

# 地铁隧道下穿供水隧洞影响分析研究

梁江源

中铁水利水电规划设计集团有限公司

DOI:10.12238/hwr.v6i4.4353

**[摘要]** 针对地铁暗挖施工与运营对既有供水隧道造成沉降与变形问题,依托深圳地铁6号线二期下穿笔架山支线隧洞工程,通过MIDAS软件构建地铁暗挖施工与运营期下穿供水隧道的三维有限元数值模型,采用数值计算分析地铁下穿对供水隧洞衬砌结构的位移、振动及应力变化规律,并结合现场监测数据分析地铁施工对既有隧洞的变形规律。结果表明:在地铁隧道常规施工期间,支线及检修隧洞发生了一定的沉降,其中左线隧道施工时隧洞最大沉降为0.24mm,衬砌应力增加了约4%。右线隧道施工时既有隧洞最大沉降分别为0.26mm,衬砌应力增加了2%;在地铁隧道爆破施工期间,左线对隧洞造成最大位移为0.18mm,振动速度峰值约为1.38cm/s,应力增加了约13.5%。右线造成的最大位移为0.20mm,振动速度峰值约为1.54cm/s,应力增加了约12.4%;在地铁运行期产生的扰动对既有构造物的影响较小。

**[关键词]** 地铁隧道; 数值模拟; 爆破施工; 供水隧洞; 沉降变形

**中图分类号:** TU94 **文献标识码:** A

## Research and Analysis of Undercutting Metro Tunnel on Water Supply Tunnel

Jiangyuan Liang

China Railway Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Group Co., LTD

**[Abstract]** The displacement, vibration and stress variation of the lining structure of the water supply tunnel subjected to subway underpass are analyzed by numerical calculation, and the deformation of the existing tunnel subjected to subway construction is analyzed by combining with the field monitoring data. The results show that during the conventional construction of subway tunnel, the settlement of branch line and overhaul tunnel occurs to a certain extent. The maximum settlement of tunnel is 0.24mm during the construction of left line tunnel, and the lining stress increases by about 4%. During the construction of the right line tunnel, the maximum settlement of the existing tunnel is 0.26mm, and the lining stress increases by 2%. During the blasting construction of subway tunnel, the maximum displacement caused by the left line to the tunnel is 0.18mm, the peak vibration velocity is about 1.38cm/s, and the stress increases about 13.5%. The maximum displacement caused by the right line is 0.20mm, the peak vibration velocity is about 1.54cm/s, and the stress increases about 12.4%. The disturbance generated during subway operation has little influence on existing structures.

**[Key words]** subway tunnel; numerical simulation; blasting construction; water tunnel; settlement deformation

### 1 研究背景

随着城市的快速发展,城市轨道交通网络不断加密,许多市内交通建设遇到了较多的难点、痛点<sup>[1-3]</sup>。地铁暗挖隧道下穿既有建筑物的案例屡见不鲜,而地铁下穿施工期及运营期对敏感构筑物造成明显的结构安全影响,当衬砌位移和应力超过安全范围时,则会影响既有敏感构筑物运营安全。目前,地铁隧道下穿既有构筑物的研究成果较多,Klar等基于理论推导对地铁下

穿对管线的变形影响,并得到管线沉降、弯矩的理论解析公式;许怀等采用理论分析、数值计算及现场试验等方法,对泄水洞超小净距下穿高速铁路隧道进行了综合设计,使其对既有隧道的沉降控制在允许范围内;周丁恒等通过建立暗挖隧道下穿京张隧道三维有限元数值模拟,研究了京张隧道竖向位移和横向位移随施工步变化特征;郭现钊<sup>[3-6]</sup>通过理论分析、数值模拟计算、工程类比研究方法,分析地铁盾构下穿铁路桥梁及承台的差异

沉降和时程曲线, 建议对既有桥梁桩通过增设桩基的保护措施, 可有效提高桩基承载力和抗变形能力, 减少地铁盾构下穿对铁路的影响; 沈俊等<sup>[7]</sup>构建了地铁叠线盾构施工下穿并行燃气管线三维有限元数值模型, 发现管线变形受叠线盾构施工二次扰动的影响明显。

目前学者对于隧道下穿工程影响的研究多于铁路与公路下穿工程, 对于城市内下穿供水隧洞研究较少, 更缺乏对工程全生命期内对既有敏感构筑物的影响研究。本文以深圳地铁6号线翰岭站~银湖站(翰银站)区间隧道下穿笔架山支线供水及检修隧洞为工程背景, 通过建立三维有限元数值模拟, 分析地铁隧道下穿供水隧洞在全寿命周期内的影响, 并提出相应的防护措施, 为其他类似工程施工安全防范提供良好的借鉴与参考。

## 2 工程概况

深圳地铁6号线二期线路自深圳北站向南引出后, 在翰银站区间下穿东江水源工程的支线隧洞及检修隧洞, 两者均s为城门洞型无压隧洞。地铁与支线隧洞水平夹角 $43.5^\circ$ , 地铁左右两线竖向净距均为5.56m。与检修隧洞水平夹角 $90^\circ$ , 地铁左线竖向净距为13.36m, 地铁右线竖向净距为10.97m, 地铁与既有隧道相对位置关系见图1。该区域的底层岩性主要为震旦系混合岩, 结合程度差, 围岩等级为III类, 基岩含水层主要由第四系地层垂直补给, 补给与排泄通道一致, 地铁隧道和基坑开挖时渗水会沿开挖面向隧道或基坑内排泄, 稳定地下水深度为1~50m。

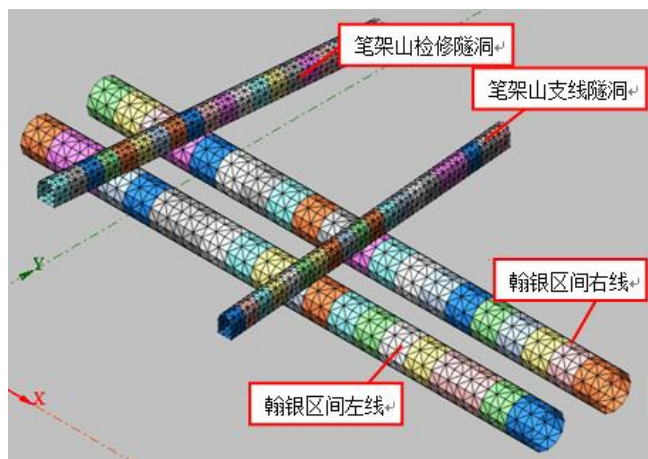


图1 地铁与供水隧洞衬砌结构及相对位置关系

## 3 数值模型试验

### 3.1 数值模型建立

采用MIDAS软件对地铁暗挖施工期与运营期下穿供水隧道进行三维有限元建模分析, 划分网格单元约123868个。建模时将地表视为水平面, 对各层土体进行均一化处理<sup>[8-10]</sup>。采用梁单元模拟管棚, 板单元模拟隧道结构、初期支护和二次衬砌, 实体单元模拟地铁隧道上部结构及加固区, 四面体实体单元模拟岩土体。模型尺寸为 $100\text{m} \times 120\text{m} \times 80\text{m}$ , 示意图如图2所示。翰岭站~银湖站区间隧道施工和运营会对支线和检修隧洞产生影响的荷

载有施工期的开挖卸荷、爆破荷载以及运行期的列车荷载, 利用Midas-GTS软件模拟土体和结构自重荷载, 同时将列车动荷载简化处理为静荷载, 隧道底产生的最大竖向应力约为180kPa, 模拟暗挖地铁隧道施工期及运营期对笔架山支线隧洞和检修隧洞的地基振动、应力和位移变化特征。

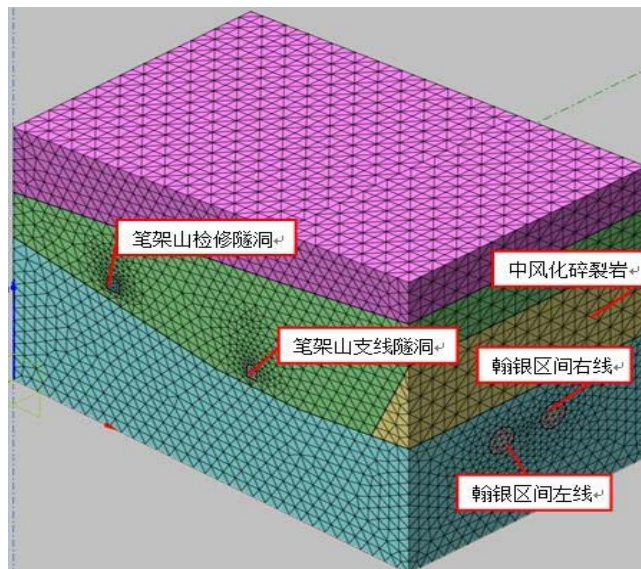


图2 三维有限元计算模型

### 3.2 计算参数选取

三维有限元模型中包含了4层岩土, 结合工程现场地勘资料明确不同岩土层计算参数见表1, 地铁隧道和供水隧洞衬砌及锚杆的参数见表2, 材料类型均为弹性。

表1 翰银站区间各个地层岩土工程参数

岩土名称	重度 $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	变形模量 (MPa)	泊松比 $\mu$	凝聚力 (kPa)	内摩擦角 $\Phi$ (度)	基床系数 (Mpa/m)	渗透系数 (m/d)
块状强风化混合岩	23.5	120	0.3	40	45	120	3.5
中风化混合岩	25.5	1000	0.3	180	60	1000	2.5
微风化混合岩	27.0	8000	0.2	400	70	5000	0.2
中风化碎裂岩	24.5	150	0.3	350	55	90	7.5

表2 地铁与供水隧洞支护参数表

结构名称	单元类型	尺寸	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (10 <sup>3</sup> MPa)	泊松比
地铁隧道衬砌	板单元	0.4m	25	3.0	0.167
供水隧洞衬砌	板单元	0.25m	25	3.0	0.167
锚杆	直线	0.001m <sup>2</sup>	-	8.0	0.3

## 4 模拟结果分析

### 4.1 地铁施工对既有隧洞的影响分析

#### 4.1.1 非爆破施工对既有隧洞的影响分析

地铁非爆破施工对笔架山支线隧洞和检修隧洞的计算结果见表3, 地铁左、右线施工对支线隧洞和检修隧洞造成的位移均属于沉降位移, 且均小于0.3mm, 未有明显的不良影响; 施工对既

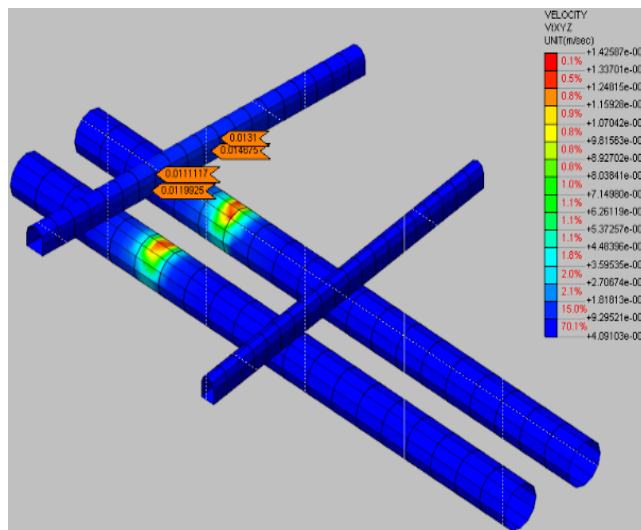
有隧洞的振动影响均小于0.035cm/s,远小于振动速度允许值2cm/s;施工对既有隧洞的衬砌应力的影响均远小于其衬砌混凝土(C25)的抗压强度设计值11.9Mpa,地铁非爆破施工对笔架山支线隧洞的结构安全造成影响较小。

表3 地铁非爆破施工期对输水隧洞计算结果

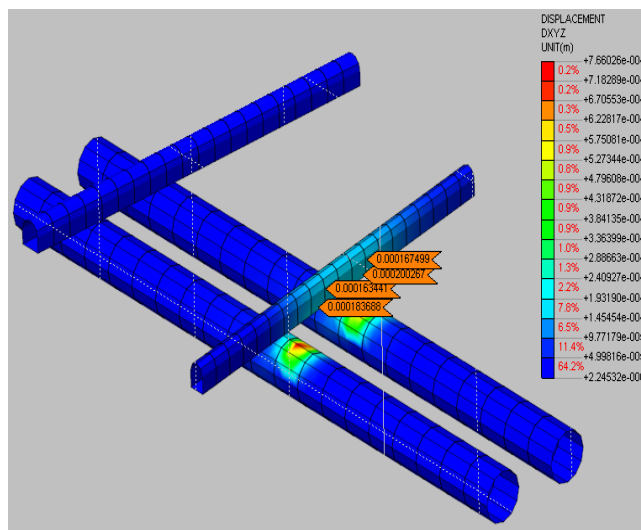
项目	左线					右线				
	施工前		施工期		变化率(%)	施工前		施工期		变化率(%)
	支线	检修	支线	检修	检修	支线	检修	支线	检修	检修
位移(mm)	初始归零	初始归零	0.24	0.20	-	初始归零	初始归零	0.26	0.21	-
振动速度(cm/s)	-	-	0.0032	0.0025	-	-	-	0.0035	0.0026	-
衬砌应力(MPa)	2.51	2.52	2.60	2.54	4.06%	2.50	2.46	2.55	2.50	2.16%

4.1.2 爆破施工对既有隧洞的影响分析

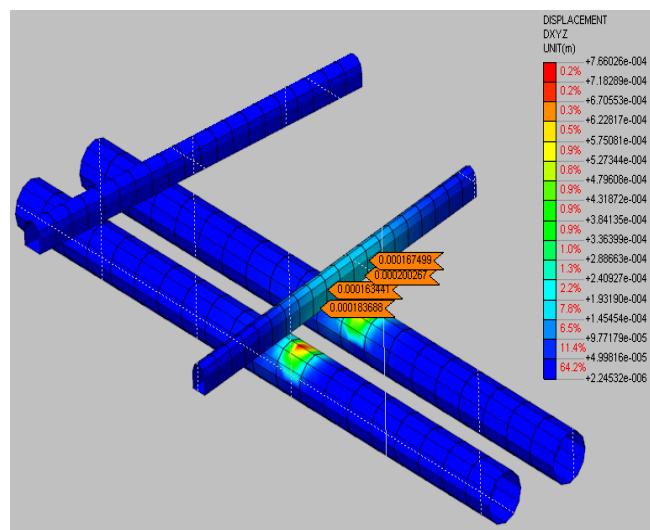
由表4可知:爆破施工期将会造成供水隧洞衬砌结构发生振动,隧洞的最大振动速度均发生在底板上,其中地铁左线施工对笔架山支线隧洞和检修隧洞造成的振动速度峰值分别为1.38cm/s和1.20cm/s,右线造成的振动速度峰值分别为1.54cm/s和1.45cm/s;爆破施工造成水工隧洞的衬砌结构发生向上的位移<sup>[11-13]</sup>,最大位移均发生在隧洞的底板处,其中地铁左线施工对支线隧洞和检修隧洞造成的位移分别为0.18mm和0.19mm,右线造成的位移分别为0.20mm和0.23mm;爆破施工对水工隧洞的底板影响最大,其应力将发生较大变化,其中地铁左线施工导致支线隧洞和检修隧洞衬砌结构的应力分别增加13.5%和8%;右线造成衬砌结构应力分别增加12.4%和9.7%,均小于衬砌混凝土(C25)的抗压强度设计值11.9Mpa,爆破施工期对笔架山支线隧洞的结构安全造成影响较非爆破施工程度大,但各项指标的影响均属允许范围内。



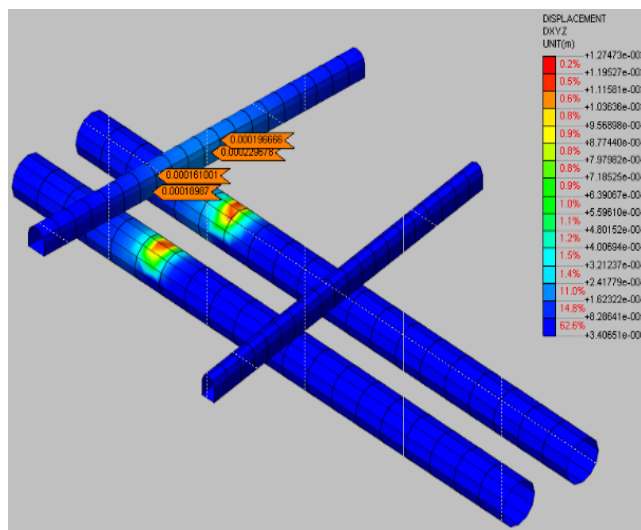
b. 检修隧洞振动速度模拟



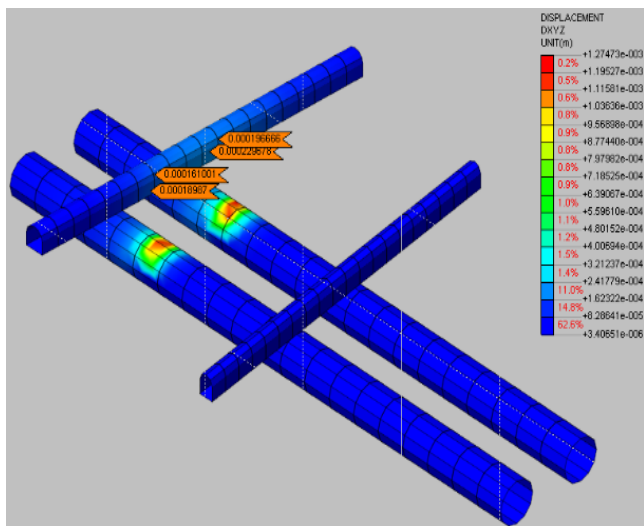
c. 支线隧洞衬砌位移模拟



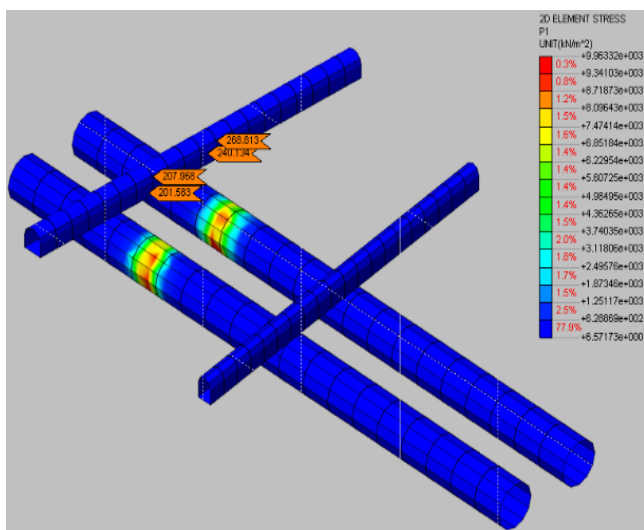
a. 支线隧洞衬砌的振动度模拟



d. 检修隧洞衬砌位移模拟



e. 支线隧洞衬砌应力变化模拟



f. 检修隧洞衬砌应力变化模拟

图3 爆破引起的隧洞衬砌各要素变化的模拟图

表4 地铁爆破施工期对输水隧洞计算结果

项目	左线						右线					
	施工前		爆破施工		变化率 (%)		施工前		爆破施工		变化率 (%)	
	支线	检修	支线	检修	支线	检修	支线	检修	支线	检修	支线	检修
位移 (mm)	初始归零	初始归零	0.184	0.19	—	—	初始归零	初始归零	0.20	0.23	—	—
振动速度 (cm/s)	—	—	1.38	1.20	—	—	—	—	1.54	1.45	—	—
衬砌应力 (MPa)	2.51	2.52	2.84	2.73	13.5%	8%	2.50	2.46	2.812	2.703	12.4%	7%

#### 4.2 地铁运营期对既有隧洞影响分析

翰银区间地铁通车将会使隧洞的振动速度达到最高,为最不利工况,此时将会造成笔架山支线隧洞和检修隧洞的衬砌结

构发生较强振动。由图4可知,地铁隧道运营造成笔架山支线隧洞和检修隧洞的最大振动速度在底板上,地铁运营造成的振动速度峰值分别为0.003227cm/s和0.00253cm/s。地铁运行振动对既有笔架山支线隧洞和检修隧洞衬砌产生向下的沉降<sup>[14]</sup>,且最大位移位置出现在底板位置,分别为0.00222mm和0.00216mm,地铁运行期对笔架山支线和检修隧洞影响甚微。

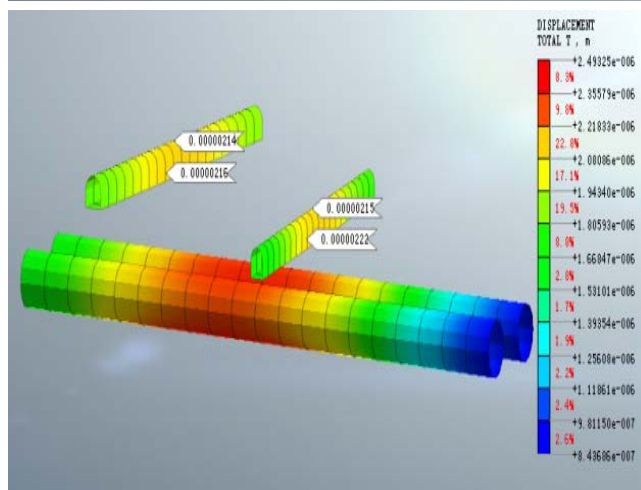
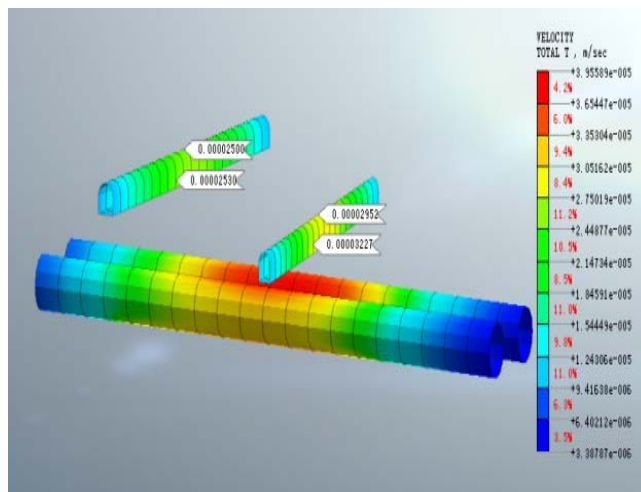


图4 地铁运行期支线隧洞和检修隧洞衬砌振动速度及位移图

### 5 沉降变形实测分析

#### 5.1 监测内容与布置

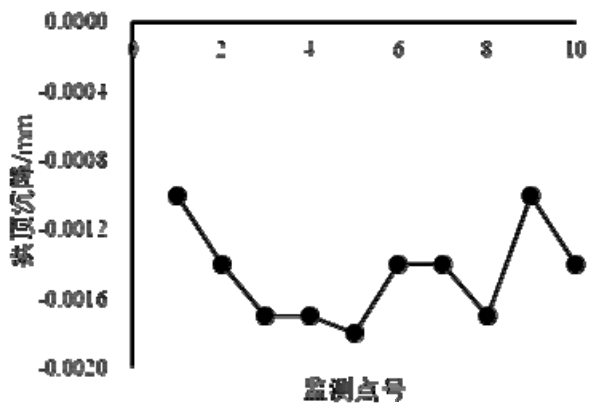
翰银区间地铁下穿既有隧洞时,对笔架山支线隧洞进行检测,具体监测内容与布置方式见表5。

表5 供水隧道现场监测内容及布置

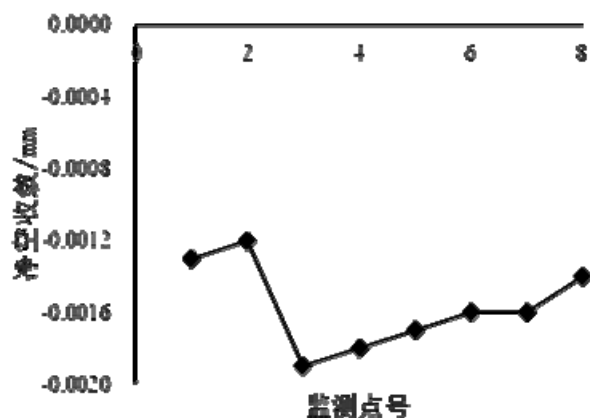
监测内容	控制标准/mm	数量/组	布置方式
拱顶沉降	20	10	布设于隧洞拱顶端,用于监测隧洞拱顶沉降,每个断面布设1个测点,每个测点为1组,共布设10个测点
净空收敛	10	8	每个断面均按左右边墙距离底板2米处、起拱处、底部以及拱顶共7处布设安装应变计,监测该断面应力变化情况,每个断面布设7个测点,每7测点为1组,共布设56个测点

#### 5.2 监测结果与分析

笔架山支线隧洞内位移及净空收敛累计变形结果如图5,由图5可知:拱顶沉降和净空收敛累计变形值最大分别为0.0018、0.0019mm,监测结果均小于模型计算数值,并小于6mm预警值,说明地铁暗挖施工过程中支线隧洞结构处于安全状态。



(a) 拱顶沉降



(b) 净空收敛

图5 供水隧道洞内位移累计变形

## 6 结论

(1) 数值模拟结果显示, 地铁隧道左右线非爆破施工对笔架山支线隧洞和检修隧洞均造成沉降位移, 分别为0.238mm、0.26mm和0.20mm、0.21mm; 造成衬砌应力分别增大4%、2%和0.6%、1.6%, 其影响数值均在安全范围内, 对笔架山支线隧洞和检修隧洞结构安全影响甚微。

(2) 地铁隧道左右线爆破施工对笔架山支线隧洞和检修隧洞造成的振动速度峰值为1.38cm/s、1.20cm/s和1.54cm/s、1.45cm/s, 满足振速控制标准; 左右线对笔架山支线隧洞和检修隧洞衬砌结构分别增加13.5%、8.0%和12.4%、9.7%; 同时引起两个隧洞向上位移, 左右线造成最大位移为0.184mm、0.20mm和0.190mm、0.230mm。爆破施工对该段交叉段笔架山支线隧洞和检修隧洞有一定的影响, 需对隧洞实施加固措施。

(3) 在地铁爆破施工期间, 应尽量在供水隧洞停水期间施工, 严格遵循施工工艺原则, 并采用控制爆破, 爆破振速不大于

2cm/s, 按照时间节点做好监测登记, 提前做好施工安全措施及应急处理预案。

(4) 根据实测数据可知, 输水隧洞的沉降变形值远小于模型计算值, 因此在调查清楚隧洞地质情况, 做好专项施工方案, 控制好爆破参数及加固措施后, 地铁隧道下穿输水隧洞的风险是可控制的。

## [参考文献]

- [1]毛学锋,许智焰,胡京涛.圳地铁3号线广深铁路桥梁桩基托换设计[J].铁道工程学报,2012,(3):91-95,111.
- [2]刘新军,地铁隧道下穿高速铁路联络线路基安全影响分析[J].铁道标准设计,2017,61(6):132-136.
- [3]Soomro M A, Ng C W W, Memon N A, et al. Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunnelling in dry sand:3D centrifuge tests and numerical modelling[J].Computers & Geotechnics,2018,101:48-64.
- [4]赵瑾.盾构区间下穿铁路框构桥有限元计算与应力分析[J].北方交通,2020,(1):71-74.
- [5]许怀.泄水洞超小净距下穿高速铁路隧道设计[J].铁道工程学报,2018,35(6):41-46.
- [6]杨晓杰,邓飞皇,聂雯,等.地铁隧道近距离穿越施工对桩基承载力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1290-1295.
- [7]周文涛,张鹏,吴薪柳.北京地铁14号线侧穿京津城际铁路桥桩地基预加固技术分析[J].城市轨道交通研究,2019,22(4):86-90
- [8]KlarA,Osman A S. Load-displacement solutions for piles and shallow foundations based on deformation fields and energy conservation[J].Geotechnique,2008,58(7):48-64.
- [9]周丁恒,田雪娟,李长安,等.暗挖地铁隧道下穿高速铁路隧道保护措施研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2021,40(9):86-91
- [10]郭现钊.地铁盾构隧道近距离下穿广深铁路影响分析及防护措施研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):107-112.
- [11]沈俊,晏莉,傅金阳.叠线盾构隧道并行下穿燃气管线影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,(17):449-456.
- [12]张毫毫,雷明锋,刘凌晖,等.新建隧道下穿施工对既有上卧盾构隧道扰动影响规律研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(2):396-401.
- [13]JALLOW A,OU C Y,LIM A.Three-dimensional numerical study of long-term settlement induced in shield tunneling[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2019,88:221.
- [14]王坚.常州地铁2号线盾构下穿既有隧道工程的影响研究[D].淮南:安徽理工大学,2019.

## 作者简介:

梁江源(1988--),男,汉族,广西省南宁市人,本科,学士学位,中级工程师,研究方向:河道治理、水工结构及岩土工程。