

富水软土地地区盾构近距离下穿地铁运营隧道的施工保护措施

马西峰¹ 金 华¹ 周 游² 陈少波² 王 羽² 吴遥杰^{3,4}

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210017, 南京; 2. 上海隧道工程有限公司, 200232, 上海;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

4. 上海市轨道交通结构耐久性与系统安全重点实验室, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 富水软土地地区盾构近距离下穿地铁运营隧道施工导致既有隧道结构变形控制困难, 有必要对盾构下穿地铁运营隧道的施工保护措施进行研究。[方法] 以南京地铁5号线盾构近距离下穿既有南京地铁1号线区间工程为例, 运用 MIDAS/GTS NX 有限元软件对盾构近距离下穿施工进行了有限元模拟, 提出了既有隧道主动保护措施, 以及新建隧道盾构掘进控制措施。采用施工监测的方法, 对盾构下穿期间既有隧道竖直方向位移和水平方向收敛进行监测。[结果及结论] 具体施工保护措施包括: 在盾构下穿施工前, 对既有隧道受影响区段进行加固, 通过微扰动注浆、永久性环向支撑和纵向拉紧条等措施有效降低了隧道变形, 并使之符合变形控制标准; 在盾构下穿施工中, 基于既有隧道沉降量实时调整土压力和出土量, 采取同步注浆、上下孔注浆量分配等方法进一步控制隧道变形。在盾构下穿施工完成后, 针对地层的后期沉降问题, 在盾构下穿段隧道内准备充足的补压浆材料和设备, 根据沉降监测情况进行后续补压浆加固。上述措施能够有效减小盾构下穿施工对既有隧道的影响。

关键词 城市轨道交通; 盾构近距离下穿工程; 地铁运营隧道; 富水软土地地区; 施工保护措施

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.006

Protection Measures for Shield Tunneling Closely Under-passing Operating Metro Tunnels in Water-rich Soft Soil Area

MA Xifeng¹, JIN Hua¹, ZHOU You², CHEN Shaobo², WANG Yu², WU Yaojie^{3,4}

(1. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210017, Nanjing, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., 200232, Shanghai, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Durability and System Safety of Rail Transit, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In water-rich soft soil areas, it is difficult to control the deformation of the existing operating metro tunnel structure caused by the construction of the shield tunneling closely under-passing. Therefore, it is necessary to conduct research on corresponding protection measures. [Method] Based on a project of Nanjing Metro Line 5 shield tunneling closely under-passing the existing section of Nanjing Metro Line 1, the MIDAS/GTS NX finite element software is used to simulate the construction of the shield tunneling. Then, active protection measures for the existing tunnel and control measures for the shield tunneling of the newly-built tunnel are put forward. The vertical displacement and horizontal convergence of the existing tunnel during the shield under-passing are monitored with construction monitoring methods. [Result & Conclusion] The specific construction protection measures are as follows. Before the construction of shield tunneling under-passing, the affected sections of the existing tunnel are reinforced with measures such as micro-disturbance grouting, permanent circumferential supports, and longitudinal tension strips to effectively reduce the tunnel deformation and make it conform to the deformation control standards. During the construction, the earth pressure and the amount of excavated soil are adjusted in real time based on the settlement amount of the existing tunnel, and methods are adopted including synchronous grouting and the distribution of grouting amounts in the upper and lower holes to further control the tunnel deformation. After the completion of construction, against the post-construction settlement problem of the stratum, sufficient grouting material and equipment for reinforcing grouting are prepared inside the tunnel section where the shield tunneling underpasses, and subsequent grouting reinforcement is carried out according to the monitored settlement. The above measures can effectively reduce the impact of the shield tunneling under-passing construction on the existing tunnel.

Key words urban rail transit; shield tunneling closely under-

passing project; operating metro tunnel; water-rich soft soil area; construction protection measure

当前城市轨道交通建设正面临越来越多的下穿工程难题^[1-3]。如对于盾构穿越既有城市轨道交通隧道,由于城市轨道交通线路对轨面平顺性要求极高,同时既有被穿越城市轨道交通线路因建设质量、周边环境及投入使用年限不同,其现有结构状态存在差异,包括不同程度的地基沉降变形及结构变形,尤其在富水软土地区,由于地层软弱、长期运营以来周边开发、列车荷载等各种不利因素使得既有隧道纵向不均匀沉降与横断面变形极为恶化,这些均会导致城市轨道交通盾构穿越施工工期控制以及运营期结构长期性能保障等难度增大^[4],因此对既有隧道的保护措施需结合不同工程特点以及既有结构差异性进行研究,必要时需采取主动保护措施。另一方面,由于城市轨道交通现有的部分运营线路在设计阶段未预留远期线路安全通过的条件,城市新建站点与已运营站点隧道间距很小^[5-7],既有隧道在穿越节点未预留加密注浆孔,无法实现洞内注浆加固,如果采取洞内破孔注浆加固措施将破坏既有隧道结构,对结构长期服役性能保持极为不利;同时受到既有隧道的隔断及周边环境的限制,一般不具备地面注浆加固的条件。因此,在近距离穿越条件下,结合工程自身特点,提出既有隧道主动保护措施是穿越施工的关键技术之一。

文献[8]以上海轨道交通 8 号线近距离穿越既有上海轨道交通 2 号线为研究背景,根据现场监测数据研究发现:盾构穿越过程中,已建隧道的竖直方向变形可以分为先期沉降、盾构通过时隆起、盾构穿越后隆起及后期沉降四个部分。文献[9]对上海轨道交通 13 号线以最小 3 m 的净距大角度上穿既有运营的上海轨道交通 4 号线工程进行实测分析,尽管既有隧道周边采用注浆加固,但双线盾构隧道穿越后,既有隧道仍然产生隆起。文献[10]在广州地铁 22 号线下穿广州地铁 3 号线的工程中采用了地面水平定向钻孔注浆加固、盾构机超前注浆孔注浆加固,以及在既有广州地铁 3 号线隧道中进行道床注浆加固等措施,取得了对既有隧道较好的保护效果。上述研究说明盾构下穿主动保护措施对于地层及结构变形控制具有一定作用,然而并未考虑运营隧道存在的各类结构病害的影响,且采取

主动保护措施较为单一。

本文针对新建南京地铁 5 号线(以下简称“5 号线”)三山街站—朝天宫站区间富水软土地层盾构小间距下穿既有南京地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)隧道工程,结合有限元模拟计算与实际施工监测数据,分析和验证在盾构穿越施工前期对既有区间隧道结构采取主动保护措施,以及新建盾构区间采取微扰动注浆保护方案的可行性和可靠性,为类似穿越工程提供参考。

1 工程概况

5 号线三山街站—朝天宫站区间从中山南路与升州路交叉口始发,沿升州路、莫愁路到达朝天宫站,区间隧道埋深 16.0 ~ 32.0 m,采用盾构法施工,隧道内径 5.5 m,外径 6.2 m,区间长度约 1 455 m。1 号线于 2005 年开始运营,三山街站—张府园站区间位于南京市主干道中山南路,南起升州路,北至建邺路,区间隧道全长约 724.18 m,选择浅埋式双洞隧道,采用盾构法进行施工。其中,5 号线在三山街站—朝天宫站区间从三山街站往东约 16 m 近距离下穿既有运营 1 号线三山街站—张府园站区间。5 号线下穿 1 号线节点平面图如图 1 所示。5 号线下穿段里程为 K25 + 5—K25 + 25,1 号线盾构下穿段里程为 K6 + 303—K6 + 326。5 号线下穿范围内地层从上往下依次为 6.2 m 厚①-1 杂填土层、0.7 m 厚②-2b3-4+c3 淤泥质土、5 m 厚②-3d2-4 粉砂层、1.8 m 厚②-2b3-4+c3 淤泥质土层及 12 m 厚②-3d2-3 粉砂层。盾构下穿段场地地质剖面图如图 2 所示。5 号线下穿段隧道主要位于②-3d2-3 粉砂层中,既有 1 号线隧道位于②-3d3-4 粉砂层、②-3b3-4+d3 淤泥质粉质黏土层及②-3d2-3 粉砂层中,其中②-3d3-4 粉砂层、②-3d2-3 粉砂层为微承压水层。两线隧道竖直方向净距最小值仅 3.7 m,十字交叉盾构下穿段长度约 21.3 m。1 号线隧道顶覆土厚度约 7.3 m,左、右线隧道之间净距约 8.9 m。

据 2016 年数据,1 号线自运营以来,三山街站—张府园站区间(包含穿越节点)已产生不同程度的接缝错台、结构裂缝等病害,隧道结构安全问题渐显。其中,盾构下穿段上行线(右线)隧道最大竖直方向沉降 15.6 mm,最大水平方向位移 11.3 mm,最大水平方向收敛 10.1 mm;下行线(左线)最大竖直方向沉降 3.6 mm,最大水平方向位移 4.9

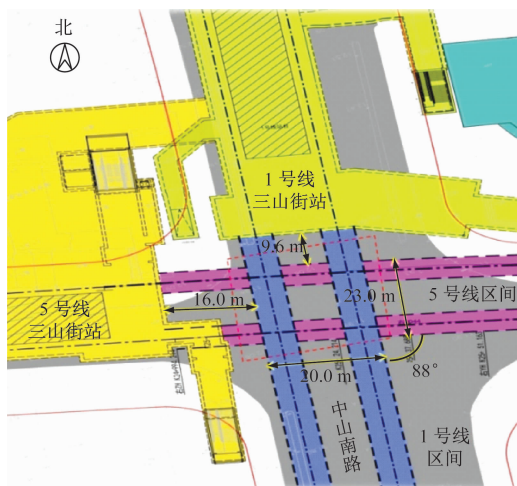


图 1 5 号线下穿 1 号线节点平面图

Fig. 1 Node plan view of Metro Line 5 under-passing Line 1

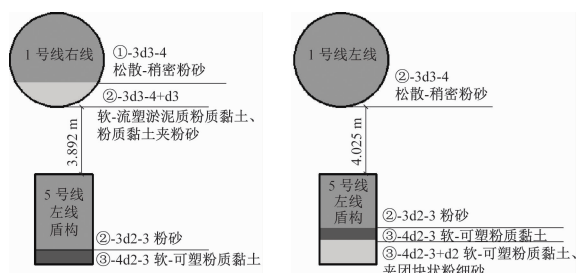
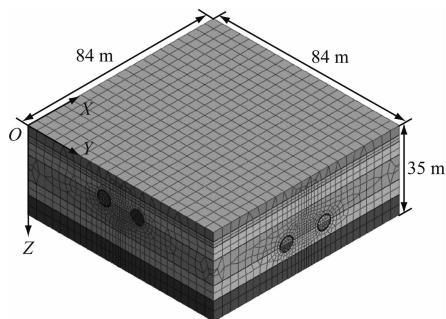


图 2 盾构下穿段场地地质剖面图

Fig. 2 Site geological profile in the shield under-passing section

mm,最大水平方向收敛 4.4 mm。DGJ 32/J 195—2015《江苏省城市轨道交通工程监测规程》及南京



a) 地层-隧道计算模型



b) 隧道计算模型

图 3 5 号线下穿既有 1 号线三维有限元计算模型

Fig. 3 3D finite element calculation model of Metro Line 5 under-passing the existing Metro Line 1

为分析 5 号线盾构隧道掘进全过程对上部既有 1 号线与土体的影响,在隧道掘进过程中,共设置 6 个典型施工步序,分别为:①5 号线隧道左线掘进至 1 号线右线下方;②5 号线隧道左线掘进至 1 号线左

地铁集团有限公司控制标准要求:盾构掘进穿越时地层损失率 $\leq 1\%$,既有线隧道沉降限值 $\leq \pm 5$ mm,水平方向收敛限值 $\leq \pm 5$ mm。因此,综合考虑结构现状、长期服役性能及控制标准要求,需采取合理措施控制下穿施工过程中既有隧道变形,保证既有隧道运营安全。

2 盾构近距离下穿施工有限元模拟

采用有限元模拟开展 5 号线下穿施工过程中对既有隧道变形的影响研究。采用岩土与隧道仿真软件 MIDAS/GTS NX 建立下穿施工三维数值分析模型。考虑边界条件的影响,计算模型空间尺寸为 $160\text{ m} \times 160\text{ m} \times 36\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。在模型的 OYZ 平面上(沿 Y 轴方向)施加约束,在 OYZ 平面上(沿 X 轴方向)施加约束,在 OXY 平面的底面上(沿 Z 轴方向)施加约束,而 OXY 平面的顶面则为自由面。5 号线下穿既有 1 号线三维有限元计算模型详见图 3。地层土体与围岩采用摩尔-库伦本构模型,衬砌为弹性材料,隧道管片忽略管片与管片之间的螺栓连接,只作为整体进行简化分析。管片外径 6 200 mm,管片厚度 350 mm,采用 2D 板单元进行模拟,管片环宽 1 200 mm,切口环直径 6 380 mm,同步注浆层厚度 140 mm。地层及结构物理力学参数取值如表 1 所示。选取下穿节点 60 m 范围(共计 50 环管片)进行研究,左、右线每一步掘进施工步长取 2.4 m(2 环)。

线下方;③5 号线隧道左线贯通;④5 号线隧道右线掘进至 1 号线右线下方;⑤5 号线隧道右线掘进至 1 号线左线下方;⑥5 号线隧道右线贯通。

表 1 地层及结构物理力学参数取值

Tab.1 Physical and mechanical parameters of stratum and structure

名称	重度/(kN/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/kPa
①-1 杂填土	18.4		0.31	15.0	5.0
②-2b3-4+c3 淤泥质粉土	18.7		0.43	17.3	13.0
②-3d3-4 粉砂	19.1		0.33	25.2	8.2
②-3d2-3 粉砂	18.9		0.31	30.1	8.9
③-4b2-3+d2 粉质黏土	20.3		0.31	22.4	17.6
盾构管片	25.0	34 500	0.20		
盾壳	78.5	206 000	0.20		
注浆材料	25.0	1 000	0.25		

图 4 和图 5 分别为下穿施工阶段既有隧道在竖直方向位移和水平方向收敛的有限元计算结果。由图 4 和图 5 可以看出:5 号线隧道掘进会引起既有 1 号线隧道竖直方向沉降以及沿掘进方向水平方向收敛,且量值随着掘进的推进不断增加,距离掘进面 20 m 范围内沉降速率和位移速率最大,既有隧道底部沉降量最大,沉降值为 3.4 mm;既有 1 号线隧道底部水平方向收敛值最大,收敛值为 2.8 mm。为了进一步控制盾构下穿过程既有隧道的竖直方向位移和水平方向收敛量,需针对既有隧道采取主动保护措施,并合理控制新建隧道掘进施工过程。

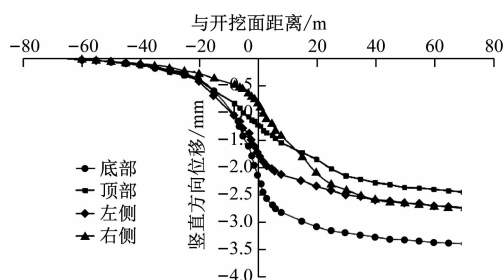


图 4 下穿施工阶段既有隧道竖直方向位移

Fig. 4 Vertical displacement of the existing tunnel during the under-passing construction stage

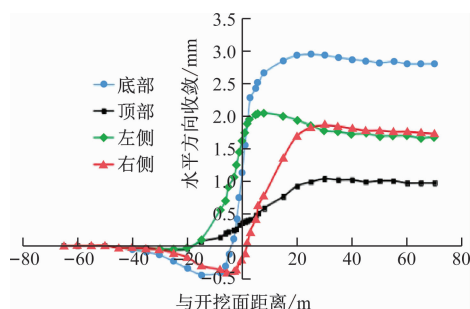


图 5 下穿施工阶段既有隧道水平方向收敛

Fig. 5 Horizontal convergence of the existing tunnel during the under-passing construction stage

3 既有隧道主动保护措施

针对 5 号线下穿的地质情况,1 号线的现状,以及两条线的相对位置关系,根据有限元计算分析,在 5 号线盾构穿越前对既有 1 号线影响区域采取钢环加固、纵向钢条加固和洞内预备微扰动注浆等主动加固措施,以减小 5 号线穿越施工对既有 1 号线运营区间隧道的影响。

3.1 钢环加固

为减小 5 号线盾构下穿卸载对隧道变形的影响,在有限元分析影响范围 20 m 内的管片采用钢环加固,以提高隧道的刚度。钢环宽度为 500 mm,厚度为 20 mm。每环钢环共分为 5 大块,底部设置钢拉板,通过道床两侧埋设牛腿将钢拉板和钢环连接成为一个整体。图 6 为钢环加固布置示意图。为保证钢环和管片内壁紧密贴合,钢环安装完成后,采用环氧树脂填充钢环与管片、钢拉板与道床之间的间隙。

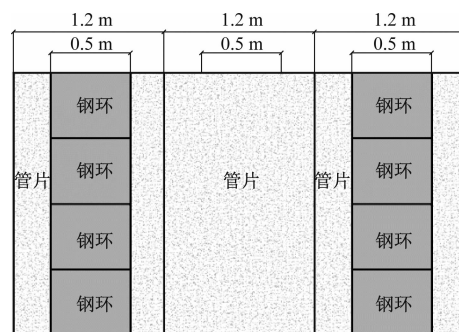


图 6 钢环加固布置示意图

Fig. 6 Layout diagram of steel ring reinforcement

3.2 纵向钢条加固

为保证 5 号线穿越期间既有线路的安全,防止隧道盾构环与环之间错台、松动。在支撑钢环完成

后,对既有隧道左、右线各设置 5 根 C16b 槽钢纵向拉条,加强区间管片和钢环的纵向连接刚度。纵向拉条加固布置如图 7 所示。

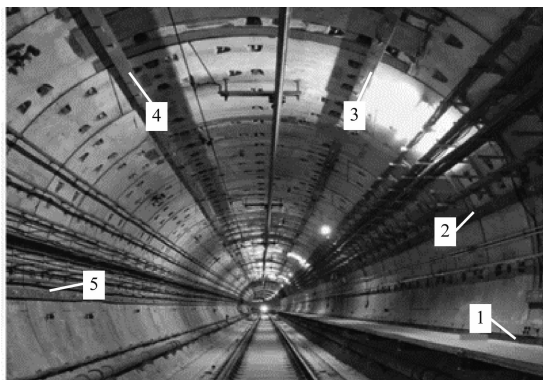


图 7 纵向拉条加固布置

Fig. 7 Layout of longitudinal tension strip reinforcement

3.3 洞内预备微扰动注浆

根据既有 1 号线隧道变形情况进行洞内预备微扰动注浆。在 5 号线穿越前开孔并预埋注浆管,孔径为 78 mm,纵向间距约为 2.4 m,采用跳环布置。根据 1 号线变形监测数据,若隧道 24 h 内沉降量超过 2 mm,或累计沉降量超过 5 mm,即对既有 1 号线进行微扰动注浆,反之,则不需进行微扰动注浆加固。图 8 为注浆开孔布置图。

4 新建隧道盾构掘进控制措施

盾构穿越掘进的影响控制措施主要根据施工前后对 1 号线的影响分为四个阶段:

第一阶段 盾构切口到达前和到达时 1 号线的沉降或隆起,主要由土压力及土体扰动造成的影响。本阶段主要通过控制切口土压力及出土量稳固前方土体,从而达到控制沉降的要求。施工过程中根据 1 号线自动化监测显示的沉降情况调节土压力及出土量,保证盾构切口到达前 1 号线微微隆起 0.5 mm。

第二阶段 盾构机壳体通过造成的沉降,主要由盾构机锥度引起。盾构穿越过程中若壳体部位出现连续下沉的趋势,考虑通过盾构壳体注浆孔采用克泥效进行壳体注浆,及时充填壳体与土体间隙,减弱壳体上方土体沉降。

克泥效工法是将高浓度的泥水材料(膨润土)与水玻璃两种液体,以适当比例混合,再通过径向孔注入。在克泥效的注入过程中,会向盾体四周的土层中渗透一部分克泥效,从而形成了泥膜,有效减

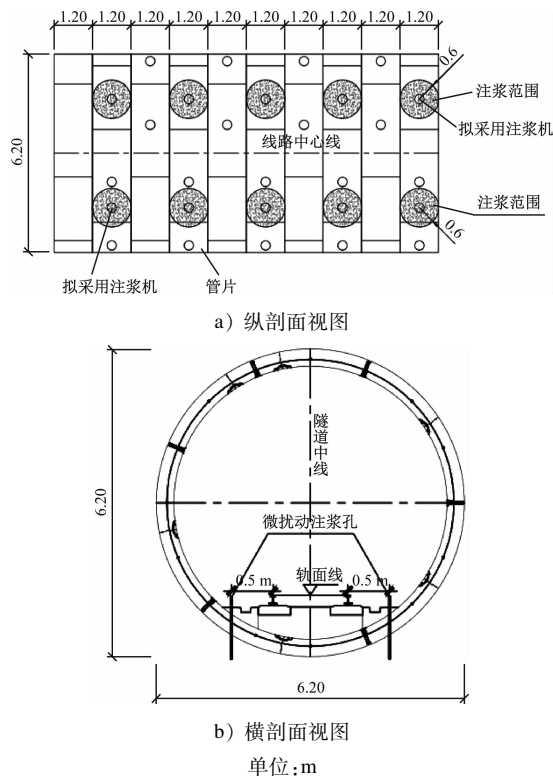


图 8 注浆开孔布置

Fig. 8 Layout of grouting holes

少后期同步注浆的浆液向土层中的渗透量。混合后的流动塑性胶化体不易受水稀释,且其黏性强度也不随时间而变化。文献[11]将克泥效注浆法运用到北京地铁 14 号线阜通西站—望京站区间下穿运营隧道 15 号线隧道工程,并成功将既有 15 号线隧道的最终变形控制在 1 mm 左右,保护了既有隧道的安全。本区间盾构机切口直径 6 490 mm,中盾直径 6 450 mm,每推进一环刀盘超挖形成的盾体与土体之间的间隙为 0.49 m³,因此每环推进过程中注入克泥效浆液至少为 0.49 m³,具体施工中要根据盾构机正上方地面的沉降量及时调整。

第三阶段 盾尾通过时造成的沉降,与同步注浆填充的及时充盈程度密切相关,因此通过调整同步注浆量及上下孔注浆分配方式可达到控制沉降的目的。盾尾通过时 1 号线出现下沉趋势,总注浆量增加 0.2 m³,盾构隧道上部每孔各增加 0.1 m³;盾尾通过时 1 号线出现隆起且单环管片隆起量超过 1 mm 时,调整上下孔注浆分配方式,将上部 2 孔中每孔同步注浆量减少 0.1 m³,底部 2 孔同步注浆量增加 0.1 m³,若仍继续隆起,则减少总注浆量 0.2 m³,即上部每孔各减少 0.1 m³,但总注浆量不得少于 2.5 m³。

第四阶段 后期土体再次固结产生的沉降。若穿越阶段 1 号线沉降单次超过 1 mm,则通过在 5 号线自身隧道进行二次注浆以加固控制 1 号线沉降,采取二次注浆的方式对 5 号线隧道进行加固并抑制上方地铁隧道下沉。

5 盾构下穿施工监测结果分析

5.1 盾构掘进参数

在进入盾构下穿段前,设置盾构推进试验段,对地面沉降与土压力、推进速度、推力、注浆量及注浆压力等盾构掘进参数之间的关系进行分析,掌握地面沉降随盾构掘进参数的变化规律,探究土体性质,以正确设定盾构下穿既有隧道的掘进参数,并采取恰当的措施,以减少土体沉降,从而满足南京地铁集团有限公司要求的控制标准。本次穿越工程盾构掘进参数取值如表 2 所示。

表 2 穿越工程盾构掘进参数取值

Tab.2 Shield tunneling parameters of the under-passing project

掘进参数	取值
推进速度/(mm/min)	35
盾构切口上部实际土压力/kPa	22
推力/kN	31 000
扭矩/(Nm)	5 000
同步注浆压力/MPa	0.4~0.8
注浆量/m ³	5.5

5.2 监测结果分析

盾构穿越既有区间隧道期间,对既有隧道竖直方向位移和水平方向收敛进行监测,如图 9 所示。在盾构穿越过程中,通过控制掘进参数,将 1 号线隧道适当抬升,确保其隆起量控制在 0~2 mm 范围内;并在盾构穿越完成,待 1 号线隧道稳定后,将最

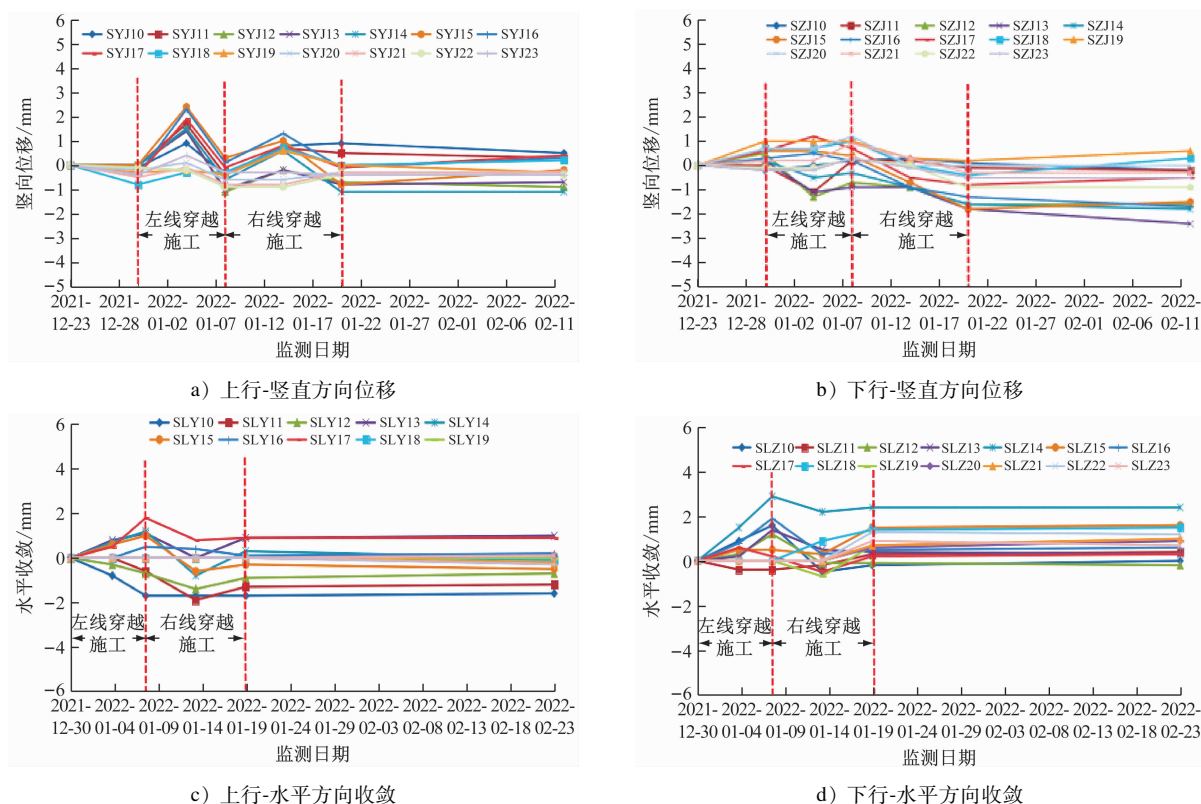


图 9 既有隧道位移监测结果

Fig.9 Monitoring results of the existing tunnel displacement

终沉降量控制在 5 mm 以内;同时,实际沉降量相比有限元仿真结果明显下降,故可推测所采取的保护和控制措施是有效的。

由图 9 可知:盾构穿越施工中既有隧道竖直方向最大位移(不超过 5.00 mm,“+”表示上浮,“-”

表示下沉)、水平方向最大收敛(不超过 5.00 mm,“+”表示扩张,“-”表示收缩)等监测数据均在预警值范围内,满足 DGJ 32/J 195—2015《江苏省城市轨道交通工程监测规程》对隧道结构变形控制的要求。

6 结语

1) 针对新建隧道近距离下穿既有隧道可能导致既有隧道出现过大变形等安全问题,提出在下穿施工前对受影响区段管片采用洞内预备微扰动注浆、永久洞内环向支撑及永久纵向拉紧条加固等措施对既有隧道进行加固;根据现场监测及有限元模拟结果分析可知,上述措施可显著降低被穿越隧道的变形,使其满足规定的变形控制标准,减小下穿施工对既有运营区间隧道的影响。

2) 在新建隧道下穿施工过程中,根据既有隧道沉降量调节盾构掘进参数,如土压力及出土量,采用克泥效进行盾构壳体注浆,调整同步注浆量和上下孔注浆分配方式;在下穿施工后对既有隧道采取二次注浆等措施,有效减小了既有隧道的变形,保护了既有隧道以及施工影响范围内的建筑和管线。

3) 下穿施工完成后,地面会存在一定的后期沉降,继续对轨道交通设施造成影响,因此,需在穿越区隧道内准备充足的补压浆材料及设备,继续进行沉降监测,根据监测情况进行后期补压浆加固。

参考文献

- [1] 钱七虎, SUN Zheng. 城市地下穿越工程的新理论与新技术[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 7.
QIAN Qihu, SUN Zheng. New theory and technology of urban underground crossing engineering [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(11): 7.
- [2] 周顺华. 城市轨道交通施工力学的新挑战[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 560.
ZHOU Shunhua. New challenges in construction mechanics of urban rail transit [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2016, 46(6): 560.
- [3] 宫全美, 张润来, 余杰, 等. 桩底盾构施工引起的桩基承载力损失计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 1384.
GONG Quanmei, ZHANG Runlai, YU Jie, et al. Calculating method of pile bearing capacity loss induced by the tunnel excavation underneath the pile[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(10): 1384.
- [4] 刘映晶, 闵加正, 张文宏, 等. 软土地层盾构近距上跨运营地铁施工技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1147.
LIU Yingjing, MIN Jiazheng, ZHANG Wenhong, et al. Construction technology of shield tunnel excavation above existing tunnels in soft ground[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1147.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 何鹏, 陈兆祥, 张金青, 等. 新建盾构隧道近距离上跨既有运营隧道施工技术[J]. 市政技术, 2019, 37(3): 97.
HE Peng, CHEN Zhaoxiang, ZHANG Jinjing, et al. Tunneling technology closely above the existing operating subway [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(3): 97.
- [8] 陈亮, 黄宏伟, 王如路. 近距离上部穿越对原有隧道沉降的影响分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 83.
CHEN Liang, HUANG Hongwei, WANG Rulu. Analysis of the observed longitudinal settlement of a tunnel caused by an adjacent shield tunneling on top [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 83.
- [9] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962.
ZHU Lei, HUANG Hongwei. Monitoring data analysis of disturbing effect caused by shield-driven over operating tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1962.
- [10] 章邦超. 上软下硬地层区段新建地铁线路盾构法下穿既有地铁运营线路关键施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 132.
ZHANG Bangchao. Key construction techniques for metro lines with shield tunneling method under-crossing existing lines in upper-soft lower-hard stratum [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 132.
- [11] 马云新. 克泥效抑制沉降工法在盾构近距离下穿地铁既有有线工程中的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(1): 94.
MA Yunxin. Application of clay shock method for settlement control in shields crossing the existing subway in short distance [J]. Construction Technology, 2015, 44(1): 94.

· 收稿日期:2022-08-29 修回日期:2022-09-26 出版日期:2025-01-10
Received:2022-08-29 Revised:2022-09-26 Published:2025-01-10
· 第一作者:马西峰,高级工程师,1376614519@qq.com
通信作者:吴逸杰,博士研究生,wyj5170@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license