

何应文,岳冲,李智蓉,等.爱华隧道施工对云南云县台水管倾斜观测影响分析[J].地震工程学报,2018,40(增刊):117-122.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.117

HE Yingwen, YUE Chong, LI Zhirong, et al. Influence of Aihua Tunnel Construction on the Observation of DSQ Water Tube Tiltmeter at Yunxian Seismic Station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40 (Supp): 117-122. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.117

爱华隧道施工对云南云县台水管倾斜观测影响分析

何应文¹, 岳冲², 李智蓉³, 杨建文⁴, 杞应平⁵

(1. 云南省地震局云县地震台, 云南 临沧 675803; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045;

3. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 4. 中国地震局滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000;

5. 云南省双江县水利局, 云南 临沧 677300)

摘要:收集整理云南云县台观测山洞周边环境变化参数及相关岩石力学参数,运用不规则载荷模型模拟计算荷载引起的倾斜变化量。结果显示,爱华隧道施工的挖土卸载变化对台站倾斜量有一定影响,水管倾斜仪 NS、EW 两方向倾斜影响量分别为 $147.332\ 004\ 5 \times 10^{-3}''$ 和 $108.560\ 424\ 3 \times 10^{-3}''$,这与 2017 年实际观测倾斜量的 $186 \times 10^{-3}''$ 和 $150 \times 10^{-3}''$ 在同一量级。研究结果从定量模拟的角度证实了荷载变化对云县台水管倾斜仪 NS 向北倾、EW 向西倾变化和 2017 年倾斜变化量减小的异常有一定影响。

关键词:水管倾斜;环境干扰;载荷模型;定量模拟

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)增刊-0117-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.117

Influence of Aihua Tunnel Construction on the Observation of DSQ Water Tube Tiltmeter at Yunxian Seismic Station, Yunnan Province

HE Yingwen¹, YUE Chong², LI Zhirong³, YANG Jianwen⁴, QI Yingping⁵

(1. Yunxian Seismic Station, Earthquake Agency of Yunnan Province, Lincang 675803, Yunnan, China;

2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;

3. Earthquake Agency of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China;

4. West Yunnan Earthquake Prediction Experiment, Dali 671000, Yunnan, China;

5. Shuangjiang Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Lincang 665000, Yunnan, China)

Abstract: In this study, the environmental change parameters and related rock mechanics parameters around the observation cave in Yunxian County were collected and sorted, and an irregular load model was used to simulate and calculate the tilt changes caused by the load change. The results show that the unloading change induced by the excavation of Aihua tunnel construction has a certain influence on the observation of DSQ tiltmeter at the Yunxian seismic station. The tilt

收稿日期:2018-06-26

基金项目:中国地震局地震监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-172510);云南省地震局青年地震科学基金(2017k09)

第一作者简介:何应文,男,工程师,主要研究地震活动性、地形变观测与前兆异常等。E-mail:hyw2004@126.com。

changes of NS and EW directions are $147.332\ 004\ 5 \times 10^{-3}''$ and $108.560\ 424\ 3 \times 10^{-3}''$, respectively, which are of the same order of the actual tilt observed in 2017 ($186 \times 10^{-3}''$ and $150 \times 10^{-3}''$, respectively). The results indicate that the load change has a certain influence on the tilt changes in the NS and EW directions as well as on the abnormal decrease of tilt changes in 2017.

Keywords: water tube tiltmeter; environmental interference; load model; quantitative simulation

0 引言

随着社会经济的发展和基础设施建设的增多,地震监测台站被各种人类构筑物包围,严重影响地形变类仪器观测质量。台站周边越来越多的载荷影响因素不断出现,公路、铁路、高铁、水库、建房等人类活动对于地形变观测来说,无疑是一种人为干扰,这些都会对定点地倾斜潮汐观测产生影响。台站观测分析人员要从地倾斜观测资料中捕捉到真正的地震前兆异常信息,就必须通过分析各种干扰因素对观测资料的影响量级和形态特征,才能在分析预报工作中设法消除和削弱某些干扰,从而提取到可靠的地震前兆异常信息。

为精准查明并排除各类干扰信息,需采用相应计算方法精确地定量分析干扰源。然而目前直接运用数学方法定量分析地倾斜的研究成果较少,难以形成系统有效的分析手段。在以往的研究中,乔学军等^[1]借助数值分析探讨了载荷变化对周边观测的影响特征;张凌空等^[2]根据岩石力学和弹性力学原理,研究了不同周期干扰源对倾斜观测的影响以及它们的相关性;李祖宁等^[3]利用质点载荷模型分析干扰特点;胡卫建等^[4]建立了地表集中载荷模型;邱泽华等^[5]运用三维集中载荷模型。由于目前大部分前兆观测为地表或近地表观测,为了更加精细地刻画载荷的近场影响,闫伟等^[6]基于均匀、各向同性的半无限弹性体的点状载荷模型,推导了水平倾斜场的解析解计算方法,给出了二维、三维不规则形状载荷对地面或地下某点的垂直位移和倾斜矢量的解析解计算方法。

目前在云南云县台周边 3 km 范围内正在建设一条铁路,该段将以隧道的形式通过,于 2016 年 10 月开始施工,规划隧道总长度约 4.2 km,隧道施工线在仪器所测山体的东南方向。本文将基于不规则载荷模型,对环境荷载变化影响云县水管观测两方向的倾斜量进行数值模拟及定量计算,以此探讨云县台水管倾斜仪 NS 向北倾、EW 向西倾变化和 2017 年倾斜变化量减小异常变化的机理,为准确识别形变观测干扰提供一定的分析研究依据。

1 场地地震地质背景及观测概况

1.1 地震地质背景

云县地震台位于澜沧江西部与青藏断块地区的川滇隆起部,地理坐标为 100.14°E 、 24.44°N ,海拔 1 110 km。所监测山体走向近东南,台基为晚二叠纪花岗岩,周边地质构造复杂,在漫长的地质演化过程中发育了一系列 NNE、NE 向断裂,主要有 NNE 向的南汀河断裂和陇川—昌宁断裂, NW-NS 向的澜沧江断裂(图 1), NW 向的汗母坝断裂,其中南汀河断裂为早、中更新世断裂,且历史地震的分布与该断裂的走向一致^[7]。台站的西部是龙陵—腾冲地震带,南部是耿马—澜沧地震带,东南部是思茅—普洱地震带,东北部是景东—景谷地震活跃区,台站位于几个地震活跃区的中间,是一个地震监测的敏感点位。该区域历史上破坏地震活动强烈,地震地质考察表明,云县盆地西南缘朱家村附近存在古地震遗迹。该遗迹保留于晚更新世至全新世初期的地层中,认为是强震活动过的痕迹,它反映出了多次地震事件,最近一次可能发生于距今 500~1 000 a,最早一次可能为晚更新世或全新世早期,它们的强度均可能为七级以上^[8]。清乾隆 34 年(1770 年)在台站周边的凤庆县发生过 5.5 级地震,1900 年以来

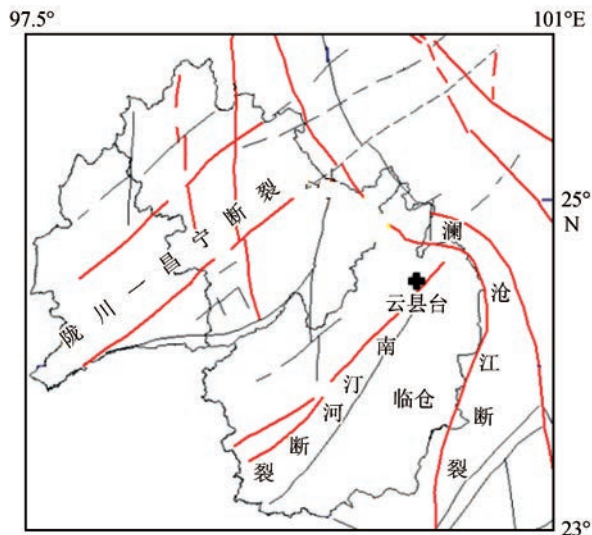


图 1 云县地震台位置及周边地区的地震地质

共发生 $M_s \geq 5.0$ 地震 53 次,其中 $M_s \geq 6.0$ 地震 8 次、 $M_s \geq 7.0$ 地震 4 次,最大震级为 1976 年 5 月 29 日龙陵 7.3、7.4 级地震(图 2)。近期台站周边区域中强地震活动相对活跃,如 2014 年 10 月 7 日景谷 $M_s 6.6$ 、2015 年 3 月 1 日沧源 $M_s 5.5$ 、2015 年 10 月 30 日昌宁 $M_s 5.1$ 地震。自 1965 年以来,发现该地区现代微震、小震的活动频度与滇西南地区中强地震间有一定相关性^[9-10]。

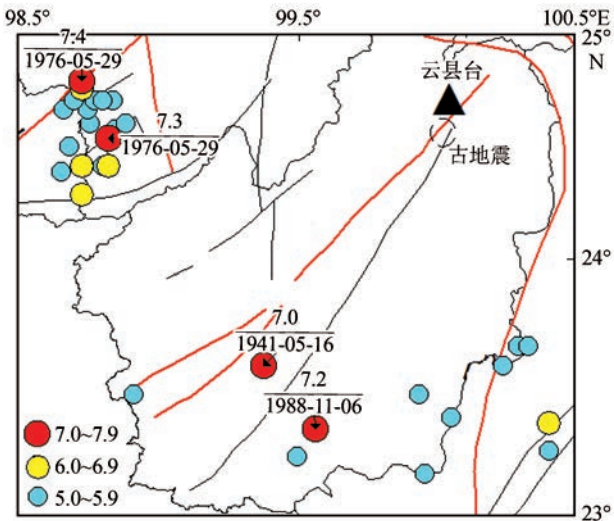


图 2 台站周边中强地震分布

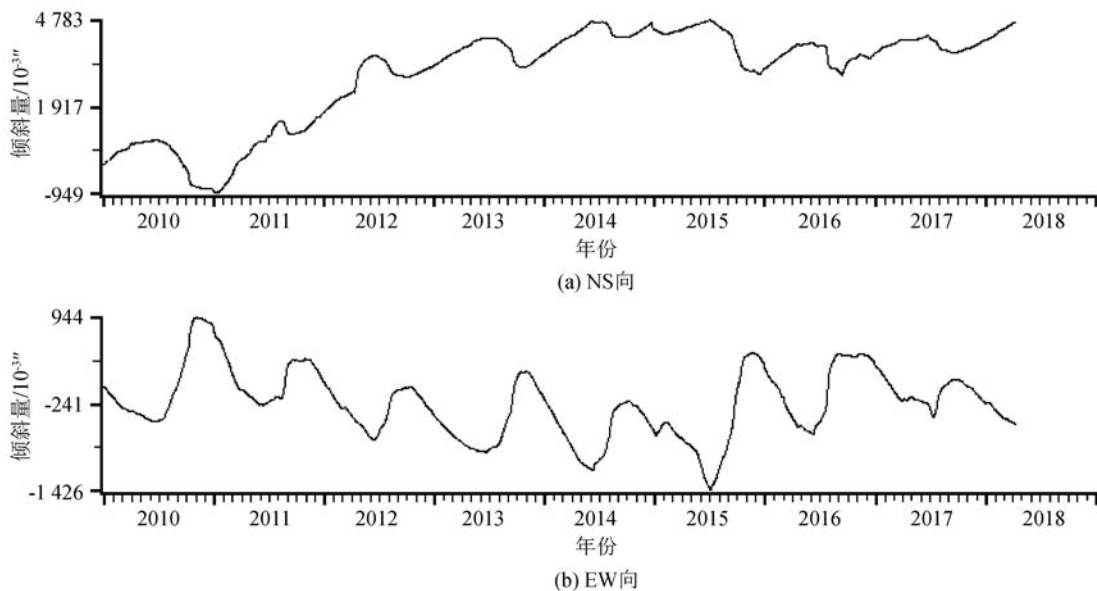


图 3 2010—2018 年云县台水管仪 NS、EW 两分量日均值曲线

年零漂采用日均值法计算,将每年度 12 月 31 日的日均值减去当年 1 月 1 日的日均值,即为该年度的年零漂值;年变幅的计算方法为:在每个分量全年 8 760 个整点值(查固体潮观测月报表)中找出最大值和最小值,二者相减后,取绝对值,即得各分量年变幅^[11]。统计 2010—2017 年云县台水

1.2 观测山洞概况

山洞始建于 1970 年,1989 年开始投入正式观测,先后经历了“九五”、“十五”技术升级改造。目前该山洞的主要观测手段为测震和地形变。台址基岩为花岗岩,覆盖层平均厚度大于 40 m,山洞全长 230 m,山洞水平贯通山体,仪器洞室进深 140 m。山洞引洞设隔离塑料门 4 道,船舱门 3 道,以减小空气流动,保持恒温,仪器洞室温度约 23.5 °C,洞温日变幅小于 0.002 °C,年变幅小于 0.1 °C,相对湿度在 90% 左右。2006 年架设 DSQ 水管倾斜仪,仪器墩位选在较完整的基岩上。

2 异常变化特征及环境干扰因素

2.1 异常变化特征

自 2010 年以来云县台水管倾斜观测趋势性变化分为 2 个阶段:(1)2010—2014 年 NS 向、EW 向呈趋势性上升、下降阶段;(2)2015—2018 年 NS 向、EW 向均处于平稳变化阶段。在平稳变化的基础上,NS 向、EW 向测值于 2015 年 7—11 月份同步转折下降、上升变化;2016—2018 年数据变化趋于稳定,NS 向、EW 整体年变趋势向北、西倾斜(图 3)。

管倾斜潮汐观测 NS、EW 分量年零漂值和年变幅结果见表 1 和图 4。由此可见,消除仪器零漂后,NS 向的年变化量呈趋势下降[图 4(a)红虚线],除了 2011 年因换水干扰和人为影响导致固体潮年变现象不明显,年变化量减小,其他年份的变化幅度均大于 100×10^{-3} ,而在仪器正常工作的情况

下,2017 年的年变化量突然变小;EW 向的年变化量出现大幅下降的现象,是观测以来的历史最低值。

表 1 云县台水管仪两分量年变幅和年漂零统计

年份	年零漂/($\times 10^{-3}''$)		年变幅/($\times 10^{-3}''$)		年变幅-年零漂/($\times 10^{-3}''$)	
	EW	NS	EW	NS	EW	NS
2010	760	912	1 438	1 716	678	804
2011	692	2 643	1 004	2 668	312	25
2012	454	1 552	786	1 908	332	356
2013	231	375	1 118	982	887	607
2014	441	792	964	1 094	523	302
2015	893	1 292	1 880	1 786	987	494
2016	51	520	1 106	1 128	1 055	608
2017	522	444	708	594	186	150

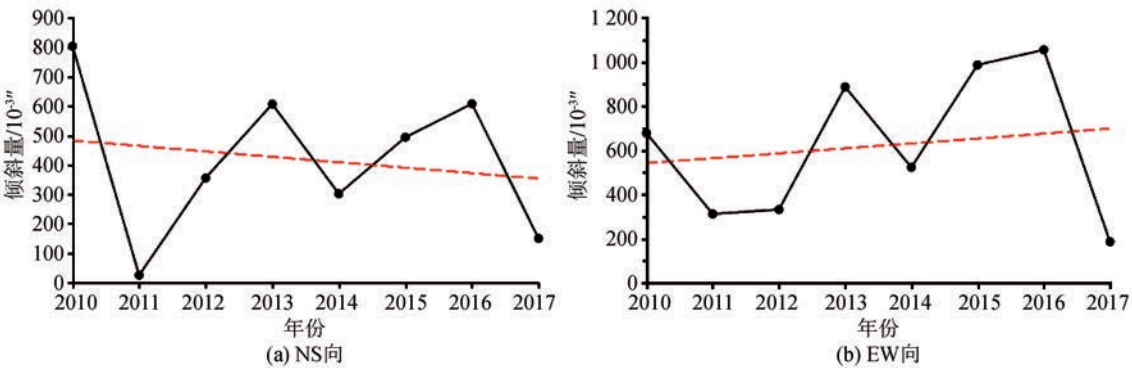


图 4 2010—2018 年云县台水管仪 NS、EW 两分量消除仪器零漂年变幅曲线

2.2 环境干扰因素

水管倾斜观测数据两分量出现趋势转折、年变幅下降异常变化后,我们对台站水管仪观测场地周边和仪器本身运行情况进行了环境调研、干扰因素分析和仪器标定、调零、故障等统计,发现云县台水

管倾斜观测年变曲线除了受季节性降雨影响明显外,其他因素不会对观测造成重大影响。台站周边潜在的影响因素只有 2016 年 10 月开始施工的爱华隧道,观测山洞距离隧道最短距离为 1 460 m (图 5)。

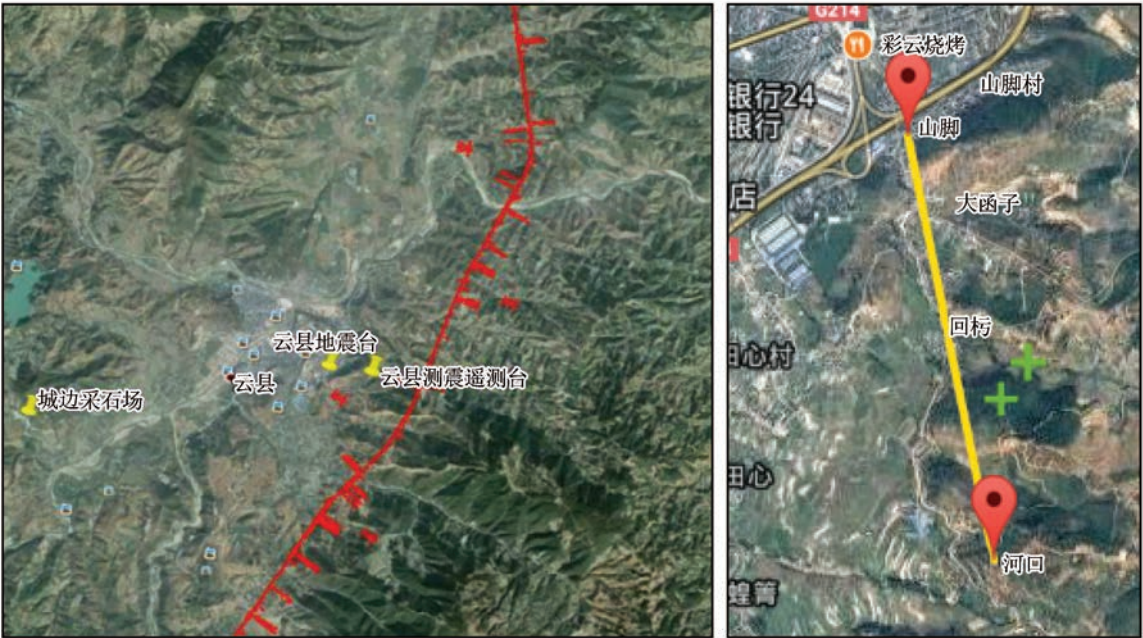


图 5 云县台周边环境干扰因素及隧道施工点分布图

3 荷载影响的定量计算

3.1 理论原理

二维不规则载荷模型是将模型的总作用力 P 进行散点化,各散点的作用力记为 P_i ,分别求取各散点对某点 M 的垂向位移 W_i 和倾斜量 (T_{xi}, T_{yi}) ,所有散点作用的矢量和即为 M 点的垂向位移 w 和倾斜量 $(T_x, T_y)^{[6]}$ 。设网格个数为 n ,则有

$$P_i = \frac{P}{n} \tag{1}$$

$$w = \sum w_i \tag{2}$$

$$T_x = \sum T_{xi}, T_y = \sum T_{yi} \tag{3}$$

在实际计算时,以不同长度将二维不规则模型进行格网化处理,然后利用质点载荷模型^[3,6]分别求取各格网对 M 点的垂向位移 W_i 和倾斜量 T_{xi} 、 T_{yi} ,最后利用式(2)、(3)求取该点的垂向位移 w 和倾斜量 (T_x, T_y) 。

对密度均匀的三维不规则形状载荷模型,可将散点的高程(H_i)作为权重对总载荷 P 进行重新分配;对密度不均匀的三维不规则形状载荷,可将散点的高程(H_i)和密度(ρ_i)的乘积作为权重对载荷 P 进行重新分配,即下式。

$$P_i = \frac{p}{n} \cdot \frac{H_i \rho_i}{\sum H_i \rho_i}$$

3.2 几何模型的建立

根据实地勘查测算,截至 2017 年 12 月隧道挖出的土方量约为 $6.68 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (图 6)。通过对台站周边的岩性进行调查,发现周边山体岩性为花岗岩,风化程度较高,节理发育,岩石较为破碎。结合台站周边地质特征及断层分布,建立长、宽、深为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ 的几何模型。模型从上到下

分为均匀水平的两层:覆盖层和基岩层,总厚度 500 m,假设深度 20 m 以内为砂岩覆盖层,深度 480 m 以下为花岗岩基岩层,建立区域有限元网络模型,共划分 39 600 个有限元网格(图 7)。在底部垂向固定的情况下,研究弹性体模拟地应力平衡(考虑重力作用)下受载荷影响范围。

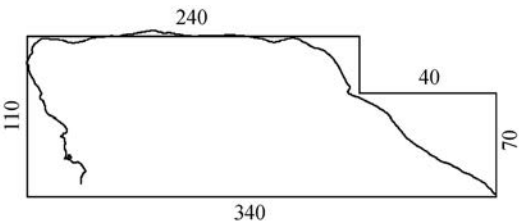


图 6 挖出的土堆示意图(单位:m)

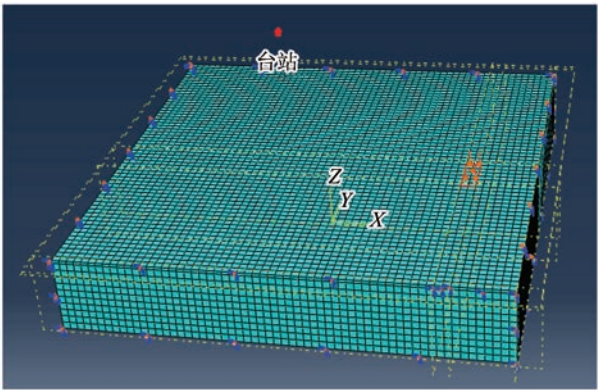


图 7 有限元几何模型网格划分

3.3 参数选取和定量模拟

云县台观测山洞台基岩性为中分化花岗岩,覆盖层为砂岩。依照文献[12]推荐的参数,花岗岩泊松比取值范围为 0.17~0.36,砂岩泊松比取值范围为 0.15~0.52。由于隧道周边岩石力学性质无资料可参考,本文在模拟过程中为了确保荷载对水管观测影响的准确性,分别假设三种参数进行对比分析(表 2)。

表 2 模型的介质参数

序号	岩石类型	厚度/m	密度/(kg · m ⁻³)	杨氏模量/Pa	泊松比
参数一	砂岩	20	1 500	5.00E+08	0.25
	花岗岩	480	2 680	1.00E+09	0.36
参数二	砂岩	20	1 500	5.00E+08	0.25
	花岗岩	480	2 680	1.40E+10	0.36
参数三	砂岩	20	1 500	1.00E+10	0.25
	花岗岩	480	2 680	2.00E+10	0.36

经过数据模拟求解,发现第二种参数假定下的情形比较符合实际,由该模型计算得到垂直方向的变形图(图 8),从图 8 可以看出,水管仪处在垂向变形红色区域,台站所处的点受载荷引起的垂向位移

为 0.01 mm,表现为上升,即北南向往北倾、东西向往西倾。其计算结果与云县台水管倾斜仪曲线整体往北西向倾斜相吻合(图 3)。根据角度转换公式: $\Delta\varphi = \Delta h / L \text{ (rad)} = 0.206\ 265 \times \Delta h / L \text{ ("})$,式中 Δh

为水管仪北南、东西两端点变形差,单位: μm ; L 为水管仪两分量测线长度,单位: m 。得到隧道挖出的土堆对台站水管仪 NS 和 EW 向变化量分别为 $147.332\ 004\ 5\times 10^{-3}''$ 和 $108.560\ 424\ 3\times 10^{-3}''$ (表 3),这与 2017 年水管仪实际测量的 NS、EW 两分量的年变化量分别为 $186\times 10^{-3}''$ 和 $150\times 10^{-3}''$ 在同一量级(表 1)。这表明隧道施工对云县台水管倾斜观测有一定的影响,从而可以基本确定云县台水管倾斜观测 NS、EW 曲线分别向北、西倾斜和 2017 年 NS、EW 两分量倾斜变化量突然减小的异常为环境干扰因素所致。

4 结 语

针对云县台水管倾斜仪 NS、EW 两分量向北、

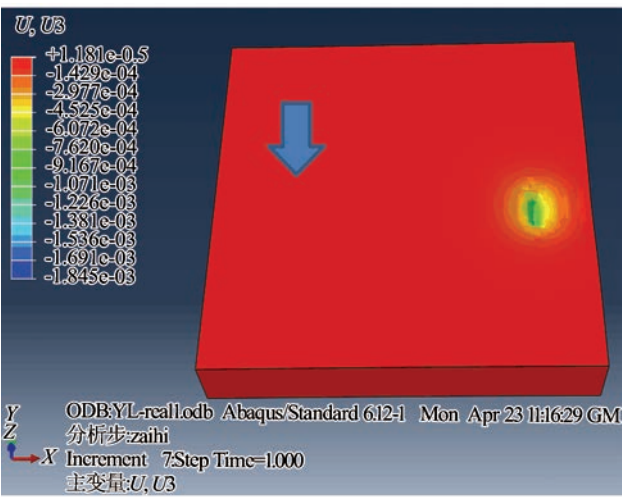


图 8 垂直方向变形图显示

表 3 隧道施工期间水管仪实测值与模拟值对比

序号	岩石类型	厚度/m	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/Pa	泊松比	垂向位移/mm	水管测向	倾斜变化量/ms
参数一	砂岩	20	1 500	$5.00\text{E}+08$	0.25	0.14	NS	2 062.648 062
	花岗岩	480	2 680	$1.00\text{E}+09$	0.36		EW	1 519.845 941
参数二	砂岩	20	1 500	$5.00\text{E}+08$	0.25	0.01	NS	147.332 004 5
	花岗岩	480	2 680	$1.40\text{E}+10$	0.36		EW	108.560 424 3
参数三	砂岩	20	1 500	$1.00\text{E}+10$	0.25	0.067	NS	98.712 442 99
	花岗岩	480	2 680	$2.00\text{E}+10$	0.36		EW	69.098 710 09

西倾斜和年变倾斜量减小的异常,本文利用不规则载荷模型模拟计算了荷载变化引起的倾斜变化量,从定性和定量两方面分析了荷载变化对云县台水管倾斜观测的影响机理,得到如下结论:

(1) 大临铁路爱华隧道施工是云县台观测山洞周边存在的潜在干扰因素,隧道施工使云县地震台形变观测山洞东南方向的岩体重力减轻,导致云县地震台 DSQ 型水管倾斜仪 NS、EW 两分向整体趋势往北、西倾斜。

(2) 数值模拟计算发现,隧道挖出的土方量对云县地震台水管仪 NS 和 EW 向变化量与 2017 年水管仪实际测量的 NS 和 EW 年变化量在同一量级,这表明隧道施工导致了 DSQ 型水管倾斜仪 NS 和 EW 两个方向年变倾斜量均有所减小,进一步确定了爱华隧道施工对云县台水管倾斜观测有一定的影响。

参考文献

[1] 乔学军,游新兆,杜瑞林,等.三峡水库蓄水负荷形变场及模拟分析[C]//《大地测量与地球动力学进展》论文集.湖北省科学技术协会,2004:8.

[2] 张凌空,王广才,牛安福.周期气压波对地壳应变场观测影响的若干因素分析[J].地震学报,2011,33(3):351-361.

[3] 李祖宁,吴绍祖,陈光,等.利用点荷载叠加方法研究天马跨断层短水准异常资料[J].地震研究,2007,30(1):35-38.

[4] 胡卫建,张俊山,谢智,等.荷载对钻孔应变测值影响的实验及力学解析[J].地震,2002,22(3):95-104.

[5] 邱泽华,张宝红.用力矩模型解释摩擦试验加载过程中的非线性变化[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):252-255.

[6] 闫伟,牛安福,陈国琴.不规则载荷影响地表近场垂向位移和倾斜观测的定量计算[J].中国地震,2015,31(2):297-307.

[7] 朱玉新,李珅,任金卫.南定河断裂带断层活动特征与古地震事件[J].中国地震,1994,10(4):347-356.

[8] 董兴权,龙建章,文继云,等.云南云县发现古地震遗迹[J].地震研究,1984,7(1):52.

[9] 付虹,王世芹,秦嘉政,等.2007 年 5—6 月滇西南地区 $M\geq 5$ 成组地震活动中、短临异常特征及预测[J].地震研究,2007,30(4):303-310.

[10] 何应文,曹白伦,匡福江,等.滇西南地区地震活动特征分析[J].地震地磁观测与研究,2016,37(5):19-27.

[11] 卢双苓,王强,林秀娜,等.汶川地震前泰安台摆式倾斜仪异常现象分析[J].大地测量与地球动力学,2011,31(增刊):19-23.

[12] 顾晓鲁.地基与基础[M].第 3 版.北京:中国建筑工业出版社,2003:157-168.