

地铁盾构小净距上穿既有线变形数值模拟及施工控制^{*}

汤新辉¹ 雷涛² 刘维正^{3**} 艾国平² 戴晓亚³ 郭建明²

(1. 长沙市建设工程质量安全监督站, 410023, 长沙; 2. 中交一公局集团有限公司, 100024, 北京;

3. 中南大学土木工程学院, 410075, 长沙//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:新建地铁施工时,不可避免地会对既有线路周围的地层产生扰动,使既有线路产生一定的变形,进而引发一系列病害问题。为保证既有线路的安全运营,需研究地铁盾构上穿施工引发的既有线路位移变形规律。方法:以长沙轨道交通6号线盾构小净距上穿长沙轨道交通3号线为例,采用FLAC3D软件建立三维数值模型,分析了盾构上穿既有线路过程中,既有线路的竖向变形发展规律,以及环形加固控制措施的加固效果。结果及结论:既有地铁隧道受影响的主要区域为既有隧道和新建隧道的水平投影交叉点附近;当新建盾构隧道施工距离既有隧道左右各12.0 m范围内时,其对既有隧道的影响较大,在此范围内施工时需要着重控制既有隧道的上浮变形;建议加固环数为5环;环形加固结构不改变既有隧道的竖向位移分布规律,可将管片的最大竖向变形降至1.1 mm;加固后,既有拱顶处的最大竖向位移仅为1.3 mm,拱腰处的最大水平位移仅为1.4 mm,各监测断面的位移值均较小;所采取的施工控制措施能够有效减少新建线上穿施工对既有线造成的施工扰动,保证施工安全。

关键词 地铁;盾构;小净距;上穿施工

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.014

Deformation Numerical Simulation and Construction Control for Metro Shield Over-passing Existing Line in Small-clearance

TANG Xinhui, LEI Tao, LIU Weizheng, AI Guoping, DAI Xiaoya, GUO Jianming

Abstract Objective: During new metro line construction, unavoidable disturbances are generated in existing line surrounding stratum, causing certain level of deformation to existing line and subsequently causing a series of disease problems. To ensure existing line safe operation, it is necessary to study

the law of existing line displacement and deformation induced by metro shield tunnel over-passing construction. Method: Taking Changsha Rail Transit Line 6 shield tunnel over-passing Line 3 in small clearance as example, a three-dimensional numerical model is established using FLAC3D software. In the above over-passing process, the existing line vertical deformation development law and the reinforcement effect of circular reinforcement control measures are analyzed. Result & Conclusion: The main affected area of the existing metro tunnel is in the vicinity of the horizontal projection intersection point between the existing and new tunnels. The impact on existing tunnel is significant when the construction distance between the new and existing shield tunnels is within 12.0 meters on each side. Therefore, during construction in this range, it is necessary to focus on controlling the uplift deformation of existing tunnel. It is recommended to use 5 reinforcement rings. The circular reinforcement structure does not change the distribution law of the existing tunnel vertical displacement but can reduce the maximum vertical deformation of the segment to 1.1 mm. After reinforcement, the maximum vertical displacement at existing line arch crown is only 1.3 mm, and the maximum horizontal displacement at the arch waist is only 1.4 mm, with small displacement values observed at all monitoring sections. The adopted construction control measures effectively reduce the construction disturbance caused by the new tunnel over-passing existing line engineering, ensuring the construction safety.

Key words metro; shield; small clearance; over-passing construction

First-author's address Changsha Construction Project Quality and Safety Supervision Station, 410023, Changsha, China

^{*} 湖南省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(KY201943)

^{**} 通信作者

伴随着城市地铁建设规模的不断扩大,新建地铁上穿既有地铁线路的情况越来越多。穿越施工过程中,新建地铁施工不可避免地会对周围地层产生扰动,使既有地铁线路产生变形,进而引发隧道渗漏水、管片错台、螺栓断裂等一系列病害问题。为保证既有线路的安全运营,研究地铁盾构上穿施工引发既有线的变形规律,对既有线路的正常运营和新建盾构隧道的安全施工均具有重要的现实意义。

已有学者针对新建盾构隧道上穿既有线路的问题进行了大量研究。在数值模型方面,文献[1-2]研究了盾构小间距上穿施工时,注浆加固对区间隧道受力变形的影响,以及顶管隧道上穿施工全过程对既有线路的影响。在理论计算方面,文献[3-5]运用 Winkler 地基模型、Timoshenko 梁模型及 Pasternak 地基与弹性地基短梁相结合的方式,分别求得了既有隧道的竖向变形、剪切变形与纵向变形。在模型试验方面,文献[6-7]通过离心模型试验、室内模型试验分别研究了盾构上穿施工过程引起周围土体和隧道竖向位移变化的规律,以及盾构以不同角度上穿施工对既有地铁线路的扰动影响。在现场实测分析方面,文献[8-9]分析了大量隧道上穿既有盾构隧道工程案例的实测数据,研究发现隧道间净距、地层条件及加固措施对既有线路的变形影响较大,注浆可较好地抑制既有线路的变形情况。在新建盾构上穿施工工程的控制措施方面,文献[10-13]研究了底板向下注浆、克泥效注浆、钢骨架加固等加固控制措施,以及自动化实时监测系统、盾构施工参数控制与风险应急推演管理措施等技术手段控制既有线路的变形情况。以上文献多以实际工程为例,针对特定工况进行分析,而对于小净距上穿施工的特殊情况有待进一步研究。同时,现有施工控制措施主要为注浆加固、钢骨架加固等传统方法,加固效果有限且不够方便快捷,因此有必要对环形支撑等新施工控制措施进行研究。

本文以长沙轨道交通 6 号线(以下简称“6 号线”)上穿长沙轨道交通 3 号线(以下简称“3 号线”)隧道工程为例,采用 FLAC3D 软件建立三维数值模型,对盾构隧道上穿既有地铁线路的施工全过程及后期加固过程进行模拟,研究既有线路的纵向位移分布规律,以及 6 号线上穿 3 号线施工过程中既有隧道的竖向位移变化过程,并分析了加固措施对既有隧道变形的控制作用。本文研究可为新建

工程安全施工和既有线正常运营提供理论支持和工程指导。

1 工程概况

1.1 工程背景

在 6 号线朝阳村站—芙蓉区政府站区间,盾构机从芙蓉区政府站西端盾构井、竖井始发,上穿 3 号线区间隧道后进入朝阳村站。6 号线盾构区间与 3 号线位置关系示意图如图 1 所示。上穿区段 6 号线区间盾构隧道结构覆土厚为 10.28 m,6 号线盾构区间与 3 号线交叉点的最小垂直净距约为 1.036 m,其余三处的最小垂直净距约为 1.279 m、1.341 m、1.595 m。6 号线的左右线在该区段的坡度为 29‰ ~ -2‰,隧道拱顶埋深为 10.5 ~ 10.8 m,6 号线的左右线间距约为 18.8 m。3 号线和 6 号线隧道均位于中风化泥质粉砂岩中。

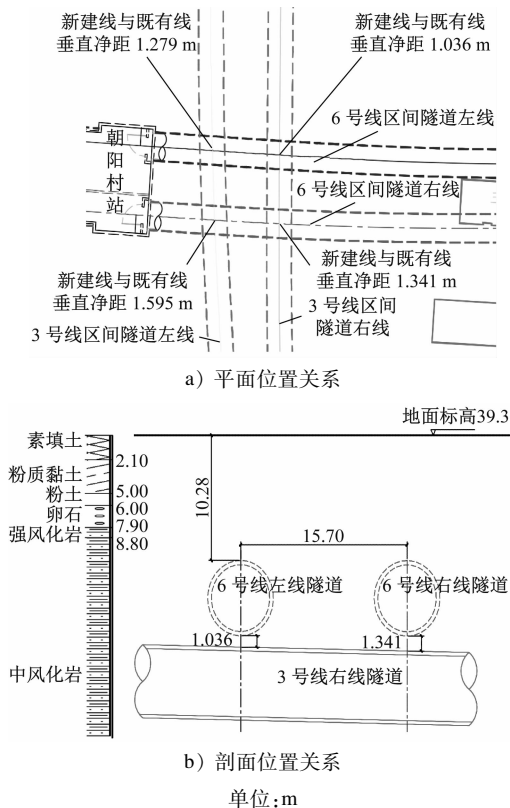


图 1 6 号线盾构区间与 3 号线位置关系示意图
Fig. 1 Location relation diagram of Line 6 shield interval and Line 3

本项目主要的技术难点为:6 号线上穿 3 号线盾构隧道,该区段区间最小垂直净距约为 1.036 m,采取注浆、克泥效、堆载等施工措施不能有效控制上穿段既有线路隧道的变形情况。此外,3 号线隧道

有通车要求,在对既有隧道进行加固时不能阻碍隧道中列车的正常运行。

1.2 控制标准

在新建盾构隧道的施工过程中,为了保证既有地铁线路的安全运营,必须保证其变形控制指标处于安全区间内。根据 CJJT 202—2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》规定,以及本工程中盾构隧道与既有运营 3 号线的空间位置关系,判断外部作业影响等级为特级。根据规范相关要求和外部作业影响等级,相应的既有隧道变形控制标准如表 1 所示。

表 1 既有隧道变形控制标准

Tab.1 Deformation control standards for existing tunnels			
测量项目	报警值/mm	警戒值/mm	控制值/mm
结构沉降	6	8	10
结构上浮	3	4	5
结构水平位移	3	4	5
结构收敛变形	6	8	10

2 数值模型计算分析

2.1 建立模型及选取参数

采用 FLAC3D 软件建立数值计算模型,计算尺寸取为开挖卸荷面宽度和高度的 3~5 倍。根据开挖卸荷面宽度和高度的 5 倍确定边界条件,6 号线和 3 号线的数值计算模型如图 2 所示。

3 号线和 6 号线的开挖过程通过 FLAC3D 软件内置的 null 模型来实现逐环开挖,并通过改变等代层的性质参数来模拟同步注浆浆液的硬化过程,等代层使用弹性模型,土层全部采用 Mohr-Coulomb 模型。隧道的衬砌管片用内置单元 liner 模拟,liner 单元可直接模拟为一环衬砌管片,liner 单元的特性参数可控制衬砌-土界面的剪切和受压行为,其参数主要有抗拉耦合弹簧强度和剪切耦合弹簧强度,可用于反映隧道结构模型中环缝、纵缝之间连接螺栓的抗拉强度和剪切强度。通过对周围地层及开挖面施加均布压力来模拟盾构注浆和盾构顶推力,详细计算参数如表 2 所示。

表 2 计算参数

Tab.2 Calculation parameters		
项目	参数	取值
盾构参数	刀盘附加推力/kPa	250
	附加注浆压力/kPa	300
	外径/m	3.10
	内径/m	2.75
隧道衬砌管片	环宽/m	1.50
	密度/(g/cm ³)	2.50
	弹性模量/MPa	34 500
	泊松比	0.20
土层	密度/(g/cm ³)	2.46
	泊松比	0.25

2.2 竖向位移分析

当新建隧道掘进施工完成后,隧道及周围土体的整体竖向位移云图如图 3 所示。由图 3 可知:既有隧道管片周围的土体最大竖向位移为 4 mm,新建隧道周围土体的最大竖向位移为 6 mm;新建隧道和既有隧道周围土体的竖向位移隆起最大值均出现在两条线路的交叉部位,此处属于夹层土体范畴,可见此范围内的土体在上穿施工过程中需要着重控制其竖向变形。

为研究新建盾构隧道上穿施工对既有隧道造成的影响,对隧道管片单元的整体竖向变形进行分析,提取图 3 中既有隧道管片拱顶处的竖向位移,既有隧道不同纵向位置处的拱顶竖向位移如图 4 所示。由图 4 可知,新建隧道开挖完成后,既有隧道在交叉点处的变形较大。既有隧道的竖向变形关于新建隧道的中轴线呈对称分布,向两侧逐渐减小,隧道管片的竖向最大隆起变形达到了 2.7 mm。

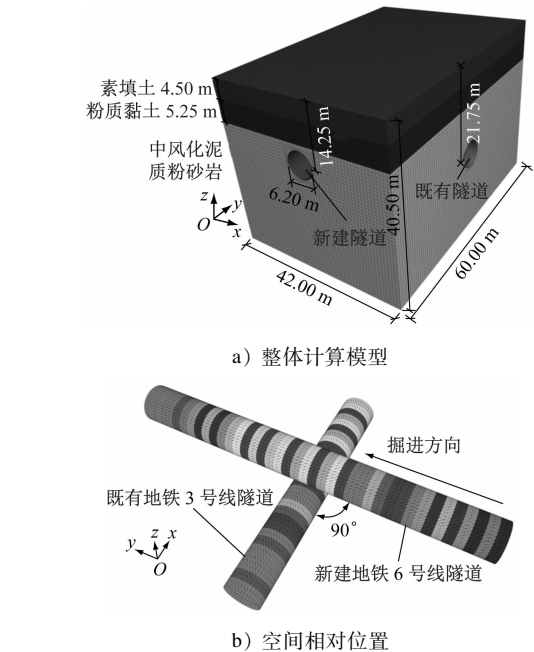


图 2 6 号线和 3 号线的数值计算模型

Fig.2 Numerical calculation models for Line 6 and Line 3

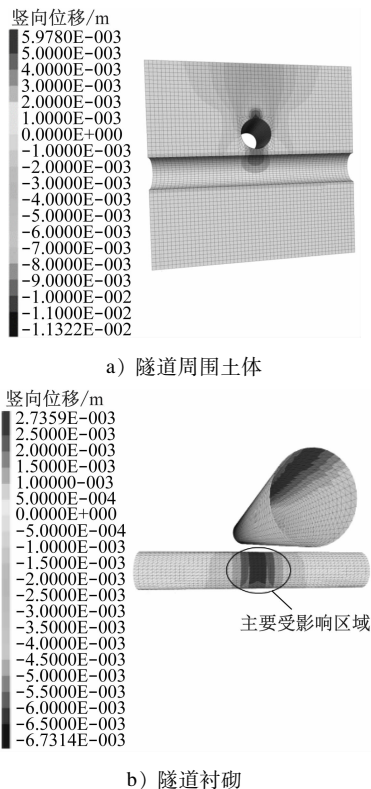


图3 隧道及周围土体的整体竖向位移云图

Fig. 3 Nephogram of tunnel and surrounding soil overall vertical displacement

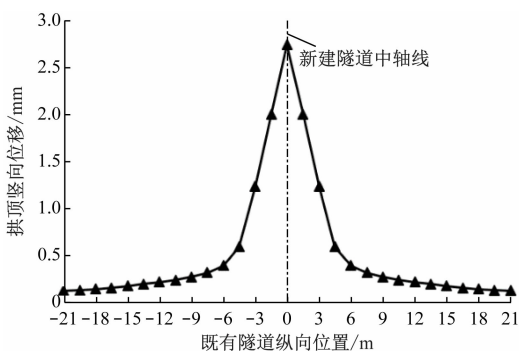


图4 既有隧道不同纵向位置处的拱顶竖向位移

Fig. 4 Arch crown vertical displacement of existing tunnel different longitudinal positions

综上所述,既有地铁隧道受影响的主要区域为既有隧道和新建隧道的水平投影交叉点附近。

为研究6号线施工过程中既有地铁3号线的竖向位移变化,盾构每施工7.5 m选取一个竖向位移云图进行分析,共8个施工阶段。盾构掘进过程中,隧道竖向位移云图如图5所示。由图5可知:随着新建盾构隧道的施工,既有隧道管片的竖向位移逐渐增大,上穿部位(水平投影交叉点附近)尤为明显;当盾尾距离既有隧道中轴线7.5 m处,既有隧道

管片的整体竖向变形仍无明显变化;当盾尾处于既有隧道中轴线处时,既有隧道上穿部位的最大隆起变形为1.2 mm;当盾尾掘进越过既有隧道中轴线7.5 m时,既有隧道上穿部位的最大隆起变形为2.7 mm;当盾尾越过既有隧道中轴线15.0 m时,既有隧道上穿部位的最大隆起变形为2.7 mm,此时隆起变形的增长已不明显。

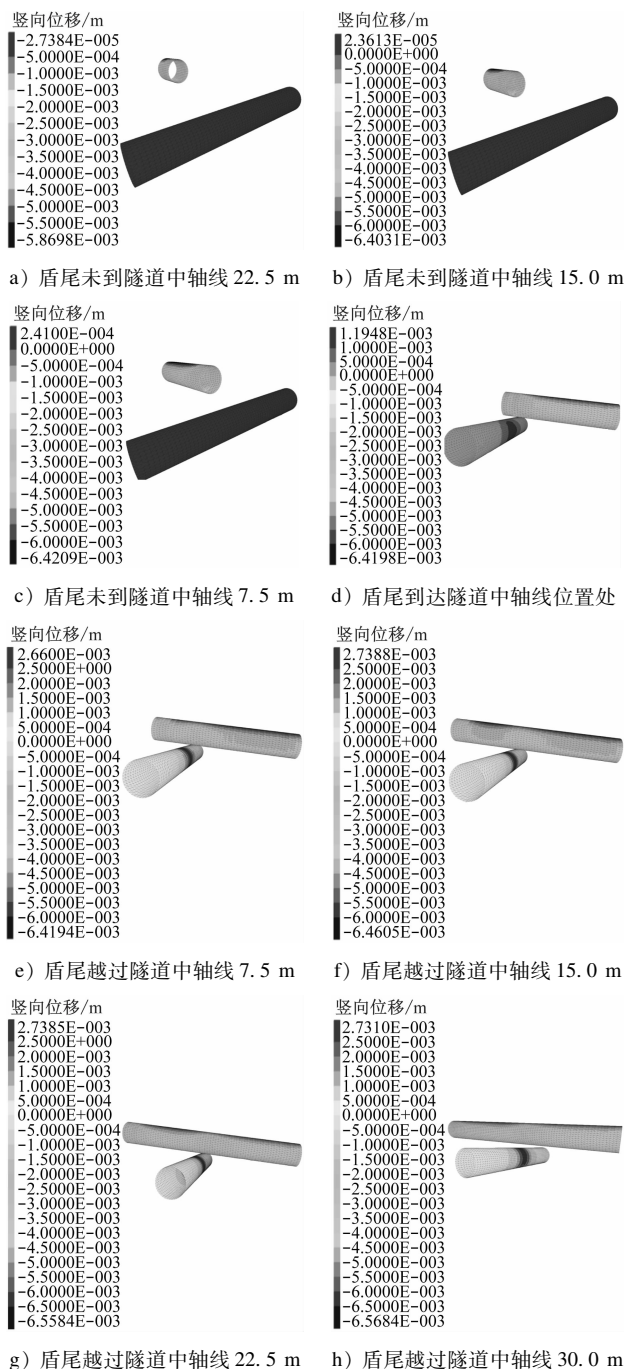
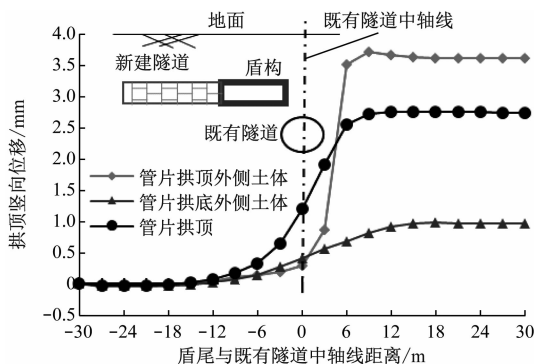


图5 盾构掘进过程中的隧道竖向位移云图

Fig. 5 Nephogram of tunnel vertical displacement during shield tunnel excavation process

为直观地反映施工过程中既有隧道拱顶隆起峰值的变化规律,提取不同盾尾距中轴线距离条件下,既有隧道中轴线处的竖向位移进行分析,如图6所示。由图6可知:随着新建盾构隧道的施工,当盾尾距离既有隧道中轴线距离为12.0 m前,因距离既有隧道中轴线较远,既有隧道与新建隧道交叉点处的管片及周边土体的竖向位移无明显变化;当盾尾距离既有隧道中轴线距离为-12.0 ~ 12.0 m时,既有隧道与新建隧道交叉点处的管片和土体的竖向位移均发生了显著变化;当盾尾通过既有线路12.0 m后,既有隧道与新建隧道交叉点处的管片及土体位移基本保持稳定。综上所述,当新建盾构隧道施工距离既有隧道左右各12.0 m范围内时,即当新建盾构隧道距离既有隧道 $2D$ (D 为新建隧道直径)水平距离时,其对既有隧道有较大的影响,因此在此范围内施工时,需要着重控制既有隧道的上浮变形。



注:横坐标以盾尾未到达既有线为负,盾尾越过既有线为正。

图6 不同盾尾距中轴线距离条件下既有隧道中轴线处的竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement at existing tunnel central axis between shield end and central axis distance conditions

2.3 加固措施影响分析

3号线隧道在铺轨后使用环形支撑加固结构,具体架设范围为两线交叉点处的管片及其前后各2环管片。每处交点附近共架设5环管片,环与环之间的钢支撑使用纵向联系条进行连接。

建模时,环形支撑选取弹性本构模型,加固范围为既有隧道与新建隧道交叉点两边各2环管片长度(共5环),环形支撑的钢板厚度最大不超过75 mm,模型中取为50 mm。加固措施模型示意图如图7所示。加固区域的物理参数按照Q235b钢进行选取,其泊松比为0.3,弹性模量为200 GPa,密度为 $3.9 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ 。

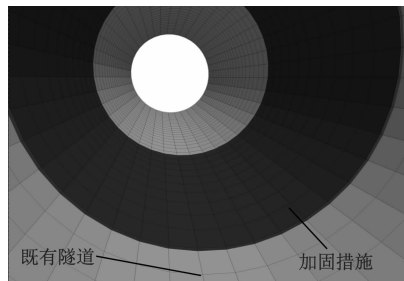


图7 加固措施模型示意图

Fig. 7 Diagram of reinforcement measure model

在既有隧道采取加固措施后,新建隧道施工完成后,既有隧道不同纵向位置处的拱顶竖向位移如图8所示。由图8可知:在未加固、加固1环、加固3环、加固5环、加固7环、加固9环情况下,既有隧道拱顶的最大竖向位移分别为2.70 mm、2.40 mm、1.70 mm、1.10 mm、0.97 mm、0.91 mm,向隧道两侧逐渐减小;采取加固措施后,既有隧道的整体竖向位移分布规律与未采取加固措施前的分布规律整体一致,表明加固措施仅改变隧道竖向位移的大小,并不改变其分布规律;随着加固环数的增加,既有隧道拱顶处的竖向位移快速减小;当加固5环时,既有隧道拱顶处的最大位移为1.1 mm;当加固7环和9环时,既有隧道拱顶处的最大位移分别为0.97 mm和0.91 mm。相较于加固5环时的情况,加固7环和9环时的拱顶处竖向位移虽然更小,但二者的减小效果有限,因而在工程中建议加固5环,既可良好地控制既有隧道的竖向位移,又具有较高的性价比。此外,通过对比采取加固措施前后既有隧道拱顶处的竖向位移可知,在加固范围内的加固措施可承担既有隧道与新建隧道交叉点处既有隧道管片的

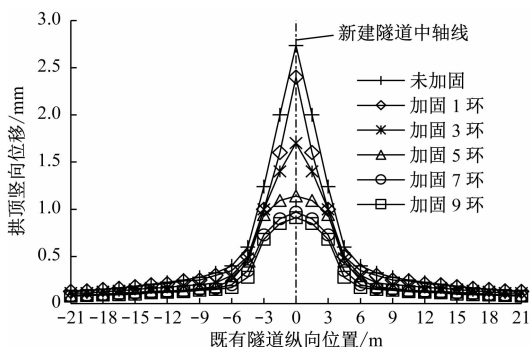


图8 加固措施对既有隧道不同纵向位置处拱顶竖向位移的影响

Fig. 8 Influence of reinforcement measures on existing tunnel arch crown vertical displacement at different longitudinal positions

上浮变形,并将其向相邻的管片传递,进而起到良好的加固作用。

加固后,不同盾尾与中轴线距离条件下,既有隧道中轴线处的拱顶竖向位移,如图9所示。由图9可知:采取加固措施后,在盾构掘进初期,既有隧道拱顶的竖向位移有一定的沉降,约为0.5 mm;当盾构掘进至既有隧道中轴线附近时,既有隧道开始向上隆起,且隆起量的增长速率较大;在盾构通过既有隧道中轴线6 m时,既有隧道顶部的隆起量达到了1.1 mm,并逐渐趋于稳定。

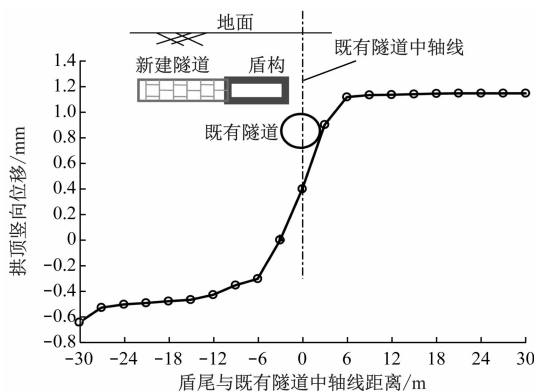


图9 加固后不同盾尾距中轴线距离条件下既有隧道中轴线处的拱顶竖向位移

Fig. 9 Existing tunnel arch crown vertical displacement at central axis between shield end and central axis distance conditions after reinforcement

3 施工控制措施

3.1 环形支撑加固措施

6号线上穿施工过程中,3号线隧道上部可能出现压力卸载及过载现象,对既有隧道造成较大的竖向变形,过大的变形值易引起管片裂缝,进而导致连接螺栓拉裂、隧道漏水等一系列问题。考虑到3号线隧道的通车需求,为不影响既有隧道的正常运行,采用环形支撑加固措施。

洞内加固环形支撑的结构、连接形式与盾构区间隧道施工所使用的管片类似,均为分块拼装后采用螺栓连接成型的环形结构(环形支撑底部与道床通过锚固连接成整体)。环形支撑加固结构的各部件均在隧道外提前准备好,只需在新建隧道施工前在既有隧道内部进行装配,施工便捷迅速,且不影响既有隧道内列车的正常运行。环形支撑的肋板最厚为75 mm,远远小于125 mm的区间车辆限界要求。在环形支撑安装完毕后进行断面测量,避免

支撑侵限。环形支撑应在3号线隧道铺轨后使用,环形支撑钢板均为Q235b钢。每个环向支撑架由14件支撑板和2个支撑架固定座组成,支撑板采用两种型号,支撑板2—支撑板13为A型,支撑板1和支撑板14为B型。临时环形支撑布置示意图如图10所示。

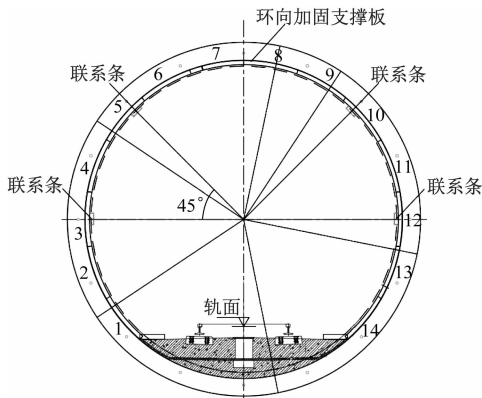


图10 临时环形支撑布置示意图

Fig. 10 Diagram of temporary ring support layout

洞内支撑应在新建隧道上穿施工前架设完成,由前文数值分析结果可知,加固5环效果最佳,故对两线交叉点处的3号线管片及其前后各2环管片进行架设(共4处交叉点,架设20环管片)。环与环之间的钢支撑应有可靠的纵向联系,采用4条16b槽钢进行连接。

3.2 盾构掘进控制

区间左线的第1055环—第1074环为上穿施工段,此过程中需分析的盾构掘进参数主要有土仓压力与总推力、刀盘扭矩与掘进速度及同步注浆压力。

3.2.1 土仓压力与总推力

不同管片下的土仓压力与总推力如图11所示。由图11可知,盾构在上穿3号线隧道施工过程中,土仓压力为90~110 kPa,刀盘离开3号线西侧隧道后,土仓压力于第1069环开始逐渐释放,于第1074环刀盘抵至洞门时进行土仓压力释放。掘进总推力控制在9 500~12 500 kN,刀盘进入加固区后总推力逐渐降低。

3.2.2 刀盘扭矩与掘进速度

不同管片下的刀盘扭矩与掘进速度如图12所示。开挖过程中对渣土注入泡沫原液进行改良,泡沫原液质量浓度控制范围为3%~5%,气量约为400 L/min,发泡率为10~12倍,每环注入原液量约为50~60 kg。

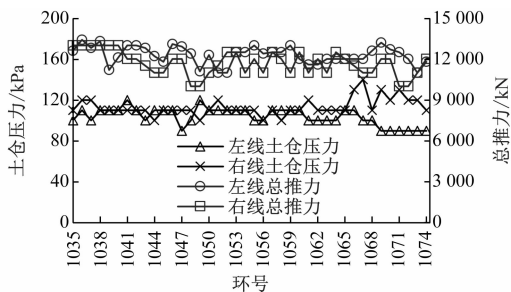


图 11 不同管片下的土仓压力与总推力

Fig. 11 Soil chamber pressure and total thrust with different segments

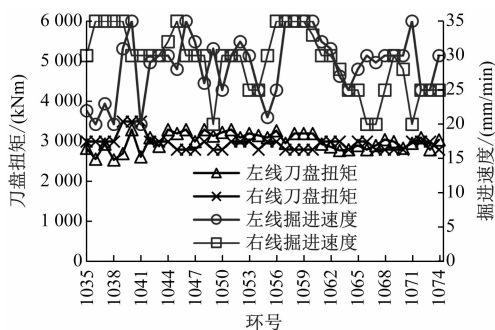


图 12 不同管片下的刀盘扭矩与掘进速度

Fig. 12 Cutterhead torque and excavation speed with different segments

盾构在上穿 3 号线隧道施工过程中,刀盘扭矩控制在 2 540.0 ~ 3 270.0 kNm,平均扭矩为 2 897.4 kNm。刀盘离开 3 号线西侧隧道后,于 1068 环进入接收端头加固区,于 1069 环开始进行土仓压力逐渐释放,降低刀盘扭矩。盾构在施工过程中的掘进速度控制在 20 ~ 35 mm/min。

3.2.3 同步注浆压力

不同管片下的同步注浆压力如图 13 所示。盾构在上穿 3 号线隧道施工过程中,同步注浆压力控制在 200 ~ 300 kPa,考虑到与 3 号线区间隧道距离较近,较大的同步注浆压力容易对既有隧道产生扰动。上穿施工过程中,考虑到两条线路的相对位置关系,将下部注浆压力控制在 250 kPa 以内,避免下部注浆管路压力过大造成不良扰动。为确保接收洞门良好的封闭效果,自 1075 环开始将注浆压力控制在 300 kPa 左右。

3.3 自动化监测

根据自动化监测范围、地铁区间形状和规范及设计要求,既有 3 号线左右线各布设 18 个断面,每 5 m 布置一个断面,监测断面布设示意图如图 14 所示。左右线每个断面各布设 5 个三维变形监测点,

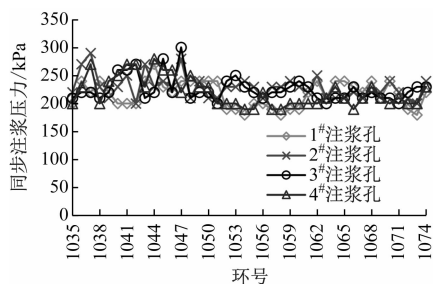
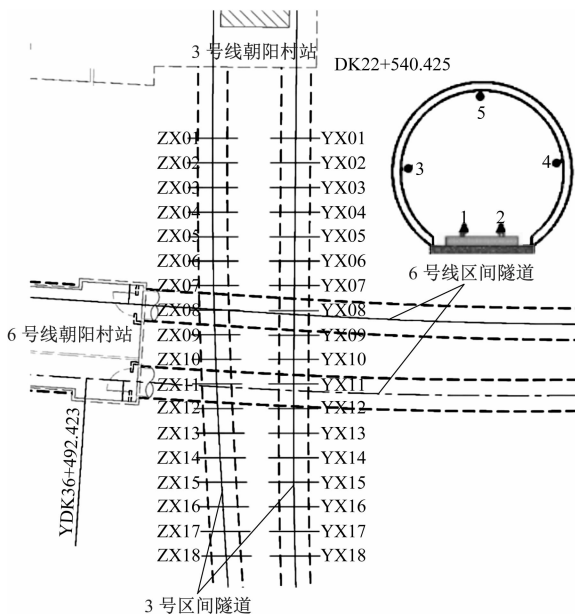


图 13 不同管片下的同步注浆压力

Fig. 13 Synchronous grouting pressure with different segments



注:ZX01—ZX18、YX01—YX18 为监测断面编号;1—5 为三维变形监测点。

图 14 监测断面布设示意图

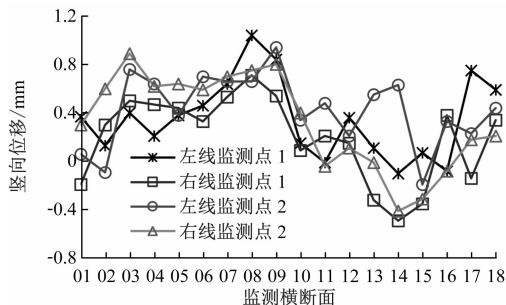
Fig. 14 Diagram of monitoring section layout

分别位于隧道道床处(监测点 1 和 2)、隧道拱腰处(监测点 3 和 4)和隧道拱顶处(监测点 5)。自动化监测系统每小时对目标控制点进行 1 次监测,每日统计竖向与水平累计变形值。

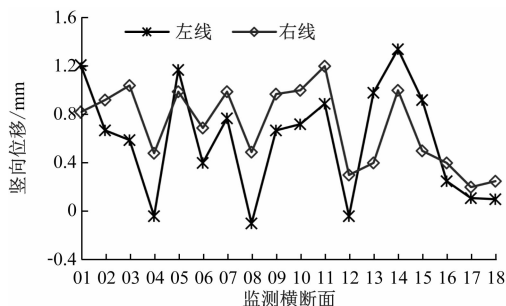
3.4 监测数据分析

为验证施工控制措施的有效性,对新建隧道贯通时既有隧道各监测断面处的竖向位移监测数据进行分析。上穿施工完成时,既有隧道每个监测断面拱顶及隧道底部监测点的竖向位移如图 15 所示。由图 15 可知:隧道道床监测点 1、监测点 2 处的最大隆起变形为 1.0 mm,隧道拱顶监测点 5 的最大隆起变形为 1.3 mm;各监测断面的各监测点竖向位移以隆起变形为主。不同断面处,既有隧道拱腰处监测点 3 的水平位移如图 16 所示。由图 16 可知,监

测点3的水平位移为 $-0.7 \sim 1.4$ mm,大部分监测断面产生的水平位移方向与盾构掘进方向一致。综上所述,既有隧道的竖向位移和水平位移均处于控制标准以内。



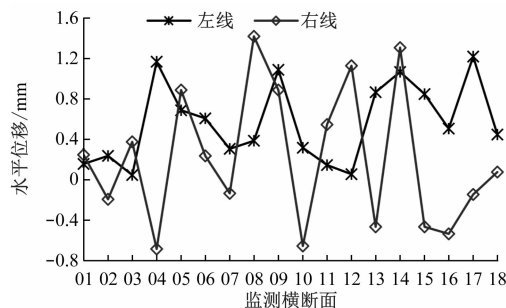
a) 道床监测点1及监测点2的竖向位移



b) 拱顶监测点5的竖向位移

图15 不同断面处既有隧道3个监测点的竖向位移

Fig. 15 Vertical displacement of three monitoring points in existing tunnel at different cross-sections



注:水平位移正值表示位移方向与盾构掘进方向一致,水平位移负值表示位移方向与盾构掘进方向相反。

图16 不同断面处既有隧道监测点3的水平位移

Fig. 16 Horizontal displacement of monitoring point 3 in existing tunnel at different cross-sections

4 结语

基于FLAC3D软件建立三维数值模型,对新建线盾构上穿既有线的施工参数进行控制,结合环形支撑加固措施和自动化监测方案保证了既有地铁

结构处于安全可控的状态,主要获得以下结论:

1) 3号线上穿交叉部位的竖向位移最大值为2.7 mm。在盾构掘进过程中,相较于其他部位,上穿交叉部位左右两侧2D范围内的竖向位移变化较大。

2) 环形加固结构不改变既有隧道的竖向位移分布规律,且可将管片的最大竖向变形降至1.1 mm,控制效果良好。

3) 在盾构上穿既有隧道施工前,对既有隧道上穿部位采取环形支撑加固措施。上穿施工过程中,对盾构的土仓压力、总推力、刀盘扭矩、掘进速度、及同步注浆压力等一系列施工参数进行动态化调整,并对整个施工过程采取自动化监测。

4) 监测数据表明,加固后,既有拱顶处的最大竖向位移仅为1.3 mm,拱腰处的最大水平位移仅为1.4 mm,且各监测断面的位移值均较小。监测结果表明,所采取的施工控制措施可以有效减小上穿施工对既有线造成的施工扰动,保证了施工的安全性。

参考文献

- [1] DO N A, DIAS D, ORESTE P. Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2014, 15 (11): 896.
- [2] 易丹,严德添,党军. 大断面矩形土压平衡式顶管上跨施工对运营地铁隧道变形的影响分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 594.
YI Dan, YAN Detian, DANG Jun. Study of influence of construction of large cross-section rectangular EPB-type pipe jacking tunnel on below operating metro tunnel deformation[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 594.
- [3] LIU X, FANG Q, ZHANG D, et al. Behaviour of existing tunnel due to new tunnel construction below[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 71.
- [4] WU H N, SHEN S L, LIAO S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 317.
- [5] 刘维正,戴晓亚,孙康,等. 地铁盾构隧道近距离上穿既有线路纵向变形计算方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 831.
LIU Weizheng, DAI Xiaoya, SUN Kang, et al. Calculation method of longitudinal deformation of metro shield tunnel overpassing existing line at short distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 831.
- [6] LI P, DU S J, MA X F, et al. Centrifuge investigation into the effect of new shield tunnelling on an existing underlying large-di-

- ameter tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 59.
- [7] 王超东, 赖鹏安, 曹洋, 等. 滨海软土地层盾构近接穿越角度对既有隧道影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 168.
- WANG Chaodong, LAI Peng'an, CAO Yang, et al. Model test study on the influence of the close crossing angles of overlapped shield tunnels on existing tunnels in coastal soft soils[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 168.
- [8] 贺美德, 刘军, 乐贵平, 等. 大断面通道近距离上穿盾构隧道引起的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3682.
- HE Meide, LIU Jun, LE Guiping, et al. Deformation analysis for shield tunnel upper crossing by close range large section passage-way[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3682.
- [9] 姜叶翔, 周奇辉, 羊逸君, 等. 采用管棚预支护方法的盾构穿越既有地铁隧道变形特征及加固影响实测分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(2): 49.
- JIANG Yexiang, ZHOU Qihui, YANG Yijun, et al. Reinforcement effect and actual measurement analysis of new shield tunnel crossing existing metro tunnel with shed pre-supporting method[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(2): 49.
- [10] 张明书, 龚伦, 陈海勇, 等. 地铁 TBM 区间上跨高铁隧道施工关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(7): 76.
- ZHANG Mingshu, GONG Lun, CHEN Haiyong, et al. Research on the key technologies of construction of TBM interval tunnel across high-speed railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(7): 76.
- [11] 杨志勇, 杨星, 江玉生, 等. 盾构近距离上跨既有运营隧道施工控制技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1898.
- YANG Zhiyong, YANG Xing, JIANG Yusheng, et al. Construction control technology of shield overcrossing adjacent existing operation tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1898.
- [12] 路国樑, 刘斌, 杨磊, 等. 盾构近距离上穿既有地铁隧道施工技术与控制措施[J]. 土工基础, 2018, 32(6): 590.
- LU Guoliang, LIU Bin, YANG Lei, et al. Construction control methods of a shielded tunnel over crossing an existing operating metro tunnel[J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(6): 590.
- [13] 李建设, 陈慧超, 李政. 深圳地铁 11 号线车公庙站—红树湾站区间盾构隧道小净距上穿既有有线区间隧道施工关键技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 374.
- LI Jianshe, CHEN Huichao, LI Zheng. Key construction technologies for shield-bored tunnel of Chegongmiao Station-Hongshuwan Station section on No. 11 Line of Shenzhen Metro crossing closely above existing metro line[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(4): 374.

(收稿日期:2022-09-08)

(上接第 79 页)

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures; GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [5] CHUNG K F, IP K H. Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading[J]. Engineering Structures, 2000, 22(10): 1271.
- [6] WANG Y Q, WU J K, LIU H B, et al. Modeling and numerical analysis of multi-bolt elastic interaction with bolt stress relaxation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C; Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(15): 2579.
- [7] 王萌, 石永久, 王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 27.
- WANG Meng, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Analysis on shear behavior of high-strength bolts connection[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 27.
- [8] 俞海勇, 王琼, 张贺, 等. 基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J]. 粉煤灰, 2011, 23(6): 42.
- YU Haiyong, WANG Qiong, ZHANG He, et al. Service life period-based carbon emission computing model for ready-mix concrete[J]. Coal Ash China, 2011, 23(6): 42.
- [9] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 74.
- LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation methods and application of carbon dioxide emission during steel-making process[J]. Iron & Steel, 2016, 51(4): 74.
- [10] 董坤涛. 基于钢筋混凝土结构的建筑物二氧化碳排放研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- DONG Kuntao. Study on carbon dioxide emission of buildings based on reinforced concrete structure[D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2011.

(收稿日期:2022-05-25)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821