

文章编号:1674-2869(2016)01-0061-07

# 盾构近距离上跨施工对既有隧道的变形影响

管子卉

广州地铁设计研究院有限公司,广东 广州 510000

**摘要:**针对盾构近距离上跨施工对既有线的影响预测问题,采取有限元数值计算方法,以某地铁盾构隧道小间距上跨既有隧道施工为例,通过Midas-GTS有限元软件建三维模型,对既有线的竖向和水平变形进行分析研究.将数值计算结果与施工自动化监测结果对比,验证了数值计算分析的合理性.结果显示盾构上跨施工导致既有线发生上浮,且盾构施工对水平向的变形影响远小于竖向,受影响范围主要在盾构与既有线交叉点两侧各1倍洞径范围内.该研究为类似工程采取针对性措施提供了参考依据.

**关键词:**既有隧道;数值计算;自动化监测;变形

**中图分类号:**U455.43 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2016.01.011

## Influence of Up-Crossing Shield Tunnel Construction on Deformation of Adjacent Existing Tunnels

ZAN Zihui

Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510000, China

**Abstract:** For predicting the influence of existing tunnel caused by up-crossing construction, taking a shield tunnel up-crossing construction as a case, we established the 3D model by using Midas-GTS software to study the vertical and horizontal deformation. The rationality of the numerical analysis was proved by comparing the simulation and the automatic monitoring results during construction. The results show that the shield construction uplifts the existing tunnel and the horizontal deformation is far less than the vertical. The influenced area is in the range of one tunnel diameters from each side of the cross points of the shield and existing tunnel, which provides a reference for similar projects.

**Keywords:** existing tunnel; numerical method; automatic monitoring; deformation

## 1 引言

随着城市轨道交通的迅速发展,因受城市规划、地质水文等各种复杂条件的限制,新建地铁隧道不可避免会出现以小间距穿越既有运营线的情况.这种工况下出于运营安全要求对既有线变形指标控制非常严格,以《深圳市轨道交通安全保护区域施工管理办法》的规定为例,要求控制隧道结构绝对沉降量及水平位移量 $\leq 10\text{ mm}$ ,隧道纵向变形曲线的曲率半径 $R \geq 15\ 000\text{ m}$ ,隧道的相对变曲 $\leq 1/2\ 500$ ,如何有效控制新建隧道对既有线的影响成为建设各方重点关注的问题.盾构法能很好地控制地层变形,在对地层变形控制严格的上

跨(下穿)既有线的情况下往往成为首选.

仇文革<sup>[1]</sup>在论文中,对地下工程近接施工的近接度、分区指标表达式进行了研究,给出了解决适用的方法,有数值模型分析法、仿真模型试验法、现场真实验证等;瞿婧晶<sup>[2]</sup>以南京明园地下过街通道近距离穿越南京地铁二号线项目为依托,采用现场监测和有限元数值模拟相结合的研究方法,对盾构近距离上穿越对已建隧道的影响进行研究,得出了交叠隧道盾构施工影响规律;LOK W<sup>[3]</sup>在处理新加坡交通线路岩体为回填土的四洞并行隧道时,根据现场量测结果,对岩体的位移、衬砌的内力进行了深入分析,新建隧道开挖期间的受力图和既有隧道的沉降图.

收稿日期:2015-11-17

作者简介:管子卉,硕士,工程师. E-mail: 290324307@qq.com

目前国内对隧道下穿既有线的研究较多,但对以小间距甚至极小间距上跨既有线的工程尚不多<sup>[4-8]</sup>,因此很有必要对其理论和实践进行系统研究.本文以深圳地铁9号线红大区间以小间距上跨已运营的1号线矿山法隧道为例,采用数值模拟分析方法,对盾构施工的全过程进行动态模拟.研究盾构施工对上跨的既有地铁隧道的影响,并与施工中自动化监测的结果对比,总结上跨既有线的变形规律及经验,以期类似工程提供一定的借鉴.

## 2 上跨施工对既有隧道变形影响理论分析

新建的上跨隧道对既有隧道产生的影响主要是通过扰动其周边的岩土,使得围岩压力发生变化,进而影响既有隧道的受力状态.两隧道的作用形态与隧道的相互位置关系、开挖方式、地质和水

文都密切相关.随着开挖面不断向前推进,其隧道衬砌支护力也在不断下降,隧道变形随之而来.如两个隧道距离很近,一旦他们各自的应力变化较大区域出现交叠形成一体时,会产生很大的松弛范围<sup>[9]</sup>.导致两隧道的夹层土处于不稳定状态,两隧道的衬砌应力也会发生很大变化.邻近新建隧道开挖使得夹层土体受到扰动,地层的扰动传播到既有隧道,支护结构与夹层土体之间产生力的作用. **a.** 上跨隧道开挖前,既有隧道受到上部土体荷载[受力示意图见图1(a)]. 上跨隧道开挖后,卸载了上部土体,产生卸载土弹簧反力 $f_1$ ,使得既有隧道发生上浮[受力示意图见图1(b)], **b.** 开挖范围内原有的土体荷载转移到开挖两侧,相当于既有隧道的两侧施加压力,导致既有隧道两侧支撑反力加大 $q_1$ ,使得开挖区产生土弹簧反力 $f_2$ ,使得既有隧道结构上浮[受力示意图见图1(b)]. 由于上述两种原因叠加下,下部隧道可能发生局部上浮,导致不均匀沉降,还可能发生整体弯曲<sup>[10]</sup>

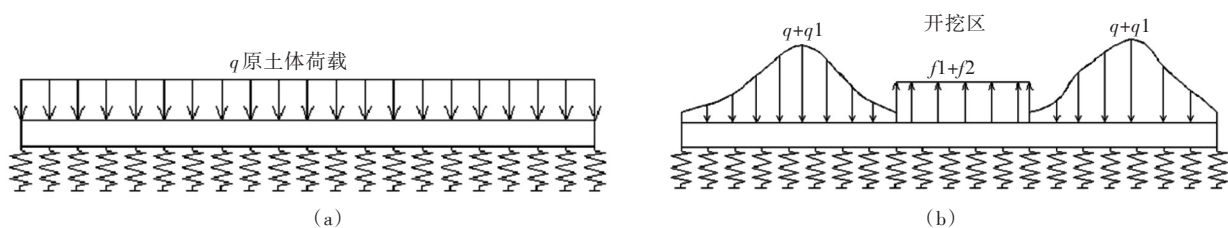


图1 施工前后既有隧道受力示意图 (a) 施工前既有隧道受力示意图;(b) 上跨隧道施工后既有隧道受力示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of existing tunnel force before and after construction.

(a) Diagram of existing tunnel force before construction; (b) Diagram of existing tunnel force after construction

## 3 工程概况

深圳地铁9号线红岭站~大剧院站区间采用盾构法施工,盾构从大剧院站始发,在深南中路路口上跨既有地铁1号线科大区间、地铁2号线燕大区间,沿红岭中路北行,最后到达红岭站吊出.区间隧道与1号线平、剖位置关系见图2、图3,本区间隧道主要位于中粗砂、硬塑状砾质粘性土层,1

号线科大区间为矿山法隧道底部位于花岗岩强风化层,9号线与1号线之间夹土地层为可塑状砾质粘性土,净间距最小为0.7~1.0 m. 由于地铁9号线盾构隧道与地铁2号线燕大区间净距12 m大于1.5倍盾构直径,其相互影响较小<sup>[11]</sup>本文重点研究9号线红大区间以小间距上跨1号线的影响规律.

地层的主要物理力学参数见表1.

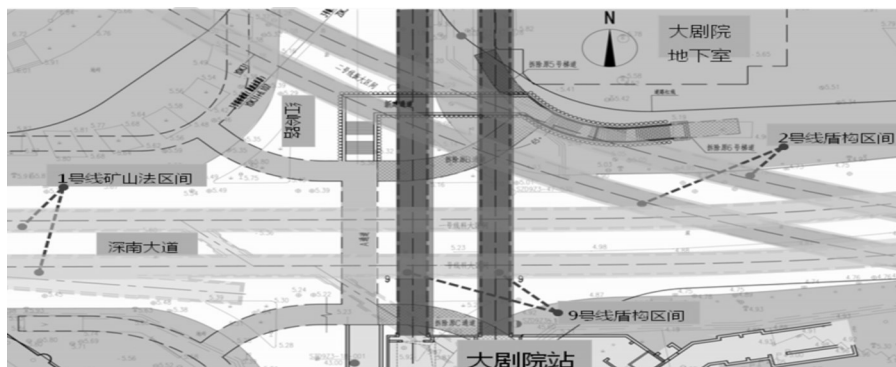


图2 区间隧道平面位置关系

Fig. 2 Relation of planimetric position of section tunnel

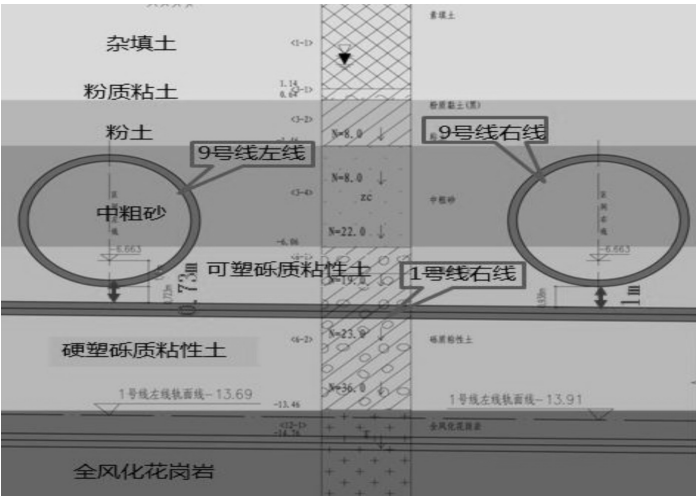


图3 区间隧道剖面位置关系

Fig. 3 Relation of profile position of section tunnel

表1 地层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of strata

	密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	粘聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	弹性模量 / MPa	泊松比
素填土	1.91	10	12	3.25	0.35
粘土	1.85	21.1	20.2	15	0.3
中粗砂	1.98	30	0	22	0.28
可塑状砾质粘性土	1.74	14.2	23.2	25	0.3
硬塑状砾质粘性土	1.82	18.7	24.3	45	0.28
全风化花岗岩	1.85	30	28	70	0.27
强风化花岗岩	1.9	50	30	120	0.25
中风化花岗岩	2.6	3000	38	3000	0.22

4 盾构上跨既有隧道数值模拟计算和分析

4.1 模型建立和参数选取

采用岩土隧道结构有限元软件 Midas-GTS 建

立数值模型,重点分析盾构施工各个步骤对既有地铁隧道的影响,根据1号线与9号线的相对位置,为避免边界条件对分析结果的影响,取模型长60 m,宽45 m,高30 m,计算模型界面上的边界条件(除地表)分别约束该方向上的平动自由度,计算模型如图4所示.

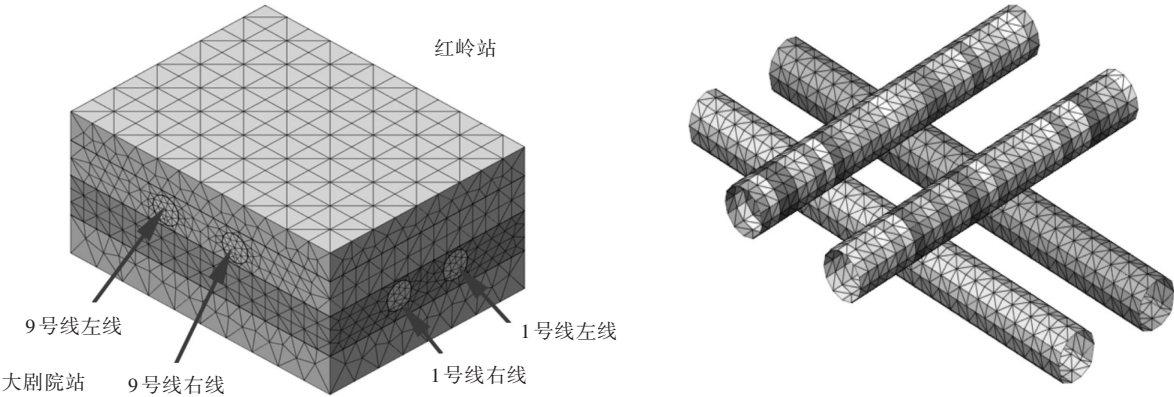


图4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical simulation model

模型基本假定:采用三维实体 Mohr-Coulomb 本构模型,初期支护包括格栅钢架与喷射混凝土,按弹性模量等效的原则折算成具有一定弹性模量的梁单元<sup>[12]</sup>,模型中,初期支护采用梁单元弹性模型.为了形象的反应施工的过程,在分析中,拟定开挖时荷载释放 50%,加载管片时荷载释放 50%.

数值计算过程中,应力—应变关系和强度准则是否较准确的模拟岩土的材料行为和变形,直接决定了数值模拟的精度. Mohr - Coulomb 模型作为一种传统的固体材料弹塑性的本构模型可以反映在土体开挖中施工的应力路径,一些室内试验结果表明,该破坏准则与实际试验结果非常接近,其反应的岩土材料的剪切破坏特性也与材料的实际破坏情况较为符合<sup>[13]</sup>. 本文采用线弹性模型模拟土体弹性变形阶段,采用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟土体塑性变形,利用 Midas-GTS 有限元软件研究地铁 9 号线上跨既有 1 号线的盾构施工过程是合适的.

施工步骤定义如下:首先进行初始地基应力分析;而后修建 1 号线矿山法隧道;再开挖 9 号线左线盾构隧道(每次向前推进 1.5 m—1 环管片);再后修建 9 号线右线盾构隧道(每次向前推进 1.5 m—1 环管片).

下面选取如下 6 个典型步骤分析 9 号线盾构隧道上穿 1 号线矿山法隧道时对矿山法隧道产生的影响.

步骤一:9 号线左线盾构隧道推至 1 号线矿山法隧道右线正上方时;

步骤二:9 号线左线盾构隧道推至 1 号线矿山法隧道左线正上方时;

步骤三:9 号线左线盾构隧道推至模型边界;

步骤四:9 号线右线盾构隧道推至 1 号线矿山法隧道右线正上方时;

步骤五:9 号线右线盾构隧道推至 1 号线矿山法隧道左线正上方时;

步骤六:9 号线右线盾构隧道推至模型边界.

#### 4.2 计算分析与结果

下部的 1 号线既有隧道主要承受上覆地层重量及地面荷载产生的竖向压力,及开挖过程中盾构对地层产生的压力. 随着上部的 9 号线盾构推进,在上下隧道交叉点位置下部的 1 号线隧道出现向上的隆起,远离交叉点的两侧 1 号线隧道出现向下的沉降. 限于篇幅,本文仅给出典型步骤一,步骤三、步骤四、步骤六的数值分析结果,以体现盾构施工过程对下部隧道的影响.

数值计算分析 1 号线变形云图结果见图 5.

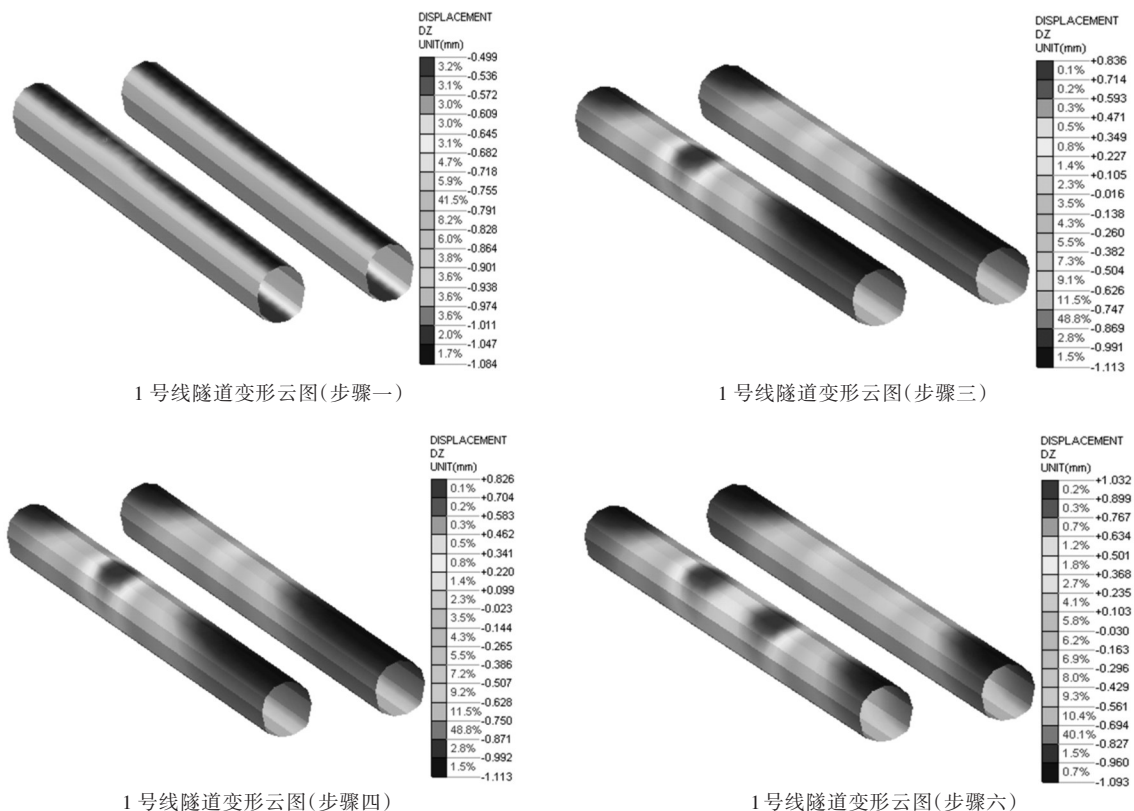


图5 数值计算结果(隧道变形)

Fig. 5 Numerical simulation results(tunnel deformation)



4.2.1 盾构施工对既有线竖向变形的影响 为研究盾构对先后上跨的1号线左、右线的竖向变形影响,将盾构与1号线右、左线交叉点拱顶竖向位移对比见图6。

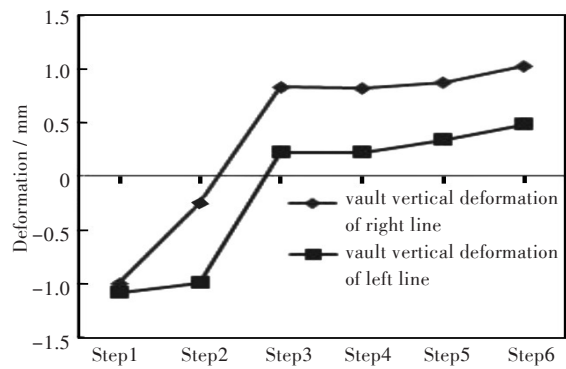


图6 数值计算结果(竖向)  
Fig. 6 Numerical simulation results(vertical)

从图6对比可以看出随着上跨9号线盾构的掘进,既有隧道整体呈上浮趋势(正值代表上浮)。当盾构推进至1号线右线上方时,既有的1号线右线开始上浮,盾构推至1号线左线外轮廓后1号线右线上浮基本稳定,当9号线双线通过后,1号线右线上浮达到峰值1.032 mm;当9号线右线盾构穿越1号线上方时,1号线右、左线的变形影响变化规律一致,但是可以看出1号线右线拱顶竖向变形大于左线竖向变形,盾构施工对1号线右线的影响大于对1号线左线的影响,即竖向上盾构对先穿越的隧道的影响大于后穿越的隧道的影响。

4.2.2 盾构施工对既有线水平变形的影响 为研究盾构对先后上跨的两个隧道的水平变形影响,将1号线右、左线水平位移对比见图7。

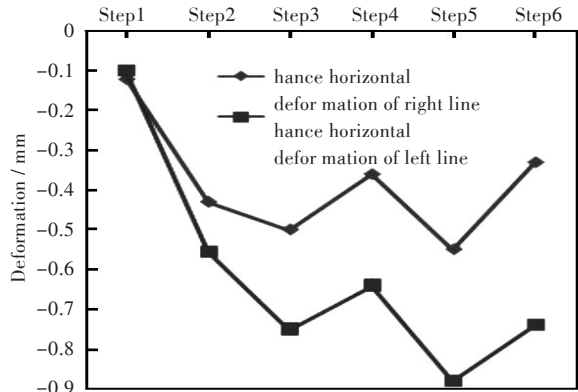


图7 数值计算结果(水平)  
Fig. 7 Numerical simulation results(horizontal)

新建地铁9号线盾构推进过程中不仅对既有1号线隧道产生竖向的影响,也会产生水平向的影响,数值模拟计算的结果表明:整体上既有1号线

产生沿着盾构推进方向的水平变形(峰值为0.94 mm),随着盾构推进既有1号线隧道偏移量累积增加。当9号线盾构脱离影响范围后,1号线水平位移有所回调,从图7可以看出,盾构施工对1号线左、右线的影响变形规律大致一致,但是对左线的影响大于右线,即水平方向上盾构对先穿越的隧道的影响小于后穿越的隧道的影响。

5 自动化监测结果对比与分析

施工监测作为盾构施工过程中的重要一环,它既是隧道施工安全的保证,又是对盾构参数及洞内注浆进行调整的重要依据,而且积累完整准确的地下工程开挖与支护监测结果,对于总结工程经验,完善设计很有价值。本工程为确保上部盾构施工隧道和下部既有线运营安全,考虑到1号线运营要求采用自动化监测的方案,利用夜间非运营时段在1号线洞内布置测点,测点现场布置图见图8。下面结合自动化监测数据对既有线变形规律进行分析对比。

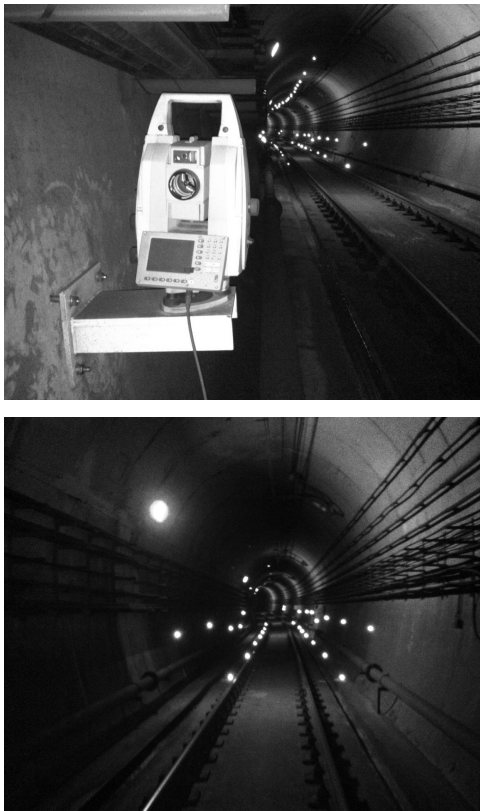
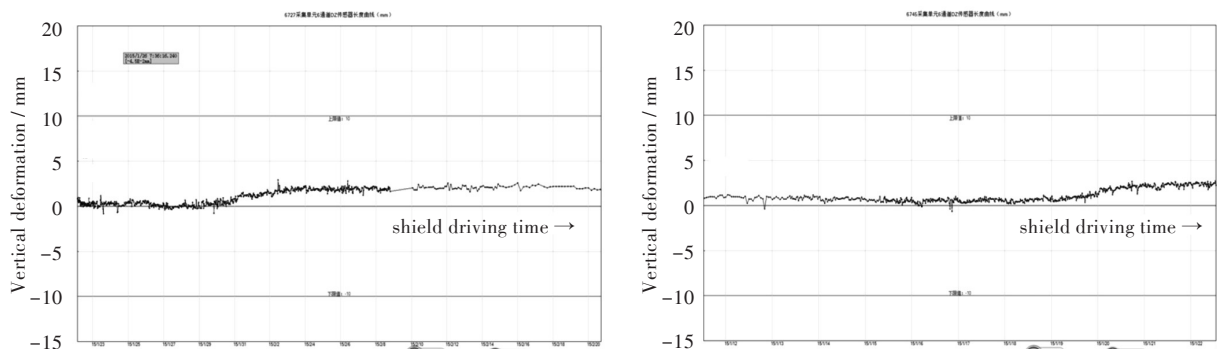
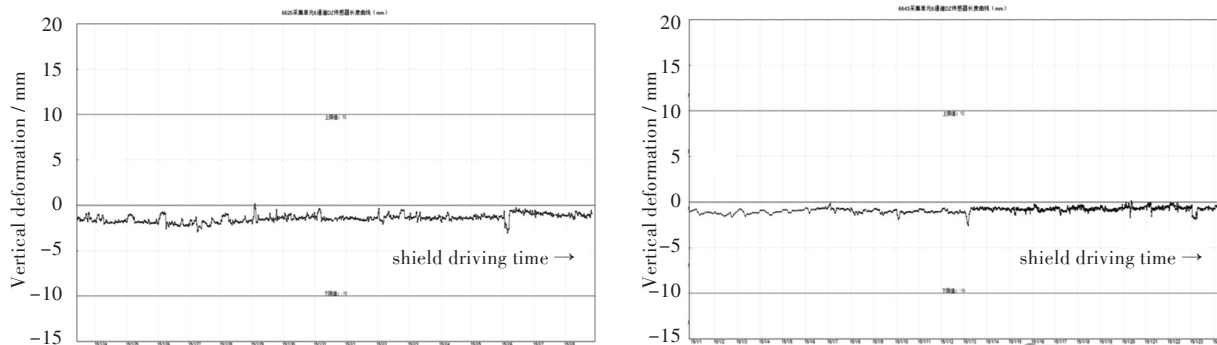


图8 自动化监测现场照片  
Fig. 8 Photo of automatic monitoring sites

1号线与9号线盾构四个交叉点拱顶位置(6727/7545/6643/6625测点)自动化监测的时程曲线如图9。



(a) 9号线左线与1号线右线交点(6727/6745测点)监测曲线



(b) 9号线左线与1号线左线交点(6643/6625测点)监测曲线

图9 自动化监测结果

Fig. 9 Automatic monitoring results (a) Monitoring curve of intersection point between L9 left line and L1 right line; (b) Monitoring curve of intersection point between L9 left Line and L1 left line

从自动化监测结果看出,最大竖向位移(隆起)发生在先穿越的1号线右线拱顶位置(6727测点和6745测点)最大位移分别为2.9 mm和2.1 mm,而对于后穿越的1号线左线的拱顶(6643测点和6625测点)最大位移仅为0.1 mm和0.12 mm;从上述分析可以看出盾构施工对先上跨的1号线

右线的影响明显大于对后通过的1号线左线的影响,这一结论与数值模拟结论相符。

为反映数值模拟计算结果的可靠性,下面将盾构与既有线右线两个交叉点拱顶6745和6727测点的数值模拟计算结果与自动化监测结果对比如图10。

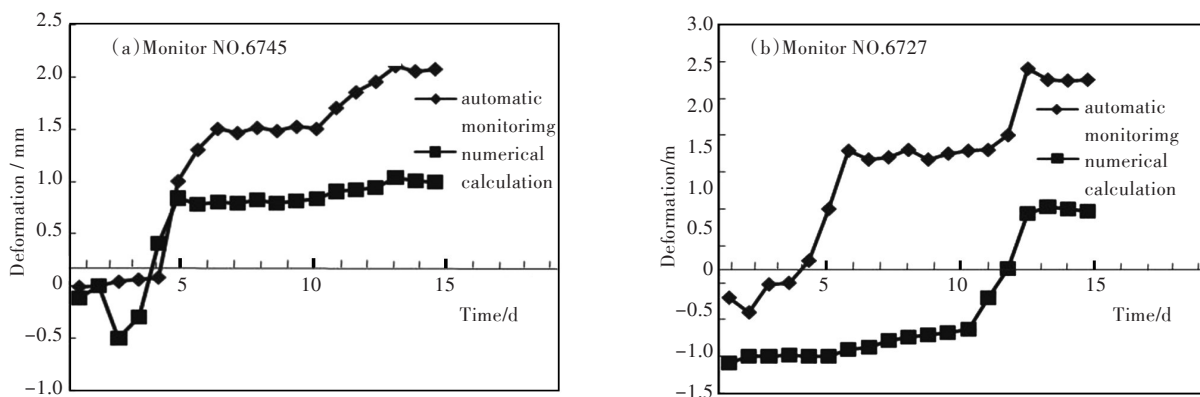


图10 自动化监测与数值计算结果对比 (a)测点6745;(b)测点6727

Fig. 10 Comparison between automatic monitoring and numerical calculation (a) Monitor NO. 6745; (b) Monitor NO. 6727

从图10对比可以看出:盾构与既有线的交叉点拱顶竖向变形的数值模拟计算结论基本上符合既有线的实际变形情况,两者反映的变化规律一

致。由于理论模拟时简化了实际的施工过程,导致结果上有一定的偏差;施工中的操作不同也可能导致既有线偏移的突然改变。但可以得出结论:数

值模拟的结果与既有有线实际偏移的基本趋势是相符的;实际偏移幅度与数值模拟的结果偏差在工程可接受的范围内。

## 6 结 语

该区间已于2014年底顺利洞通,穿越过程中下部1号线正常运营未受到影响,1号线隧道的变形控制在较小的范围内,该工程实践证实盾构以小间距上跨既有有线施工的可行性,结合该工程实践可以总结以下经验:

1)随上部盾构隧道的掘进,竖向上:既有拱顶由沉降逐渐产生向上隆起变形,隆起值最大位置位于上下隧道交叉点,盾构对先穿越的既有隧道影响大于后穿越的隧道;水平向上:既有隧道整体产生沿着盾构推进方向的水平位移,盾构通过影响区后水平变形稳定,盾构对先穿越的既有隧道影响小于后穿越的隧道;盾构施工对既有有线水平方向的变形明显小于竖向变形影响。盾构参数及措施选取得当的情况下可以控制下部既有隧道的最大位移变化值均满足要求 $\leq 20$  mm。

2)自动化监控量测的数据与数值模拟的结果变形规律一致,且均在一个数量级误差在工程可以承受的范围之内。证明数值模拟的结果对工程实施是可靠的。

3)盾构穿越对既有有线的影响范围主要在盾构与既有有线交叉点两侧各1倍洞径范围内,在范围外盾既有线的受到盾构施工影响较小。

4)本工程案例对盾构以 $90^\circ$ 正穿既有有线,且地层相对较稳定,本文总结相关经验可供类似工程情况参考,对于上跨隧道以大角度跨斜穿既有隧道及地层软硬变化较大时适用性尚有待验证。

### 参考文献:

- [1] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都:西南交通大学,2003.
- [2] 瞿婧晶. 软土地基中盾构近距离上穿越已建隧道的变形效应研究—以南京明园地下过街通道上穿越南京地铁二号线为例[D]. 成都:成都理工大学,2012.
- [3] LOK W, CHONG L K, LEUNG L F. Field instrumentation of a multiple tunnel interaction problem[J]. *Tunnels and tunnelling*, 1998(18):4-16.
- [4] 李磊,张孟喜,吴惠明,等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2014,36(6):1036-1043.  
LI L, ZHANG M X, WU H M, et al. Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunneling on deformation of existing tunnels[J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2014,36(6):1036-1043.
- [5] 陈越峰,张庆贺,季凯,等. 盾构下穿越施工对已建隧道沉降的影响[J]. *地下空间与工程学报*, 2011,11(7):1491-1495.  
CHEN Y F, ZHANG Q H, JI K, et al. The influence of shield tunneling construction on settlement of existing adjacent tunnel above [J]. *Chinese journal of underground space and engineering*, 2011, 11(7): 1491-1495.
- [6] 樊华真. 盾构法地铁隧道近距离穿越地铁既有运行线施工技术[J]. *施工技术*, 2014,43(13):103-107.  
FAN H Z. Construction technology of subway tunnel cross the operation subway with small distance[J]. *Construction technology*, 2013,43(13): 103-107.
- [7] 陈旭明. 盾构穿越矿山法隧道施工过程管片结构受力特征研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2013.
- [8] 孙波,肖龙鸽,江华,等. 深圳地铁并行叠落隧道施工相互影响的数值模拟分析[J]. *隧道建设*, 2015,35(7):616-622.  
SUN B, XIAO L G, JIANG H, et al. Numerical simulation of mutual influence in construction of parallel overlapping tunnels of Shenzhen metro [J]. *Tunnel construction*, 2015,35(7): 616-622.
- [9] 张治国,张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013,32(7):3429-3439.  
ZHANG Z G, ZHANG M X. Deformation prediction of subway tunnel induced by EPB shield in soft clay during above and down overlapped process and its construction control[J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2013,32(7): 3429-3439.
- [10] 李辉. 上跨隧道对既有隧道的变形影响及控制研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
- [11] 上原精治,土居洋一. 既設トンネル(隧道)近接施工対策マニュアル[M]. 日本:铁道综合技术研究所,平成8,9
- [12] 李术才,朱维申,陈卫忠. 弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 466-470.  
LI S C, ZHU W S, CHEN W Z. Application of elasto-plastic large displacement finite element method to the study of deformation prediction of soft rock tunnel [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2002,21(4): 466-470.
- [13] 刘纪峰,刘波,陶龙光. 基于弹塑性分析的浅埋盾构隧道地表沉降控制[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2009,25(1):28-33.  
LIU J F, LIU B, TAO L G. Prediction and control of shallow shield tunneling --induced ground settlement with elasto-plasticity analysis[J]. *Journal of Shenyang jianzhu university*, 2009,25(1): 28-33.

本文编辑:龚晓宁