

DOI: 10.7672/sgjs2025240009

浅覆土盾构小净距上穿对既有区间隧道的影响及控制措施研究*

周毅

(上海隧道工程有限公司, 上海 200032)

[摘要] 郑州新建地铁8号线区间隧道上跨已运营地铁2号线区间隧道, 最小上穿净距1.45m, 2号线上浮风险极大。为保证地铁2号线运营安全, 在2条线路重叠区域采取抗拔桩+盖板+MJS注浆加固的保护性控制措施, 并开展了盾构上穿施工诱发2号线区间隧道变形的现场监测和三维有限元数值模拟。研究结果表明, 盾构小净距上穿施工使得既有区间隧道上浮量超过变形限值; 采取抗拔桩+盖板+MJS注浆加固综合性控制措施后, 既有隧道最大上浮量约3mm, 满足既有隧道变形控制要求。既有区间隧道的上浮大致呈等腰梯形形态; 既有隧道与新建隧道相交位置处的上浮量随左、右线盾构掘进施工的变化规律具有明显对应性; 盾构机在一侧掘进时引起的上浮量大, 在另一侧掘进时引起的上浮量小, 但同一线路上两交点的最终上浮量大致相同。当既有区间隧道邻近地下建筑物时, 受其约束作用, 邻近地下建筑物一侧线路的隧道上浮量要小于未邻近线路的上浮量。

[关键词] 地铁; 盾构; 小净距; 监测; 有限元分析; 控制措施; 上浮

[中图分类号] U231⁺.3; U455.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0009-08

Impact and Control Measures of Shield Tunneling with Small Clear Distance on Overlying Existing Running Tunnels in Shallow Cover Soil

ZHOU Yi

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The newly constructed Metro Line 8 in Zhengzhou crosses over the operational Metro Line 2 running tunnel, with the minimum clearance of 1.45m, posing a significant risk to Metro Line 2. In order to ensure the operational safety of Metro Line 2, protective control measures of anti-pull piles combined with cover plates and MJS grouting reinforcement are taken in overlapping areas of the two lines. Additionally, in-site monitoring and three-dimensional FEM numerical simulation are conducted to assess the potential deformation of Metro Line 2 running tunnel induced by the shield tunneling construction of Metro Line 8. The research results show that the shield tunneling construction with small clearance causes the existing tunnel to exceed the deformation limit; However, after implementing comprehensive control measures of anti-pull piles combined with cover plates and MJS grouting reinforcement, the maximum uplift of the existing tunnel is approximately 3mm, meeting the deformation control requirements. The uplift of the existing tunnel generally takes on a trapezoidal shape; The uplift at the intersection of the existing and new tunnels corresponds significantly to the variations in shield tunneling construction on the left and right lines. The uplift caused by shield tunneling on one side is greater than on the other side, but the final uplift at the two intersection points on the same line is roughly the same. When the existing tunnel is adjacent to underground buildings, the uplift on the side of the tunnel adjacent to the building is smaller than that on the side not adjacent to buildings due to the

* 河南省科技攻关项目(242102321025)

[作者简介] 周毅, 高级工程师, E-mail: 1509600720@qq.com

[收稿日期] 2024-09-23

constraint effect of the nearby structures.

Keywords: subways; shields; small clear distance; monitoring; finite element analysis; control measures; uplift

0 引言

随着我国城市地铁工程的发展,越来越多的地铁线路在大城市修建,立体复杂的地铁线路为城市交通缓解不少压力。然而随着地铁线路的增加,新建地铁隧道上跨或下穿既有线路的情况愈发常见。已有研究表明,当地铁区间隧道上穿已有区间隧道时,上穿隧道盾构掘进施工会引起既有区间隧道上浮,进而危及既有地铁线路的运营安全。

针对新建地铁区间隧道盾构上穿既有地铁区间隧道问题,众多学者和工程技术人员开展了大量研究工作。魏纲等^[1-2]对比分析了新建隧道上穿和下穿时对既有盾构隧道产生变形的影响机理,发现上穿会使既有隧道产生隆起而下穿则会引起既有隧道沉降;为深入研究该问题,建立了盾构上穿既有隧道计算模型,发现盾构掘进会造成下方隧道产生“竖椭圆”分布的附加围压。麻歆等^[3]依托实际工程案例研究了上软下硬地层中新建盾构隧道上穿对既有双线隧道的影响,发现上穿对先穿越的下行线影响更大。张宝刚等^[4]通过三维数值分析探究了隧道在上穿双线隧道过程中既有双线隧道间的协同变形与相互作用机理。此外,王超东等^[5]通过室内模型试验研究了新建隧道上穿施工对周围土层和既有隧道的影响,发现上、下隧道净距越小,既有隧道上方土体受扰动越显著,且既有隧道附加应力就越大;黎庆等^[6]采用三维有限元方法分析了既有盾构隧道受穿越施工扰动后的结构安全状态与服役性能,以隧道纵向差异变形量为指标将施工影响划分为 4 类。

为构建新建隧道近接上穿施工引起的既有盾构隧道纵向变形的简化分析方法,魏纲等^[7]基于转动错台模型和最小势能原理建立了一种简化预测模型;张志伟等^[8]引入接头非连续盾构隧道模型和非线性 Pasternak 地基模型,建立了考虑管片环间接头弱化的模型;刘维正等^[9]将既有线盾构管片视为一系列位于 Pasternak 基础上由拉伸弹簧、压缩弹簧和剪切弹簧连接的弹性地基短梁,建立了基于 Mindlin 理论的简化分析模型;于东东等^[10]提出成层地基中新建隧道上穿作用下盾构隧道纵向位移的解析解答;高坤等^[11-12]基于非连续盾构隧道模型和 Riftin 地基模型及 Kerr 地基模型,提出了预测既有盾构隧道纵向变形的简化分析方法。

为保证地铁区间隧道盾构上穿施工过程中下伏隧道的安全运营,杨志勇等^[13]通过盾构掘进施工参数控制方法来降低对既有运营隧道的影响;武永珍等^[14]采用洞内注浆加固方案、熊四清等^[15]采用袖管注浆方案、许燕峰^[16]在上下隧道交叠区域采用注浆方案、赵宇鹏等^[17]对既有线周围土体采用径向环形注浆加固方案对既有隧道进行了保护,均取得较好效果,不仅减小了既有线隧道管片变形,还改变了既有隧道管片受力。此外,赵秀绍等^[18]采取隧道施加钢支撑环+拱顶注浆的加固措施,使隧道最大变形值较未加固时减小 44.8%。王轲^[19]对既有线路隧洞采取环形钢衬增强和临时钢支撑加固安全措施,在交叠区域对掘进参数进行联合控制,获得了较好效果。

本文结合郑州轨道交通 8 号线盾构区间隧道上跨 2 号线区间隧道掘进施工项目,采用现场监测和 PLAXIS^{3D} 有限元模拟相结合的方法,研究了 8 号线区间隧道小净距上跨掘进施工对既有地铁区间隧道竖向变形的影响规律,探讨了抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固综合保护性控制措施对既有地铁区间隧道上浮的控制效果。

1 工程概况

1.1 工程简介

郑州地铁 8 号线东风路站—枣庄站区间盾构隧道上穿既有地铁 2 号线,区间隧道最小覆土厚度为 4.73m,上穿 2 号线时覆土厚度为 5.04m,穿越最小净距为 1.45m,如图 1a 所示,施工条件极其复杂。8 号线区间隧道与既有 2 号线的重叠段范围长度约为 20.2m,左线叠交范围距洞口 13.5m,右线叠交范围距洞口 17.6m,如图 1b 所示。

1.2 工程地质与水文地质概况

8 号线东风路站—枣庄站区间盾构隧道建设场地位于郑州市区中部,地貌单元属黄河冲积平原。建设场地整体上较平整,勘察揭露的深度范围内的地层主要由黏质粉土、粉砂、细砂组成,分布较稳定,具有明显的成层分布特征。

东风路站—枣庄站区间隧道顶部覆土主要为杂填土、黏质粉土,区间隧道主要穿越黏质粉土层、粉质黏土层,8 号线与既有 2 号线区间隧道间为黏质粉土层,2 号线区间隧道位于黏质粉土层、粉质黏土层、粉砂层,土层分布情况如图 2 所示(土层③₃₋₇,

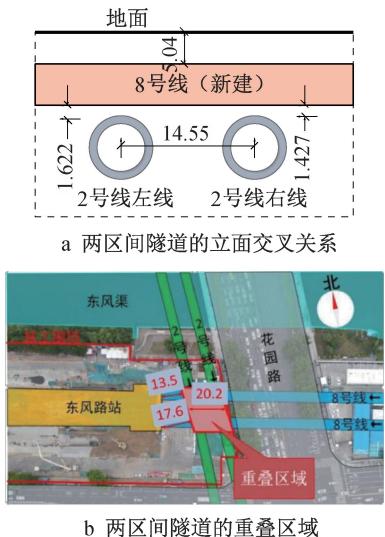


图1 地铁8号线与2号线的空间位置关系(单位:m)

Fig. 1 The spatial relationship between Metro Line 8 and Metro Line 2 (unit:m)

③₅₋₁ 位于②₅₋₁ 下方, 图中未标注)。

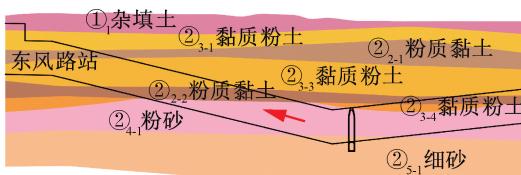


图2 东风路站—枣庄站区间隧道土层分布情况

Fig. 2 Distribution of the soil strata for Dongfeng Road Station-Zaozhuang Station running tunnel

地质勘察报告显示拟建场地地下水水位标高为85.800m, 水位埋深约4.7m, 与8号线区间隧道顶部基本持平; 地下水类型为潜水, 主要受大气降水补给和地下水开采影响, 水位年变幅在2~4m。

1.3 盾构上穿施工的保护性控制措施

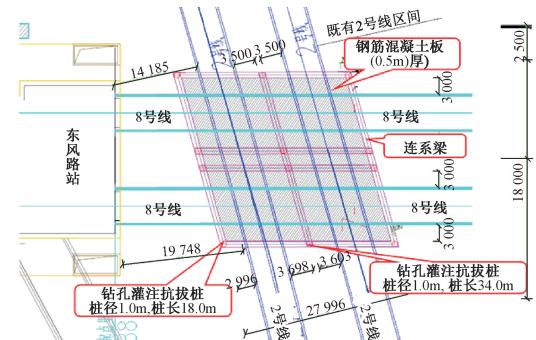
东风路站—枣庄站区间盾构上跨既有2号线区间隧道时存在两方面问题: 8号线浅埋区间隧道的抗浮稳定性问题, 下卧2号线既有区间隧道的上浮问题。

根据地质勘察报告, 该区间隧道所在场地的抗浮设防水位为地面下1.0m, 按GB/T 51438—2021《盾构隧道工程设计标准》^[20]对施工期和使用期抗浮稳定性分别进行了验算, 其中施工期抗浮安全系数为0.812, 使用期抗浮安全系数为0.749, 若采用地面堆载进行抗浮, 施工期砂袋堆载最大高度约为4.3m, 使用期砂袋堆载最大高度约为7.0m, 工程中难以采用。

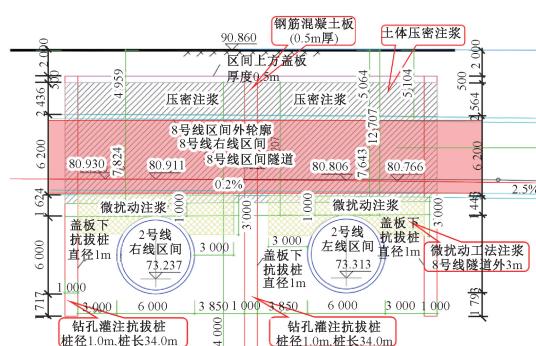
此外, 盾构掘进的卸载效应等可能会引起既有地铁隧道发生不规则隆起并整体上浮; 同时, 开挖

卸荷对既有区间隧道周围的土体进行二次扰动, 穿越施工极易引起既有区间隧道变形过大, 影响地铁运营安全。因此, 为避免8号线盾构掘进过程中既有地铁2号线区间隧道产生较大上浮, 保证2号线正常安全运营, 尚需在8号线盾构上跨2号线区域采取保护性控制措施, 限制2号线区间隧道上浮。

地铁2号线是郑州南北客运的大动脉, 运营期间不允许有任何妨碍地铁正常运营的行为, 因而无法在2号线区间隧道内采取支撑或加固措施, 需采取其他措施控制2号线区间隧道变形。基于此, 项目前期开展了技术比选, 对比分析了地面砂袋堆载方案、刀盘和盾体间隙充填泥效方案和抗拔桩+盖板+MJS注浆加固方案。通过技术比选, 为满足2号线区间隧道上浮量≤5mm的控制标准, 同时满足8号线区间隧道的抗浮稳定性要求, 最终选定抗拔桩+盖板+MJS注浆加固方案, 如图3所示。



a 抗拔桩位置



b 注浆加固范围

图3 抗拔桩+盖板+MJS注浆加固综合控制措施

Fig. 3 Comprehensive control measures by uplift pile + cover plate + MJS grouting reinforcement

首先, 在8号线上跨2号线区间隧道的重叠区域内施工抗拔桩, 其中抗拔桩桩径为1.0m, 2号线两隧道外侧桩长18.0m, 2号线两隧道间桩长34.0m, 如图3a所示。抗拔桩施工完成后, 在桩顶浇筑厚度0.5m的钢筋混凝土盖板, 并与抗拔桩形成整体抵抗土体上浮体系。最后, 在盖板下至2号

线隧道顶部处范围内土体采用袖阀管注浆工艺压密注浆,注浆加固范围如图 3b 所示。

考虑到 2 号线既有区间隧道运营安全问题,且抗拔桩+盖板技术较为成熟,因此,本文研究侧重点在于分析抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固综合控制措施对 2 号线区间隧道变形的控制效果。

1.4 盾构上穿施工的现场监测布置

为保证 8 号线区间隧道盾构掘进过程中 2 号线区间隧道结构安全和正常运营,在 2 号线隧道内布设了竖向位移监测点,如图 4 所示。

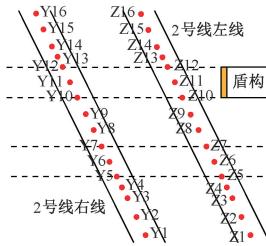


图 4 地铁 2 号线隧道结构竖向位移监测点

Fig. 4 Vertical displacement monitoring points of Metro Line 2 tunnel structure

盾构掘进过程中,采用测量机器人进行竖向位移监测。为实现自动化监测,基准点布设在远离变形区以外的车站结构侧壁上。同时,为使各监测点误差均匀并使全站仪易自动寻找目标,制作全站仪托架并安装在隧道侧壁上,距道床高度约 0.5m。

2 区间隧道盾构上跨施工三维有限元模型

2.1 三维有限元模型

采用 PLAXIS^{3D} 软件对地铁 8 号线区间盾构隧道上穿既有地铁 2 号线工程建立三维有限元模型进行计算分析。三维有限元计算模型如图 5 所示。计算模型包括地基土体、既有地铁 2 号线区间隧道、拟建地铁 8 号线区间隧道、抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固综合控制措施。其中,为简化模型,地基土体采用 4 结点四面体实体单元模拟;钢筋混凝土盖板采用 plate 单元模拟;抗拔桩采用 embedded beam 单元模拟;MJS 注浆加固通过改变材料参数方法实现,忽略对 MJS 注浆压力的模拟;盾构壳体与管片均采用 plate 单元模拟,其中,盾构掘进过程采用隧道设计器进行定义,包括隧道断面、注浆压力、掌子面压力、千斤顶推力等及盾构掘进轨迹与掘进过程的定义。

有限元模型尺寸为 155m×86m×38m,其中,沿 8 号线区间隧道掘进方向 155m,沿 2 号线区间隧道方向 86m;深度方向应大于 2 号线区间隧道最底部深度的 2 倍,考虑到土层实际条件,取为 38m,即②₅₋₁ 细砂底部。此外,2 号线右线线路中心与 8 号

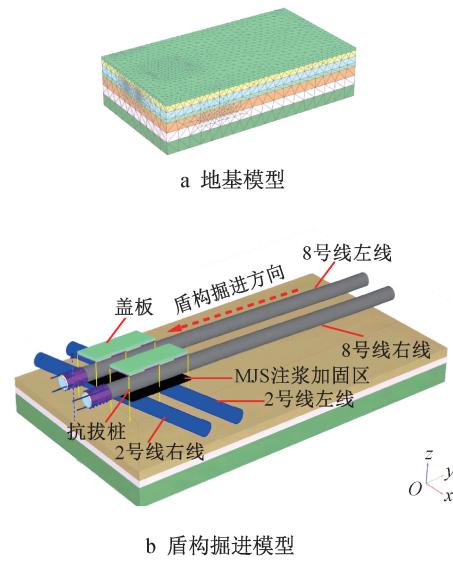


图 5 三维有限元计算模型

Fig. 5 3D finite element model

线东风路站端头井最近距离约 17.7m,且 8 号线东风路站端头井及与之相连的出入口、风道等附属结构总宽度约为 40m,大于 8 号线与 2 号线区间隧道重叠区域。因此,可将东风路站端头井位置视为截断边界,忽略地铁站结构对 8 号线盾构掘进的影响。

有限元模型的边界条件具体为:上边界取至地面,为自由面;4 个侧面地层边界限制水平位移;下部边界限制竖向位移。

2.2 土体参数与结构单元参数

在岩土工程数值模拟中,地基土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型较为方便,模型参数宜获取,但由于 Mohr-Coulomb 本构模型中加载和卸载模量一致,预测地表变形及对周边环境的影响时易出现较大偏差^[14],特别是对于盾构掘进卸载问题,地基土体和衬砌结构会出现过大回弹变形。为此,本文选用 HS-Small 本构模型(小应变硬化模型),该模型能较好地考虑土体小应变特性,能更好地模拟盾构掘进开挖卸载引起的地基土体变形和既有 2 号线区间隧道的变形。

HS-Small 本构模型包括 11 个 HS 模型参数和 2 个小应变参数。参考本工程场地的工程地质勘察报告,并参考目前文献中关于刚度参数与常规参数间的经验公式,结合本地区经验等,最终确定场地各土层的 HS-Small 本构模型参数如表 1 所示。

区间隧道管片混凝土强度等级为 C60,抗拔桩和钢筋混凝土盖板混凝土强度等级为 C30,考虑到混凝土在盾构掘进过程中多处于弹性状态,采用线弹性本构模型模拟,其中,C30 混凝土参数为重度 25kN/m³、泊松比 0.2、弹性模量 30.0GPa,C60 混凝

表 1 场地各土层的 HS-Small 本构模型计算参数

Table 1 The calculation parameters of HS-Small constitutive model for each soil layer of the site

土层 编号	γ' ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$c'/$ kPa	$\varphi'/$ ($^\circ$)	$\psi'/$ ($^\circ$)	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{50}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ MPa	$G_0^{\text{ref}}/$ MPa	$\gamma_{0.7}$	K_0	m	R_f	$p^{\text{ref}}/$ kPa	v_{ur}
① ₁	17.0	15.0	15	0	5.0	5.0	40.0	80.00	1.0	0.74	0.80	0.90	100	0.3
② ₃₋₁	18.2	19.0	20	0	6.5	6.5	32.5	42.25	2.0	0.66	0.65	0.90	100	0.2
② ₂₋₁	18.5	21.5	15	0	4.9	6.0	30.0	40.00	4.0	0.74	0.80	0.90	100	0.2
② ₃₋₃	19.6	16.0	25	0	9.0	10.7	63.0	90.00	2.1	0.58	0.65	0.90	100	0.2
② ₄₋₁	20.0	3.0	28	0	20.0	20.0	60.0	108.00	2.2	0.53	0.60	0.85	100	0.2
② ₅₋₁	20.0	1.0	32	0	25.0	25.0	75.0	140.00	2.2	0.47	0.60	0.85	100	0.2
③ ₃₋₇	18.8	16.5	24	0	10.0	11.0	70.0	100.00	1.9	0.59	0.65	0.90	100	0.2
③ ₅₋₁	20.0	1.0	32	0	30.0	30.0	90.0	155.00	2.2	0.47	0.60	0.85	100	0.2

注: γ 为土的重度; c' 为土的有效黏聚力; φ' 为土的有效内摩擦角; ψ' 为土的剪胀角; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为固结试验中的参考切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴排水剪切试验中的参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴排水剪切试验中的参考加卸载模量; G_0^{ref} 为小应变刚度试验中的参考初始模量; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减至初始剪切模量 70% 所对应的剪应变; K_0 为正常固结条件下静止侧压力系数; m 为刚度应力水平相关幂指数; R_f 为破坏比; p^{ref} 为参考应力; v_{ur} 为加卸载泊松比

土参数为重度 $25\text{kN}/\text{m}^3$ 、泊松比 0.2、弹性模量 36.0GPa 。

抗拔桩采用桩体单元模拟, 抗拔桩的计算参数如下: 桩体弹性模量 E 为 30.0GPa , 重度 γ 为 $25\text{kN}/\text{m}^3$, 桩径 D 为 1.0m 。桩侧摩阻力 f_s 根据地层条件取值, 在注浆加固区内为 $376\text{kN}/\text{m}$, 在非注浆加固区内为 $190\text{kN}/\text{m}$ 。据此, 单桩的极限抗拔承载力 F_{max} 设计为 $2\,000\text{kN}$ 。

2.3 模拟工况

在实际工程中, 盾构掘进是一个连续的施工过程, 因此, 数值模拟应依据施工工序模拟盾构逐环掘进施工的过程。此外, 在 8 号线盾构逐环掘进至与 2 号线重叠区域前, 尚应模拟抗拔桩、盖板和 MJS 注浆加固过程。盾构逐环掘进及抗拔桩、盖板施工等通过有限元软件的“激活”与“钝化”来实现, 其中, “激活”是生成单元, “钝化”是杀死单元。MJS 注浆加固区的模拟则是通过修改该区域的材料参数实现。

根据实际盾构掘进施工和保护性控制措施的施工工序, 有限元数值模拟施工步骤如图 6 所示。

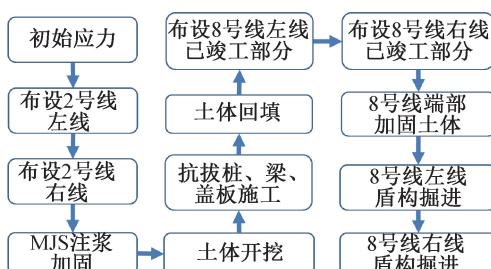


图 6 有限元数值模拟施工步骤

Fig. 6 Finite element numerical simulation construction steps

3 结果与分析

本文主要研究浅覆土条件下地铁 8 号线区间盾

构上穿施工引起下伏地铁 2 号线区间隧道的变形情况, 分析抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固综合性控制措施的实施效果。

3.1 现场监测结果与分析

为确保地铁 2 号线区间隧道安全, 现场监测从两线重叠区域保护性控制措施施工开始, 直至 8 号线右侧区间隧道推进完成。其中, 地铁 2 号线左线各监测点监测结果如图 7 所示。

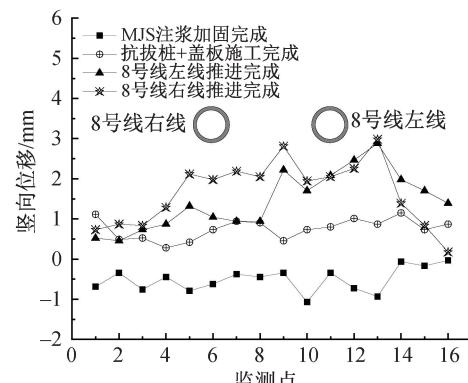


图 7 地铁 2 号线左线隧道竖向位移监测结果

Fig. 7 Vertical displacement monitoring results of the left tunnel of Metro Line 2

图 7 所示监测结果分析如下: ① 在 MJS 注浆加固阶段, 各测点均产生了轻微下沉, 普遍沉降量在 $0\sim 1\text{mm}$, 这主要是受 MJS 注浆时地面设备堆载及区间隧道上方注浆压力影响; ② 钢筋混凝土盖板施工完成后隧道产生一定程度的上浮, 上浮量约在 1mm , 最大上浮量为 1.2mm , 主要由地面开挖卸载造成; ③ 8 号线左线施工后, 断面 8~14(位于 8 号线左线下方) 范围的隧道产生进一步上浮, 上浮量在 $2\sim 3\text{mm}$, 8 号线左线下方断面上浮量较大, 并沿 2 号线轴线方向向两侧递减; ④ 8 号线右线施工后, 在断面 4~7(位于 8 号线右线下方) 范围的

隧道产生上浮,上浮量在 2~3mm,因先前左线施工造成上浮部分未进一步上浮,最终 2 号线隧道呈等腰梯形形状隆起。

为进一步分析 8 号线盾构掘进对地铁 2 号线区间隧道结构变形的影响,绘制了 2 号线左线监测点 Z11(两隧道中轴线交叉点)的监测结果,如图 8 所示。

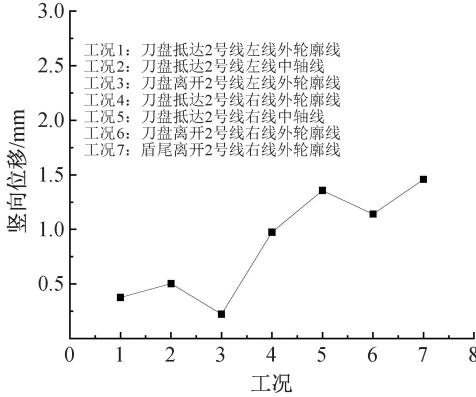


图 8 地铁 2 号线左线隧道测点 Z11 的监测结果

Fig. 8 Monitoring results of measuring point Z11 in the left tunnel of Metro Line 2

由图 8 可知,在盾构机刀盘穿越 2 号线左线隧道外轮廓至隧道轴线过程中,测点 Z11 轻微上浮;当盾构机刀盘跨过 2 号线左线隧道中轴线后,直至整个盾构机体位于 2 号线左线隧道轮廓上方时,测点 Z11 稍有下沉;盾构机离开 2 号线左线隧道后,测点 Z11 逐渐上浮,直至在工况 5 时达到上浮最大值,此后又趋于稳定。产生上述现象的原因分析如下:盾构刀盘切削土体使 2 号线隧道上方土体产生应力释放,造成 2 号线管片上浮;当盾构机逐渐推进至 2 号线上方时,由于盾构机自重原因造成既有 2 号线管片微量沉降;随着盾构机离开 2 号线轮廓上方,而新建 8 号线隧道结构自重小于原本地层自重,导致 2 号线产生进一步上浮;随着盾构机远离 2 号线左线范围,盾构掘进对 2 号线左线影响逐渐趋于微弱。

3.2 数值模拟结果与分析

3.2.1 数值模拟验证

为验证本文有限元模型的合理性,将有限元计算结果与现场监测结果进行对比,为简化起见,取 2 号线左线隧道监测点 Z11 的竖向位移进行对比,对比计算结果如图 9 所示。

由图 9 可知,本文有限元计算结果与现场监测结果较为近似,虽在量值上尚存在一定差距,但基本能反映出抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固的综合性保护措施及 8 号线盾构掘进施工对下伏 2 号线管片衬砌的影响。其中,有限元计算结果与现场监测结

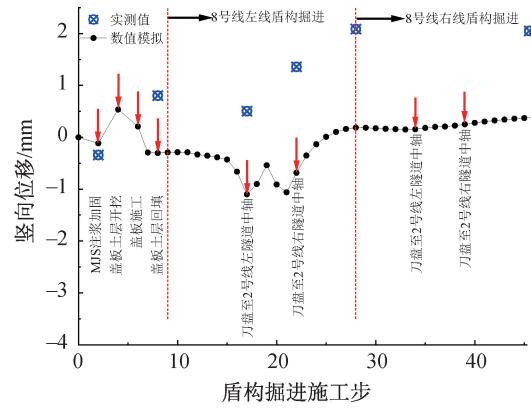


图 9 有限元计算结果与现场监测结果对比

Fig. 9 Comparison between FEM calculation results and on-site monitoring results

果的主要差异来源于盖板上方土层回填,盖板回填后,由于地基加载作用使得 2 号线管片产生沉降,而现场监测结果则仍为上浮 1mm,产生这种现象的原因可能是有限元模型忽略了 MJS 注浆加固过程的模拟,仅通过改变材料特性的方法来模拟 MJS 注浆加固措施。当忽略该施工步骤产生的变形差异,即盖板土层回填后至 8 号线左线盾构掘进完成这一阶段产生的 2 号线管片上浮量值,有限元结果与现场监测结果基本一致。

上述结果表明,本文建立的有限元模型基本可对 8 号线盾构上穿 2 号线施工进行合理模拟。

3.2.2 抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固的控制效果分析

为分析本项目采取的抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固综合性控制措施对 2 号线区间隧道变形的控制效果,对比分析是否采取控制措施的计算结果,如图 10 所示。

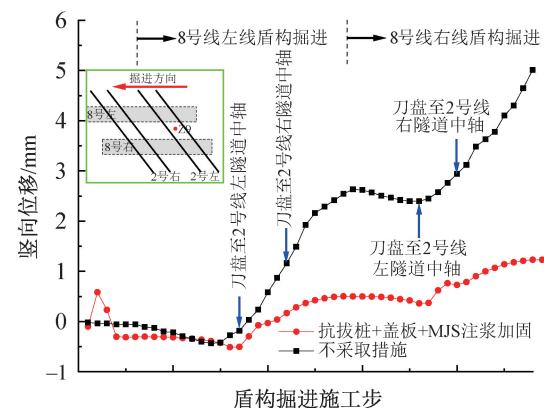


图 10 是否采取保护性措施时 2 号线左线隧道管片上浮量对比

Fig. 10 Comparison of floating amount of the left tunnel segment of Metro Line 2 with and without controlling measure

由图 10 可知,若不采取保护性控制措施,8 号线左线盾构掘进时会引起 Z9 点的上浮,最大上浮量约为 2.5mm;当 8 号线右线盾构掘进时,Z9 点产生进一步上浮,最终使得 Z9 点管片上浮量>5mm,超过了 2 号线区间隧道位移控制限值。与此不同,采取抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固的保护性控制措施时,8 号线盾构掘进过程中 2 号线区间隧道的上浮受到较大约束,其上浮量远未超过位移限值。

3.2.3 盾构掘进过程中下伏 2 号线区间隧道竖向变形分析

为进一步认识 8 号线盾构掘进施工过程中对下伏 2 号线区间隧道竖向变形的影响规律,取 2 号线左线隧道不同位置处的竖向变形进行对比分析,结果如图 11 所示。

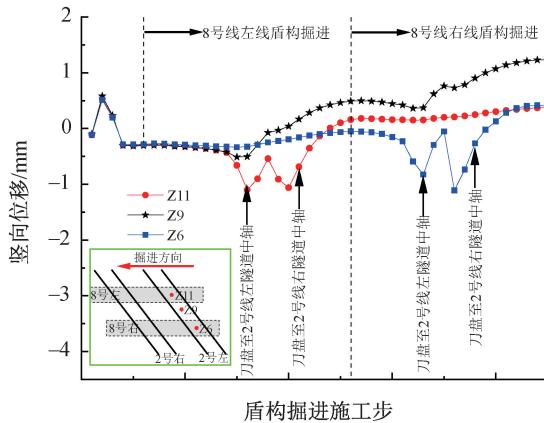


图 11 8 号线盾构掘进施工引起的 2 号线左线隧道竖向位移

Fig. 11 Vertical displacement of the left tunnel of Metro Line 2 caused by construction of Metro Line 8

由图 11 可知,8 号线盾构掘进施工过程中,2 号线不同位置处的竖向变形差别较大:Z11 点和 Z6 点分别位于 8 号线左、右线隧道与 2 号线区间隧道的重叠处,其变形存在一定的对应性,如 8 号线左线隧道掘进对 Z11 点的影响规律与 8 号线右线隧道掘进对 Z6 点的影响规律近似,这两点的最终变形较接近。此外,Z9 点位于 8 号线两区间隧道之间,8 号线左、右线盾构掘进对 Z9 点均产生较大影响,且最终变形较其他两点大,这与图 7 给出的规律基本一致;与 Z9 点不同,由于距离问题,Z11 点受 8 号线右线隧道施工、Z6 点受 8 号线左线隧道施工的影响均较小。

此外,由于 2 号线右线隧道(见图 3)距 8 号线东风路站较近,由于地铁站先于区间隧道建成,因此,2 号线右线隧道变形必然受既有地铁站位移约束作用。8 号线盾构掘进过程中地铁 2 号线左、右

线隧道不同位置处的竖向变形如图 12 所示。由图 12 可知,8 号线施工完成后,2 号线右线隧道测点(Y11, Y9)的竖向变形明显小于左线隧道的相同位置测点(Z11, Z9)的竖向变形,即 2 号线右线隧道受既有地铁站结构的约束作用,产生更小上浮变形。

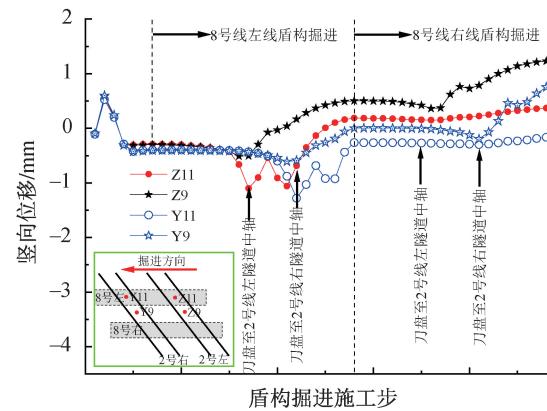


图 12 8 号线盾构掘进施工引起的 2 号线隧道竖向位移

Fig. 12 Vertical displacement of Metro Line 2 tunnel caused by construction of Metro Line 8

4 结语

1) 盾构区间隧道小净距上穿掘进施工会引起既有区间隧道产生上浮,采取抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固综合性控制措施可有效控制既有区间隧道上浮变形,最大上浮量约在 3mm,保证了既有区间隧道的安全运营。

2) 有限元分析表明,若不采取控制措施,区间隧道小净距上穿既有隧道时会使得既有隧道上浮变形超过限值,抗拔桩+盖板+MJS 注浆加固控制措施可较好地控制既有隧道上浮。

3) 现场监测和有限元结果均表明,盾构上穿掘进施工引起既有隧道的上浮大致呈等腰梯形形态;既有隧道与新建隧道相交位置处的上浮量随左、右线盾构掘进的变化规律具有明显的对应性,盾构机在一侧掘进时引起的上浮量大,在另一侧掘进时引起的上浮量小,但既有隧道同一线路上两交点的最终上浮量大致相同。

4) 当既有地铁隧道邻近地下建(构)筑物时,受其约束作用,邻近地下建(构)筑物一侧线路隧道的上浮量要小于未邻近线路的上浮量。

参考文献:

- [1] 魏纲,杨波,俞国骅. 盾构不同穿越形式引起既有盾构隧道变形机理分析[J]. 现代隧道技术,2018,55(S2):1020-1027.
- WEI G, YANG B, YU G H. Mechanism analysis of deformation of existing shield tunnel caused by different shield crossing forms [J]. Modern tunnelling technology, 2018, 55 (S2): 1020-1027.

- [2] 魏纲,冯非凡,齐永洁,等.盾构隧道全过程穿越对下方既有隧道的影响研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 69-79.
WEI G, FENG F F, QI Y J, et al. Influence of shield tunneling on existing shield tunnel below [J]. Tunnel construction, 2022, 42(S2): 69-79.
- [3] 麻歆,王军华,谢家冲,等.上软下硬地层盾构上穿既有地铁双线隧道的工程实例分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2849-2854.
MA X, WANG J H, XIE J C, et al. Engineering example analysis of shield tunneling through existing subway double-line tunnel in soft ground and hard ground [J]. Building structure, 2022, 52(S1): 2849-2854.
- [4] 张宝刚,谢家冲,黄昕.盾构上穿下既有双线隧道相互作用机制的三维数值分析 [J]. 中外公路, 2023, 43(6): 247-252.
ZHANG B G, XIE J C, HUANG X. 3D numerical analysis on interaction mechanism of two existing lines over-crossed by shield tunnel [J]. Journal of China & foreign highway, 2023, 43(6): 247-252.
- [5] 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.
WANG C D, LAI P A, CAO Y, et al. Experimental study on influence of construction distance of oblique shield tunnels on existing tunnel [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(5): 231-236.
- [6] 黎庆,王宁,彭红霞,等.南京富水松软地层新建盾构隧道穿越引起的既有隧道工程安全等级划分 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 137-141, 147.
LI Q, WANG N, PENG H X, et al. Engineering safety level classification of existing tunnel disturbed by newly-built shield tunnel crossing water-rich and soft stratum in Nanjing [J]. Urban mass transit, 2023, 26(6): 137-141, 147.
- [7] 魏纲,杨波,吴华君,等.盾构穿越引起的既有盾构隧道纵向变形研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1754-1762, 1808.
WEI G, YANG B, WU H J, et al. Research on longitudinal deformation of existing shield tunnel caused by shield tunneling [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(6): 1754-1762, 1808.
- [8] 张志伟,梁荣柱,高坤,等.考虑管片环间接头弱化的新建隧道上穿引起既有盾构隧道纵向变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2955-2970.
ZHANG Z W, LIANG R Z, GAO K, et al. Analysis of longitudinal deformation of existing shield tunnel caused by new tunnel crossing considering the weakening of segment ring indirect head [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2022, 41(S1): 2955-2970.
- [9] 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): 831-842.
LIU W Z, DAI X Y, SUN K, 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): 831-842.
- [10] 于东东,李忠超,梁荣柱,等.层状地基新建隧道上穿引起盾构隧道纵向变形耦合分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(5): 804-815.
YU D D, LI Z C, LIANG R Z, et al. Coupling analysis of longitudinal deformation of shield tunnel caused by overcrossing tunneling in layered soils [J]. Tunnel construction, 2023, 43(5): 804-815.
- [11] 高坤,苏校锋,张志伟,等.新建隧道上穿引起既有盾构隧道纵向隆起分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(5): 770-778.
GAO K, SU X F, ZHANG Z W, et al. Longitudinal uplift analysis of existing shield tunnel induced by new overcrossing tunnel [J]. Tunnel construction, 2023, 43(5): 770-778.
- [12] 高坤,张志伟,梁荣柱,等.新建隧道近接上穿对既有盾构隧道纵向变形的影响 [J]. 安全与环境工程, 2024, 31(2): 110-119, 136.
GAO K, ZHANG Z W, LIANG R Z, et al. Influences of above-crossing tunnelling on the longitudinal deformation of existing shield tunnel [J]. Safety and environmental engineering, 2024, 31(2): 110-119, 136.
- [13] 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): 1898-1904.
YANG Z Y, YANG X, JIANG Y S, et al. Construction control technology of shield overcrossing adjacent existing operation tunnel [J]. Tunnel construction, 2019, 39(11): 1898-1904.
- [14] 武永珍,王亚会,陆瑶.新建隧道上跨施工对既有隧道的影响及加固措施研究 [J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 18-25.
WU Y Z, WANG Y H, LU Y. Study on the influence of the construction of the new tunnel on the existing tunnel and the reinforcement measures [J]. Construction technology, 2017, 46(S2): 18-25.
- [15] 熊四清,赵瑞桐.上跨既有隧道注浆加固措施对新建隧道施工力学行为影响研究 [J]. 工程与建设, 2018, 32(3): 432-435.
XIONG S Q, ZHAO R T. Investigation on the influence of grouting reinforcement of existing tunnel to mechanical behavior of new tunnel construction [J]. Engineering and construction, 2018, 32(3): 432-435.
- [16] 许燕峰.新建地铁与既有线交叠区域地基处理加固分析 [J]. 铁道勘察, 2020, 46(5): 51-57.
XU Y F. Analysis of foundation treatment and reinforcement for overlapping areas of new subway and existing subway lines [J]. Railway investigation and surveying, 2020, 46(5): 51-57.
- [17] 赵宇鹏,陈道政.盾构隧道上跨施工对既有隧道变形的影响研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(11): 1525-1530.
ZHAO Y P, CHEN D Z. Research on the influence of overcrossing shield tunnel construction on the deformation of existing tunnels [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2021, 44(11): 1525-1530.

- 中国公路,2020(13):84-85.
- MA Y H. Gas prediction method and construction technology of expressway tunnel in mountainous area [J]. China highway, 2020(13):84-85.
- [2] 符亚鹏,姚志刚,方勇,等.隧道开挖对下伏水平薄煤层采空区地层的扰动及衬砌受荷特征[J].岩土力学,2016,37(S1):117-125.
- FU Y P, YAO Z G, FANG Y, et al. Soil disturbance caused by tunnel excavation and lining loading characteristics in underlying horizontal thin coal mined-out area[J]. Rock and soil mechanics, 2016,37 (S1) :117-125.
- [3] 宋双全.高应力软岩隧道衬砌结构探讨[J].湖南交通科技,2018,44(3):182-185.
- SONG S Q. Discussion on lining structure of high stress and soft rock tunnel[J]. Hunan communication science and technology, 2018,44(3):182-185.
- [4] 乔春江,陈卫忠,王辉,等.浅埋破碎地层隧道施工方法研究[J].岩土力学,2011,32(S2):455-462,468.
- QIAO C J, CHEN W Z, WANG H, et al. Study on construction method of shallow-buried tunnel in broken stratum[J]. Rock and soil mechanics,2011,32 (S2) :455-462,468.
- [5] 范永慧.三台阶临时仰拱中柱工法在浅埋大跨隧道围岩施工中的应用及效果分析[J].湖南交通科技,2023,49(4):158-163.
- FAN Y H. Application and effect analysis of three step temporary inverted arch middle column construction method in surrounding rock construction of shallow buried large span tunnel[J]. Hunan communication science and technology, 2023,49(4):158-163.
- [6] 党红章.岗头隧道大跨软弱围岩台阶法施工技术[J].公路交通技术,2012,28(1):91-93,98.
- DANG H Z. Construction techniques of benching tunnelling method for large-span weak wall rocks in Gangtou Tunnel [J].
- [7] 普红祥,郭德平,姚超凡,等.软岩地层变截面铁路隧道开挖方法适应性试验研究[J].现代隧道技术,2023,60 (S1):104-111.
- PU H X, GUO D P, YAO C F, et al. Experimental study on adaptability of excavation method of variable cross-section railway tunnel in soft rock stratum [J]. Modern tunnelling technology, 2023,60 (S1) :104-111.
- [8] 李现宾,王磊.多煤层夹断层影响下隧道开挖进尺分析[J].现代隧道技术,2019,56 (S2) :355-361.
- LI X B, WANG L. Analysis of tunnel excavation footage under the influence of multiple coal seams with faults [J]. Modern tunnelling technology, 2019,56 (S2) :355-361.
- [9] ZHAO W S, GAO H, CHEN W Z, et al. Experimental study on similar materials for tunnel lining concrete in geomechanical model tests[J]. Engineering failure analysis, 2023,152:107456.
- [10] XIAO J Z, DAI F C, WEI Y Q, et al. Comparative analysis of excavation schemes for a tunnel constructed through loose deposits [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2016, 30(4) :04015061.
- [11] WU K, SHAO Z S, QIN S, et al. A critical review on the performance of yielding supports in squeezing tunnels [J]. Tunnelling and underground space technology, 2021, 115:103815.
- [12] 康宝祥,宋战平,张庆贺,等.倾斜煤系地层大断面客专隧道大变形原因分析及处置[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(2):89-99.
- KANG B X, SONG Z P, ZHANG Q H, et al. Causal analysis and disposal on large deformation of large section passenger dedicated line tunnel in inclined coal strata [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2024,46(2):89-99.

(上接第 16 页)

- [18] 赵秀绍,魏度强,于万友,等.小曲线半径盾构隧道上穿既有隧道影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1216-1224.
- ZHAO X S, WEI D Q, YU W Y, et al. Impact analysis of small curve radius shield tunnel crossing existing tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17 (4) : 1216-1224.
- [19] 王轲.盾构小净距上跨运营地铁(既有线)区间关键技术研究[J].工程技术研究,2023,8(11):211-213.
- WANG K. Research on key technologies for shield overcrossing

operating subway(existing line) sections with small clear distance [J]. Engineering and technological research, 2023, 8 (11) : 211-213.

- [20] 北京城建设计发展集团股份有限公司,广州地铁设计研究院有限公司.盾构隧道工程设计标准:GB/T 51438—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Guangzhou Metro Design Institute Co., Ltd. Standard for design of shield tunnel engineering: GB/T 51438—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.