

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.039

# 盾构上穿下既有双线隧道相互作用机制的 三维数值分析

张宝刚<sup>1</sup>, 谢家冲<sup>2\*</sup>, 黄昕<sup>2</sup>

(1. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510665; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海市 200092)

**摘要:**为了探究隧道在穿越双线过程中既有双线间的协同变形与相互作用机理, 依托深圳某输水隧洞上穿既有地铁区间工程, 并建立模拟穿越全过程的三维数值模型。基于实测数据验证模型的有效性, 讨论既有双线间的土-结构相互作用机理。研究表明: 既有双线间存在协同变形作用, 相比于穿越单线, 穿越双线为更不利情况; 后穿越的上行线对下行线的影响较小, 主要作用于穿越期间; 先被穿越的下行线对上行线的影响较大, 且影响贯穿穿越上行线全过程; 与穿越单线相比, 穿越双线对既有隧道的变形趋势、地表沉降也有明显的影响。

**关键词:**盾构隧道; 隧道穿越; 既有双线; 相互作用; 数值模拟

**中图分类号:** U455

**文献标志码:** A

## 0 引言

市政隧道管网的建设与优化是城市更新的重要内容之一, 但在城市中既有地下管网密布, 新建工程不可避免地需要考虑其穿越对周边既有结构的影响。针对由此带来的新建结构施工安全、既有隧道运营安全的问题, 专家学者们提出安全保护区<sup>[1-2]</sup>、穿越影响范围<sup>[3-8]</sup>等概念, 在各类穿越工程中得到了广泛应用。

然而, 越来越多的工程案例表明穿越工程并不再是一条新建隧道与一条既有隧道的简单组合, 在穿越过程中参与土与结构相互作用的新旧地下结构可能超过两个<sup>[9-11]</sup>。例如: 张孟喜等<sup>[12]</sup>给出佛莞城际铁路盾构双线上部穿越广州地铁七号线工程, 结果表明在盾构二次穿越后, 既有线路的曲线形态由近似正态分布曲线向“M”双波峰形转变; 蔡伟阳等<sup>[13]</sup>针对上海新建11号线双线夹穿地铁4号线的工况展开实例分析, 实测结果表明既有隧道管片处于浮沉交替的状态, 产生的最大变形量并非最终沉降量; 马健

等<sup>[14]</sup>给出杭州地铁4号线盾构近距离多次下穿既有地铁1号线案例, 指出在多次穿越同一既有隧道时, 对新建隧道也要加强监测, 防止既有隧道变形过大; 刘颖彬等<sup>[15]</sup>依托上海地铁14号线盾构下穿地铁6号线双圆隧道为工程背景展开实测分析, 并指出第2次穿越变形明显大于第1次, 且变形时间更长, 另外2次穿越引起的最大变形位置也有所不同。另外也有学者对此类多线穿越问题展开了试验研究, 谢雄耀等<sup>[16]</sup>对重叠隧道盾构施工对既有线路的影响展开了模型试验, 结果表明先下后上的施工顺序安全性要好于先上后下的施工顺序方案; 黄德中等<sup>[17]</sup>针对新建隧道上部穿越双线的情况展开了离心机试验研究, 结果表明既有双线隧道的竖向变形存在显著的时空效应, 新建盾构掌子面正下方既有隧道的抬升量明显大于另一条既有隧道。

综上所述, 多条隧道相互穿越的问题的复杂程度要远大于单线穿越单线的情形。在穿越多条既有隧道的情况下, 既有研究主要聚焦于两条线路在穿越过程中的沉降差异, 但既有双线间的相互影响却被忽略。在新建隧道穿越影响下, 双线的响应差异

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 41877227); 上海市科技创新行动计划项目(编号: 19DZ1201004)

作者简介: 张宝刚, 男, 高级工程师. E-mail: 24383508@qq.com

\*通信作者: 谢家冲, 男, 博士研究生. E-mail: 2111355@tongji.edu.cn

与新建隧道的区位关系有较大关联,但对既有双线的协同变形与相互作用机理分析尚不清晰。

据此,本文依托深圳某新建输水隧洞上部穿越既有地铁双线案例,建立穿越全过程的三维数值模型,对穿越单、双线的隧道变形与地表沉降展开对比分析,说明先穿线与后穿线之间的相互影响机理,研究成果可为复杂多线穿越过程中的土-结构相互作用研究提供参考与借鉴。

## 1 穿越工程概况

### 1.1 新建盾构隧道概况

新建盾构隧道项目为深圳市南山区某引排水隧洞工程,区间总长度约为 3.3 km,采用复合式土压平衡盾构机施工,于 2020 年 1 月开工。新建隧道盾构机刀盘直径 6.98 m,隧道采用“5+1”通用管片设计,由 3 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块构成,管片外径 6.7 m,内径 6 m,衬砌管片宽度为 1.5 m,混凝土强度等级为 C50。

### 1.2 上穿既有地铁线路工程概况

新建盾构隧道于 2021 年 7 月先后穿越下行线与上行线,穿越位置关系与典型地质剖面如图 1 所示。新建隧道下侧距离既有地铁区间隧道结构约 7.35 m,穿越夹角约 75°。既有双线为盾构区间,由通用环错缝拼装而成,衬砌结构内径为 5.4 m,外径为 6 m,既有双线线路方向平行,埋深一致,隧道中心间距离约 14 m。为了实时监测上部穿越工程对既有运营中地铁线路的影响,本次在双线区间的穿越位置附近 30 m 范围内布置自动化观测点(DM1~DM13),每 5 环布置一个监测断面,监测时间从 2021 年 6 月 14 日开始至 8 月 4 日结束。

该穿越工程的地层条件为典型的上软下硬地层,地下常水位为 -3 m。在穿越位置取地质剖面,从上往下依次为①<sub>2</sub>素填土、②<sub>3</sub>砂质黏土、⑤<sub>1</sub>全风化花岗岩、⑤<sub>2</sub>强风化花岗岩、⑤<sub>3</sub>弱风化花岗岩和⑤<sub>4</sub>微风化花岗岩地层。由地质剖面图可知既有隧道区间埋深约 21.55 m,围岩为⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>和⑤<sub>3</sub>风化花岗岩,其中⑤<sub>1</sub>和⑤<sub>2</sub>表现为软弱的砂砾土性质,新建盾构隧道埋深约 7.5 m,地层土体为②<sub>3</sub>砂质黏土。

### 1.3 对既有线路的影响实测分析

通过对监测数据整理分析发现,在 2021 年 7 月 17

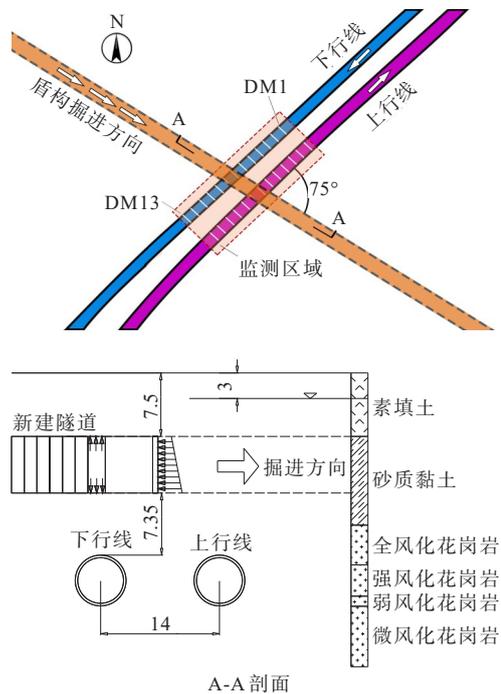


图 1 上穿相互位置关系与地质剖面示意图(单位:m)

日前既有隧道监测数值表现平稳,未受到上部穿越的明显影响。随着新建隧道的掘进,先穿越的下行线在穿越前受盾构掌子面挤压表现出明显沉降,最大值超过 1 mm,上行线在其间同样产生沉降,但幅度较小;在刀盘到达下行线前,双线受到上方开挖卸载同步产生大幅隆起,隆起幅度分别为 1.3 mm 和 1.1 mm;而后在穿越上行线过程中下行线未表现出明显隆起,此时上行线仍受到明显的开挖卸荷效应的影响,各个监测点位出现不同程度的上浮;在穿越完成后,下行线在一定范围内出现小幅波动,而上行线呈现明显的持续下降,除了考虑是盾尾注浆压力的持续影响外,围岩较大的回弹模量、固结沉降均是影响因素。

上述实测结果表明:双线在上部穿越前、中、后期均受到新建盾构隧道的影响,同时也可以据此推测出双线间相互作用与协同变形。在穿越下行线前,新建盾构隧道对双线的影响主要作用于先穿越的下行线,穿越过程中双线由于距离较近表现出协同变形的趋势。而后在穿越上行线过程中,新建隧道掘进的影响主要作用于上行线,导致其出现二次上浮和横向变形。其中双线间的影响机理、范围与大小值得进一步探究,因此下文基于该工程案例建立全过程的三维穿越数值模型,基于参数分析探明其中的土与结构相互作用机理。

## 2 三维穿越数值模型建立

### 2.1 基本模型参数

为了准确模拟新建盾构隧道穿越前后全过程,建立地层整体三维有限元模型,模型尺寸为 $X \times Y \times Z=140 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,如图2所示。其中新建隧道掘进方向为 $X$ 正方向,新建隧道与既有区间的相对位置夹角取 $75^\circ$ 。既有隧道通过板单元模拟,衬砌厚度与实际一致,在模拟中通过刚度折减的方法等效既有隧道衬砌的非连续性,基于既有文献成果并根据隧道工程周围地层土体条件,横向与纵向的刚度有效率分别取 $0.8^{[18]}$ 与 $0.2^{[19]}$ 。

数值模型计算步骤共72个分析步,依次为初始地应力平衡、既有隧道激活、既有隧道开挖和69个新建盾构隧道掘进。为了消除边界效应的影响,从 $X=0$ 开始共设置10环已施作完成的衬砌,在此基础上向前

推进75环,其中盾构机与注浆环占6环的衬砌长度。

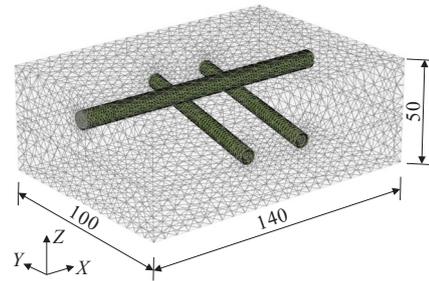


图2 三维模型网格划分图(单位:m)

### 2.2 地层模型参数

本例工程为典型的上软下硬的地层条件,地层岩土体根据软弱程度分别通过小应变土体硬化模型(HS-small Model)和摩尔-库仑模型(Mohr-Coulomb Model)模拟。其中⑤<sub>3</sub>弱风化花岗岩和⑤<sub>4</sub>微风化花岗岩表现为性质较好的岩体性质,采用Mohr-Coulomb模型模拟,其余岩土层均通过HS-small模型模拟。各类岩、土层的物理力学参数如表1所示。

表1 土层与岩层物理力学参数

地层编号	天然密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	$\varphi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$r_{0.7}/10^{-4}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	$m$	层厚/ m
① <sub>2</sub>	1 520	1 830	0.2	22.7	10	50.0	30.0	2	—	0.8	7.5
② <sub>3</sub>	1 480	1 860	0.2	30.0	5	40.0	20.0	2	—	0.8	10.5
⑤ <sub>1</sub>	1 460	1 800	0.2	35.0	1	50.0	25.0	2	—	0.8	4.7
⑤ <sub>2</sub>	1 550	1 870	0.2	35.0	2	53.9	26.9	2	—	0.8	3.7
⑤ <sub>3</sub>	2 540	2 650	0.3	48.0	350	—	—	—	1.0	—	2.2
⑤ <sub>4</sub>	2 630	2 640	0.3	55.0	500	—	—	—	10.0	—	21.4

注: $c$ 和 $\varphi$ 为黏聚力与内摩擦角,在HS-small模型中均为有效指标,在⑤<sub>3</sub>和⑤<sub>4</sub>中 $\varphi$ 值为试验获得的等效内摩擦角指标; $G_0^{\text{ref}}$ 为初始参考剪切模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为参考加卸载模量; $r_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变; $m$ 为与模量应力水平相关的幂指数,取0.8。

### 2.3 盾构隧道掘进模拟

在三维穿越模拟中准确处理新建盾构掘进是关键,本文通过在每个分析部位中激活或杀死不同的单元与荷载来实现盾构隧道逐步推进的过程,掘进示意图如图3所示。考虑到盾构机与衬砌外壁间存在孔隙,在盾构机体部分向盾尾依次设置逐渐变大的隧道收缩,盾尾的隧道收缩值为0.5%;盾尾注浆压力在隧道顶部取 $0.3 \text{ MPa}$ ,由上往下增量值为 $20 \text{ kN/m}$ ;掌子面支护压力根据地层压力在隧道顶部取 $135 \text{ kPa}$ ,由上往下增量值为 $18 \text{ kN/m}$ ;在注浆环后激活实体衬砌单元,衬砌混凝土简化为线弹性非多孔材料,重度为 $25 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量取 $34.5 \text{ GPa}$ ,泊

松比取0.16。

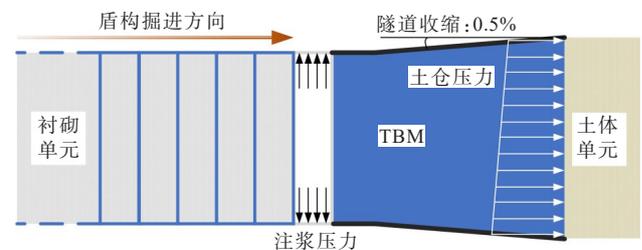


图3 盾构掘进过程模拟

### 2.4 基于实测的数值模型验证

图4给出数值与实测沉降时程曲线对比。由于总体隆起量小,实测结果存在一定误差,这里基于上

行线穿越位置4个测点结果来验证模型的有效性。根据实际盾构掘进速度,按一天推进5环的速度将数值模拟结果与实测结果对比,可见计算得到的时程曲线在趋势上与实测值基本保持一致,在穿越前出现小幅沉降,最大沉降量为0.1 mm,小于实测结果,分析原因可能是数值模拟中根据单一的钻孔结果将既有隧道的下部围岩作为压缩性小的⑤<sub>3</sub>风化岩层,相对坚硬的基床减小了在穿越前期受盾构掌子面挤压而导致的沉降,而实际下部围岩条件可能不如在地层模型中考虑的完整、坚硬。期间主要隆起量发生于盾构穿越上行线阶段,最大抬升量达1.16 mm。总体来说数值计算得到的时程曲线在趋势上与实测值保持一致,可以基于模型开展后续的参数分析。

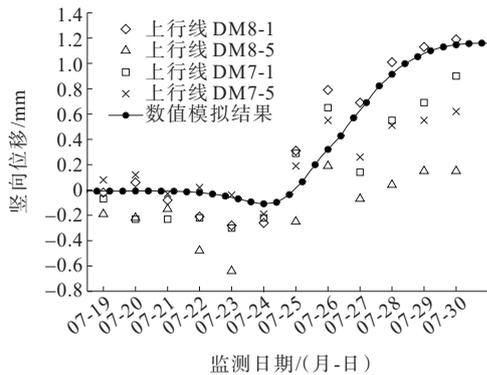


图4 数值模拟与实测沉降时程曲线对比(2021年)

### 3 双线相互作用机理分析

为了探明既有双线在上部穿越过程中的相互作用机理,参数分析在原工况的基础上考虑分别移去上、下行线的穿越单线情况,基于隧道变形与地层沉降等结果展开讨论。

#### 3.1 上行线对下行线的影响

图5~7给出原工况与穿越单条下行线的纵向沉降与时程曲线(穿越位置处)对比,其中图5表明了各个穿越阶段的相互位置关系。由图6可见:上行线对先被穿越的下行线的影响主要作用于穿越期间,在开挖至15环前即先期沉降期间该影响很小;在开挖至30环(新建盾构到达上行线)时,原工况与移去上行线的最大隆起差异仅为0.01 mm;穿越完成后该差异值增加至0.08 mm,因此从该角度分析在穿越双线过程中,上行线的存在对先穿越的下行线不利影响较小。

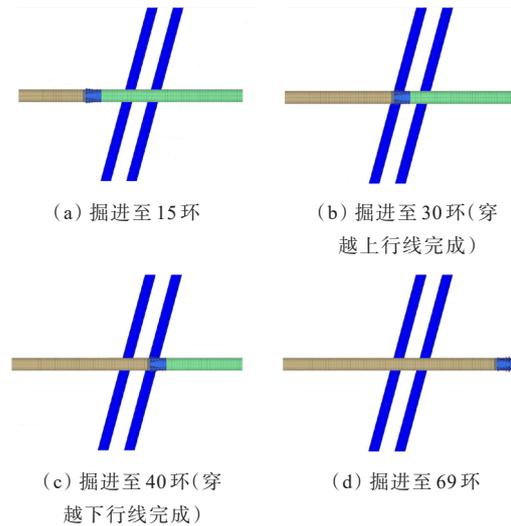


图5 新建盾构隧道掘进阶段示意图

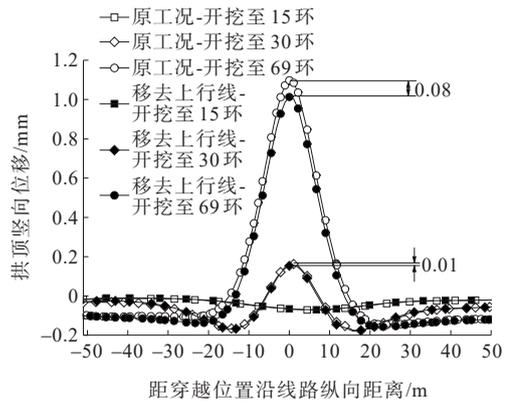


图6 下行线纵向沉降曲线

图7给出的时程曲线更好地呈现各个穿越阶段上行线对下行线的影响。在先期沉降阶段,有无上行线的拱顶沉降差异值仅为0.005 mm,在该阶段对拱底沉降与收敛值的影响不明显。在穿越过程中隧道出现大幅隆起,也在该阶段有无上行线的沉降差异值明显增加,拱顶和拱底沉降差异值增加至0.08 mm和0.03 mm。穿越过程中下行线呈现竖鸭

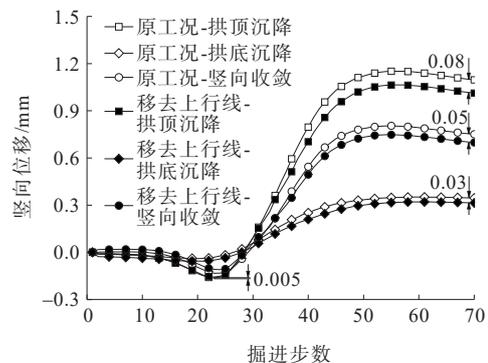


图7 下行线位移时程曲线

蛋变位趋势,移去上行线后收敛值由0.75 mm下降至0.70 mm。

### 3.2 下行线对上行线的影响

图8、9给出后被穿越的上行线的纵向沉降与穿越位置处的时程曲线,可见先被穿越的下行线对上行线的影响更大,作用时程涉及穿越上行线前后。由图8可见:在开挖至40环即新建盾构开始穿越上行线时,此时有无下行线的影响差值达0.14 mm,而开挖至69环即在穿越完成后该值增至0.16 mm。对比图6的结果,可见在穿越双线过程中,先穿越的下行线对上行线有更大影响。从图9可见:在先期沉降阶段,移去下行线后最大沉降值由-0.1 mm增大至-0.18 mm,变化量达到最终拱顶沉降变化值的50%,表明了先穿越的下行线在先期沉降阶段对上行线具有一定保护作用,在穿越阶段却加剧了上行线的上浮量。移去下行线后上行线的收敛变形有减小趋势,竖向收敛由0.78 mm减小至0.66 mm,同样也是由于拱顶位置的沉降量减小所致。

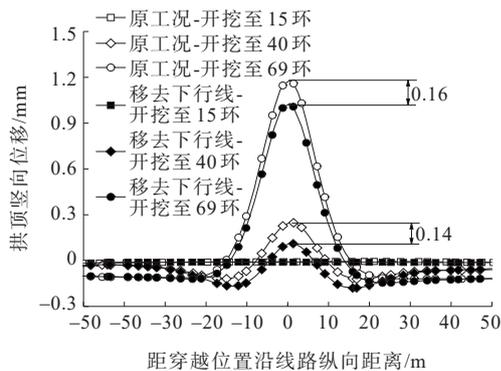


图8 上行线纵向沉降曲线

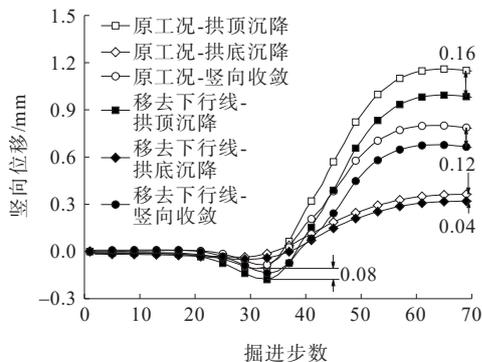


图9 上行线位移时程曲线

### 3.3 双线间相互作用

图10给出了穿越完成后的双线变形图,双线在穿越位置均出现了隆起槽与竖鸭蛋的变位趋势。将

原工况与分别移去双线的变形图作对比,可见上线在穿越位置在侧向上存在相互靠拢的趋势,但这个侧向的靠拢增量较小(考虑到变形图已放大5 000倍),如图中箭头所示。

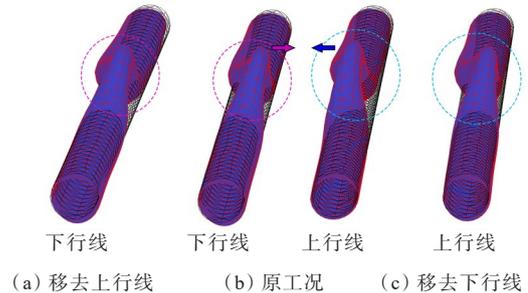


图10 既有双线变形图(变形放大5 000倍)

上穿工程中的地表沉降主要由盾构开挖引起,但下部的既有线路对地表沉降仍有一定程度的影响,如图11所示。地表沉降曲线总体呈现出中间小、两边大的盆形沉降槽,表明该模型在X方向上受到边界效应,盾构开挖的影响带来的地表沉降约为17 mm。与原工况相比,分别移去上、下行线的沉降曲线出现了较大起伏,规律总结为在保留的线路上方沉降值较小,而在线路两侧由于隧道的上浮,两侧的土体有向隧道下方移动的趋势,从而出现隧道两侧的沉降相对较大的结果,各自呈现出单线影响下的“W”形沉降槽模式,如图中的点划辅助线所示。而在双线的共同作用下,沉降曲线则趋于平稳,在双线上方的沉降值仅略有减小。

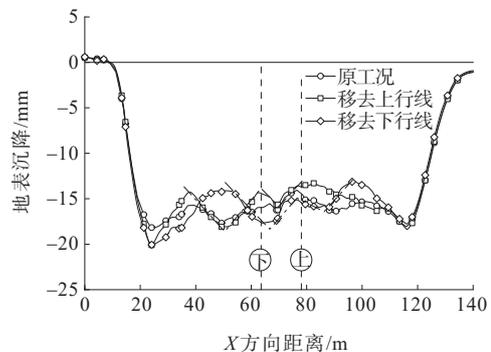


图11 地表沉降曲线(推进至69环)

## 4 结果与讨论

本文依托深圳某引水隧洞上穿既有地铁双线工程案例,建立考虑新建盾构隧道上部穿越的全过程三维数值模型,分析盾构穿越过程对双线的影响,可

以得出以下结论:

(1) 在穿越下行线前,新建盾构隧道对双线的影响主要作用于先穿越的下行线,穿越过程中双线由于距离较近表现出协同变形的趋势。穿越上行线后,新建隧道掘进的影响则主要作用于上行线。

(2) 通过移去上、下行线与穿越双线的原工况数值模拟结果对比表明:仅穿越上、下行线单线时最终隆起量均减小,体现了双线间的协同变形作用,总体来说穿越双线为更不利情况。具体表现为:上行线对先被穿越的下行线的影响较小,主要作用于穿越期间,有无上行线对下行线最终沉降量的影响差异仅为 0.08 mm;先被穿越的下行线对上行线的影响较大,且作用时程涉及穿越上行线前后,在前期沉降阶段下行线对上行线具有一定保护作用,在穿越阶段则加剧上行线的上浮,有无下行线对上行线最终沉降量的影响差异为 0.16 mm。

(3) 相比于穿越单线,穿越双线中既有双线在穿越位置有相互靠拢的趋势,但靠拢量并不显著。穿越单双线的地表沉降也存在明显差异:穿越单线时既有隧道上方的地表沉降呈现明显的“W”沉降槽,而穿越双线的地表沉降则趋于平稳,双线上方的沉降值仅略微小于两侧。

#### 参考文献:

- [1] 庄正勇,俞璐怡,王京元.基于安全影响因素的地铁安全保护区范围划定探讨[J].现代城市轨道交通,2018(12):55-58,62.
- [2] 王思伟,林立科.盾构隧道下穿铁路刚架桥安全影响分析[J].中外公路,2021,41(3):251-256.
- [3] 王超东,赖鹏安,曹洋,等.上下斜交盾构隧道施工净距对既有隧道影响的模型试验研究[J].中外公路,2020,40(5):231-236.
- [4] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等.基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J].岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [5] 刘波,范雪辉,王园园,等.基坑开挖对邻近既有地铁隧道的的影响研究进展[J].岩土工程学报,2021,43(S2):253-258.
- [6] 尹子豪.土层特性及注浆对盾构上穿引起既有隧道变形影响分析[J].中外公路,2022,42(2):197-203.
- [7] 汲红旗,宋中华,刘维正等.地铁盾构隧道下穿运营铁路框架桥影响分析与施工对策研究[J].中外公路,2021,41(6):204-210.
- [8] 王景春,薛佳龙,霍东辉等.基于TOPSIS法的老龙头浅埋连拱隧道施工方案优选研究[J].中外公路,2022,42(2):173-178.
- [9] 朱润田.地铁列车荷载对上覆高速公路影响的数值模拟[J].中外公路,2021,41(3):221-226.
- [10] 莫坤,代家宝,罗丽娟等.厚填土平台下近邻既有双连拱地铁隧道关键施工技术研究[J].中外公路,2022,42(3):160-166.
- [11] 王雷.盾构施工下穿既有隧道安全风险分析与控制[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [12] 张孟喜,张靖,吴应明,等.全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J].土木工程学报,2019,52(9):100-108.
- [13] 蔡伟阳,张孟喜,吴惠明.盾构叠交穿越施工引起的既有隧道变形分析[J].上海大学学报(自然科学版),2016,22(6):813-820.
- [14] 马健,李凤涛,袁飞飞,等.盾构近距离多次下穿对既有隧道变形的影响[J].铁道建筑,2016,56(4):64-67,71.
- [15] 刘颖彬,廖少明,陈立生,等.软土盾构近距离下穿地铁双圆隧道变形实测分析[J].隧道建设(中英文),2020,40(10):1462-1470.
- [16] 谢雄耀,牛俊涛,杨国伟,等.重叠隧道盾构施工对先建隧道影响模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2061-2069.
- [17] 黄德中,马险峰,王俊淞,等.软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):520-527.
- [18] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,等.盾构隧道横向刚度有效率研究[J].岩土工程学报,2006,28(1):11-18.
- [19] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等.基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J].岩土工程学报,2015,37(1):83-90.