. 地质通报, 27(10): 1687–1697.
- Yan D P, Jin Z L, Zhang W C, Liu S F. 2008. Rock mechanical characteristics of the multi-layer detachment fault system and their controls on the structural deformation style of the Sichuan-Chongqing-Hunan-Hubei thin-skinned belt, South China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1687–1697 (in Chinese).
- 严尊国, 钱家栋, 陈俊华, 李胜乐. 2000. 地震前兆异常识别技术的数值模拟实验研究[J]. 地震学报, 22(6): 606–613.
- Yan Z G, Qian J D, Chen J H, Li S L. 2000. Study of technique of identifying the earthquake precursor anomalous in terms of mathematic modeling[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 22(6): 606–613 (in Chinese).
- 杨淑贤, 高士钧, 蔡永建, 黄江. 2005. 三峡及邻区新构造期以来应力场分区研究[J]. 大地测量与地球动力学, 25(4): 42–45.
- Yang S X, Gao S J, Cai Y J, Huang J. 2005. Study on stress field zoning in Three Gorges and its adjacent area since Neotectonic age[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(4): 42–45 (in Chinese).
- 叶金汉, 鄢绮霞, 夏万仁. 1991. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 水利电力出版社: 474–491.
- Ye J H, Xi Q X, Xia W R. 1991. *Handbook on Rock Mechanics Parameters*[M]. Beijing: China Water Power Press: 474–491 (in Chinese).
- 叶正仁, 王建. 2004. 中国大陆现今地壳运动的动力学机制[J]. 地球物理学报, 47(3): 456–461.
- Ye Z R, Wang J. 2004. Dynamics of present-day crustal movement in the China mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(3): 456–461 (in Chinese).
- 张国民. 2002. 我国地震监测预报研究的主要科学进展[J]. 地震, 22(1): 2–8.
- Zhang G M. 2002. The main science advance of earthquake monitoring and prediction in China[J]. *Earthquake*, 22(1): 2–8 (in Chinese).
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J]. 地学前缘, 9(2): 430–441.
- Zhang P Z, Wang Q, Ma Z J. 2002. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in conti-

- ntental China[J]. *Earth Science Frontiers*, **9**(2): 430–441 (in Chinese).
- 赵和云, 阮爱国. 1992. 地电台址大范围介质条件的数值模拟研究[J]. 西北地震学报, **14**(3): 64–70.
- Zhao H Y, Ruan A G. 1992. Mathematical simulation research of affect of large scale medium condition on the observation of geoelectrical station[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **14**(3): 64–70 (in Chinese).
- 祝爱玉, 张东宁, 蒋长胜. 2015. 川滇地块东边界中南段构造应力分布特征与历史强震活动关系的数值模拟[J]. 地震学报, **37**(5): 762–773.
- Zhu A Y, Zhang D N, Jiang C S. 2015. Numerical simulation of the relationship between the tectonic stress distribution and the historical strong earthquake activities of the middle-southern segment of eastern boundary of the Sichuan-Yunnan block[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(5): 762–773 (in Chinese).
- England P, McKenzie D. 1982. A thin viscous sheet model for continental deformation[J]. *Geophys J Int*, **70**(2): 295–321.
- Malaimani E C, Kumar N R, Akilan A, Abilash K. 2008. GPS-geodesy with GNSS receivers for Indian Plate kinematics' studies with the recent plate velocities estimated from GNSS data[J]. *J Ind Geophys Union*, **12**(3): 109–114.
- Parsons T. 2002. Post-1906 stress recovery of the San Andreas fault system calculated from three-dimensional finite element analysis[J]. *J Geophys Res*, **107**(B8): ESE 3–1–ESE 3–13.
- Xing H L, Makinouchi A. 2002. Finite element analysis of a sandwich friction experiment model of rocks[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**(9): 1985–2009.
- Xing H L, Mora P, Makinouchi A. 2004. Finite element analysis of fault bend influence on stick-slip instability along an intra-plate fault[J]. *Pure Appl Geophys*, **161**(9/10): 2091–2102.