

DOI: 10.7672/sgjs2026070099

盾构上跨既有地铁曲线隧道变形特性分析*

程熙洋¹,于定江²,应本林¹,刘哲¹

(1. 中铁七局集团有限公司,河南 郑州 450016; 2. 郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450001)

[摘要] 针对郑州市轨道交通7号线盾构隧道与既有地铁4号线曲线隧道形成近距离斜交上跨的特殊工况,采用现场监测和数值模拟相结合的方法,分析既有曲线隧道的时序变形特征和空间变形规律。研究表明:盾构上跨既有地铁曲线隧道的变形以竖向位移为主,尤其在新旧隧道穿越段最为明显,时序变形特征为先沉降后隆起,在空间变形特征分析中,竖向位移曲线呈“单峰”状对称分布,竖向变形主要表现为隆起变形;模型与实测结果基本吻合,可利用该模型指导实际工程。

[关键词] 隧道;盾构;变形;监测;有限元分析

[中图分类号] U455.43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0099-05

Analysis of Deformation Characteristics in Shield Tunnel Above-crossing an Existing Curved Subway Tunnel

CHENG Xiyang¹, YU Dingjiang², YING Benlin¹, LIU Zhe¹

(1. China Railway Seventh Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China;

2. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In response to the unique construction conditions where the shield tunnel of Zhengzhou Rail Transit Line 7 forms a close-proximity oblique intersection and overpass with the existing curved tunnel of Metro Line 4, a combined approach of field monitoring and numerical simulation was employed to analyze the temporal deformation characteristics and spatial deformation patterns of the existing curved tunnel. The results indicate that the deformation of the existing curved subway tunnel caused by the shield tunnel crossing over it is primarily vertical displacement, which is most pronounced in the section where the new and old tunnels intersect. The temporal deformation pattern follows a sequence of initial settlement followed by uplift. In the analysis of spatial deformation characteristics, the vertical displacement curve exhibits a symmetrical “single-peak” distribution, with vertical deformation primarily manifesting as uplift. The model results are generally consistent with field measurements. And this model can be utilized to guide practical engineering projects.

Keywords: tunnels; shields; deformation; monitoring; finite element analysis

0 引言

越来越复杂的城市地下交通网络使得新旧隧道穿越工程逐渐增多^[1],但由于郑州市所处的黄河冲淤积平原地区土质以级配极差、孔隙率较高、压缩性较大的粉质土为主,工程性质差,所以此类穿越工程的安全问题逐渐成为研究重点。

目前国内外针对盾构穿越工程问题有多种研

究方法,并取得一定的成果,如 Liu 等^[2]、张晓清等^[3]采用 ABAQUS 和 TUNNEL3D 软件,模拟了多线盾构垂直上穿、下穿和上下夹穿 3 种典型施工工况,通过与试验结果的对比较证,指出上穿施工会导致较大的地表沉降,既有隧道均呈隆起趋势。Zhu 等^[4]利用 ANSYS 有限元分析软件模拟了新建隧道开挖引起的既有隧道位移变化和结构变形规律,明确新建隧道开挖对既有隧道稳定性的影响。张孟喜等^[5]采用三维动态有限元数值模拟并结合现场监测的手段,解决在全风化花岗岩地层中盾构隧道上穿广州地铁 7 号线时面临的注浆压力合理取值与

* 河南省自然科学基金面上项目(252300421855);河南省重点研发专项(231111322100)

[作者简介] 程熙洋,工程师,E-mail:848894882@qq.com

[通信作者] 于定江,硕士研究生,E-mail:ydingjiang@163.com

[收稿日期] 2025-08-10

既有隧道变形控制两大难题。汤新辉等^[6]利用 FLAC3D 软件建立模型,研究了在中风化泥质粉砂岩地层中小净距盾构上穿全过程及后期加固时既有线路的纵向位移规律,并给出加固建议。在新建隧道上穿既有隧道工况实测数据研究中,朱蕾等^[7]通过对上海地铁 13 号线上穿地铁 4 号线的变形实测数据进行分析,探讨了在上穿施工的影响下既有隧道会产生滞后的隆起变形,并总结了隆起变形的收敛时间以及二次穿越会增加隆起变形的稳定时间和变形量。梅文胜等^[8]和张立亚等^[9]利用测量机器人实时自动化监测系统,对盾构穿越既有线路过程中既有隧道的变形进行实时监测,分析既有隧道变形规律并给出有益的风险控制建议。陈亮等^[10]和麻歆等^[11]通过对上海地铁 8 号线上穿既有地铁 2 号线的监测数据进行分析,认为隧道沉降变化可分为先期沉降、盾构通过时隆起、盾构穿越后一定时间内的隆起和后期沉降 4 个阶段,且指出盾构穿越后发生的变形更为重要。

然而,上述研究大都采用参数少且取值简单的莫尔-库仑模型,变形计算易产生较大误差。此外,既有曲线隧道在不同加固措施或掘进参数下的变形特性有待进一步研究。本文依托郑州市轨道交通 7 号线盾构隧道上穿既有地铁 4 号线实际工程,通过现场实测分析,总结既有隧道的时序变形特征和空间变形规律;利用有限元分析软件 PLAXIS 3D 对盾构隧道上穿既有曲线隧道施工进行数值模拟,采用小应变硬化土模型^[12-14](即 HSS 模型),确定模型可行性的同时,分析近距离上跨对既有曲线隧道变形的影响。

1 工程概况

1.1 场地环境

郑州市轨道交通 7 号线一期工程龙门路站—张家村站区间场地位于郑州市北部,开挖由右线、左线 2 台盾构机从龙门路站南端头井间隔 1 个月先后始发,上跨运营的地铁 4 号线,上跨段 4 号线区间左线隧道埋深 14.76~15.81m,7 号线区间交叉位置处隧道埋深 6.32~8.27m。上跨处正上方 7 号线区间左线隧道与 4 号线左线隧道竖向净距 2.441m,上跨处正上方 7 号线区间右线隧道与 4 号线左线隧道竖向净距 1.663m。

1.2 工程地质条件

该工程所处地貌单元为黄河冲洪积泛滥平原,7 号线区间隧道所在地层主要为粉质黏土、粉土、黏质粉土;4 号线区间隧道所在地层主要为黏质粉土、粉砂、细砂。勘探深度内含水层为上层潜水和下层

承压水,分别由大气降水补给和潜水越流补给。现场实测水位稳定在 17.250m 左右,绝对标高 72.750m 左右,位于 7 号线下方。区间隧道地质纵断面如图 1 所示。

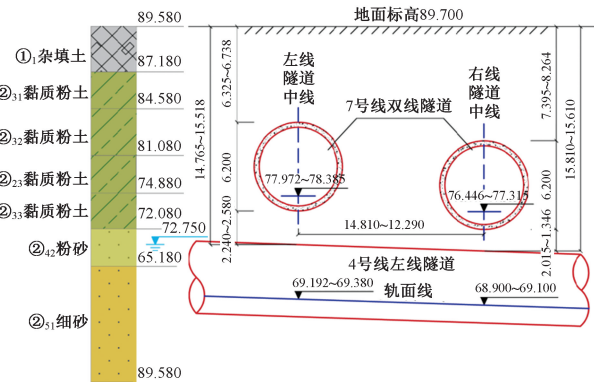


图 1 区间隧道地质纵断面(单位:m)

Fig.1 Geologic longitudinal section of interval tunnel(unit:m)

1.3 监测方案

为了研究 7 号线上跨过程中 4 号线隧道各点的位移情况,沿 4 号线隧道轴线方向布设监测点,垂直隧道轴向每 20~30m 布置 1 处横向监测断面,新旧隧道平面相对位置以及监测点分布如图 2 所示。根据规范要求,结合该工程穿越段的工程环境,对 7 号线盾构隧道与 4 号线隧道上跨段和并行段采用以自动化监测为主、人工监测为辅的方法。

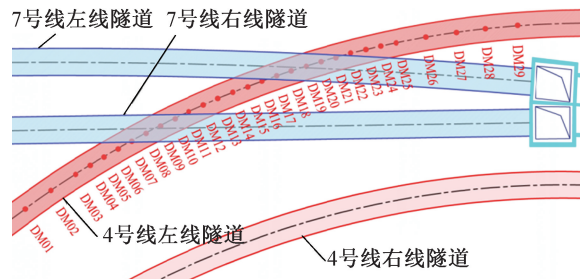


图 2 监测点平面布置

Fig.2 Layout of monitoring points

2 施工监测结果分析

2.1 既有隧道时序变形特征分析

为了研究开挖过程中既有隧道的时序变形特征,通过监测数据对隧道进行时序变形分析,由于新建 7 号线与既有 4 号线右线隧道处于并行段,因此 7 号线施工对 4 号线右线影响较小,在此不做分析。选取 7 号线双线隧道与 4 号线左线隧道斜交段各 5 个 (DM07~DM11, DM16~DM20) 监测点进行分析。在 7 号线右线与左线先后开挖过程中,以盾构掘进到影响区域为时间零点,分别测量了右线与左线开挖 10d 内既有隧道左线的竖向位移,其中 1~3d 为穿越时间,得到既有 4 号线隧道累计竖向位移曲

线如图 3 所示。

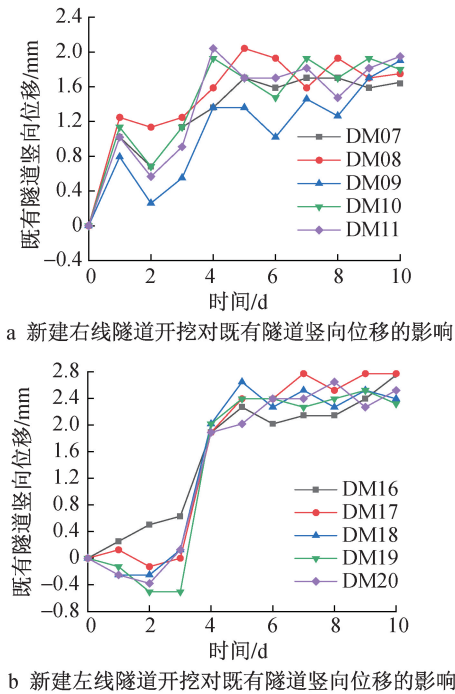


图 3 新建隧道对既有隧道竖向位移的影响
Fig. 3 Effect of new tunnels on the vertical displacement of existing tunnels

由图 3 可知:双线隧道上跨对既有隧道竖直方向上的变形影响以隆起为主,局部有沉降变形。新建右线隧道对既有隧道的隆起影响随着时间的增长而呈现上升趋势,并且在第 1 天和第 4 天上升速度最快,在第 2 天出现明显的下降趋势。原因在于第 1 天盾构机刀盘对土体进行开挖使既有隧道产生扰动变形,当盾构机掘进至既有隧道上方,由于其平均重度大于上覆土的平均重度,盾构斜交上跨既有 4 号线左线隧道,使得上方附加应力增大从而产生沉降。随着盾构机逐渐驶离,既有隧道上方附加应力逐渐减小,产生隆起变形。在 4d 之后,隧道竖向变形发生波动,但基本保持稳定。

新建左线隧道开挖引起既有隧道的变形规律与右线开挖大致相同,只是在前 2 天变形较小,原因在于左线与既有隧道的竖向净距大于右线,开挖时盾构切削土体的扰动影响较小,隆起变形集中在第 4 天,主要受盾构机推进引发的隧道上方附加应力变化影响。

2.2 既有隧道空间变形特征分析

选取沿既有 4 号线左线隧道中心轴线上的监测点 DM01~DM29(见图 2),根据新建 7 号线双线已开挖的长度与完成贯通总长所占的比例,在新建右线与左线隧道的开挖进程中各选出 3 个阶段,分析在 7 号线双线隧道施工过程中既有 4 号线左线沿中

心轴线方向上各监测点的竖向位移变化,如图 4 所示。右线取掘进至 3/8、5/8、完成贯通 3 个阶段分析,左线取掘进至 1/3、2/3、完成贯通 3 个阶段分析。其中,属于上跨过程的阶段在图 4 中已经标出。

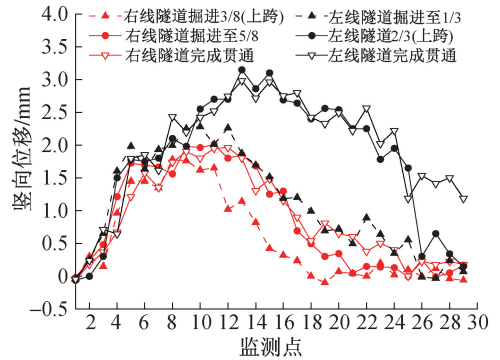


图 4 既有左线隧道竖向位移变化
Fig. 4 Changes in the vertical displacement of existing tunnels

由图 4 可知:盾构隧道开挖过程中,新建 7 号线双线隧道对既有 4 号线左线隧道的竖向位移影响总体为隆起变形,隆起值随距第 1 个监测点距离的增大而先增大后减小,并且位移峰值向开挖掘进方向不断偏移,既有隧道竖向位移曲线呈近似正态分布的形式。

首先对新建 7 号线右线进行开挖,在右线隧道完成穿越至贯通期间,既有隧道的最大位移为 2.095mm,相对于完成上跨时,最大位移增量为 0.167mm,仅增加了 8.66%,说明隧道开挖对既有隧道的影响主要集中在隧道上跨段,后续施工影响较小,在施工掘进时应着重对此进行监测加固。

右线推进完成后,新建 7 号线左线开始掘进施工,左线掘进至 1/3 处时,既有隧道各监测点的位移值未发生明显变化,直至左线上跨既有隧道,位移曲线发生明显变化,最大位移值由 2.568mm 增加至 3.356mm,并且峰值点相对此前的位移曲线向右移动,主要原因在于左、右两线上跨位置不同(见图 2),左线上跨位置相比右线其对应的监测点位置更靠后,在双线开挖完成后可以发现竖向位移最大处即为穿越段双线中间所在的监测点(DM13~DM15)。

3 有限元分析

3.1 数值模型的建立

数值模型采用小应变硬化土(HSS)本构模型^[15],参考相关文献^[16]并结合工程实际建立三维模型,尺寸为 115m×171m×30m($x \times y \times z$), y 为盾构掘进方向, z 轴负向为重力方向。既有 4 号线隧道埋深为 15.29m,左、右 2 条隧道曲率半径为 410m,新

建7号线隧道埋深为7.3m,近似模拟为直线,穿越处与4号线间距为7.99m,净距为1.79m,整体计算模型如图5所示。

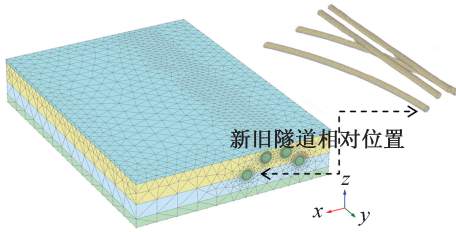


图5 整体计算模型

Fig.5 Overall calculation model

该模型中既有4号线1步开挖、新建7号线分步开挖,开挖前需进行地应力平衡,忽略构造应力,初始应力场只有自重应力($g=9.8\text{m/s}^2$),自重下的位移清零。模型四周为法向约束,底部固定约束、顶部自由,地表超载12kPa。

3.2 模型参数选择

结构物理参数如表1所示。盾构管片均由C50混凝土浇筑而成,计算中不考虑衬砌管片接头影响以及拼装方式对衬砌整体刚度的折减作用。

表1 结构物理参数

Table 1 Structural physical parameters

材料名称	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
衬砌	25.00	34 500	0.23
注浆体	21.56	200	0.32
盾壳	76.93	210 000	0.30

各土层计算参数如表2所示。模型中包含的土层有黏质粉土、粉土、粉质黏土和粉砂,地层的小应变土体硬化模型参数通过室内试验和经验公式得到。

土仓压力的确定方法参考文献[17]的计算公式:

$$P_0 = P_c = K_0(\gamma h + q) \quad (1)$$

式中: P_0 为盾构土仓压力(kN/m^3); γ 为上覆土重度(kN/m^3); P_c 为开挖面土压力(kN/m^2); h 为隧道轴线深度(m); K_0 为静止土压力系数; q 为地面超载(kN/m^2)。

表2 土层参数

Table 2 Soil parameters

土层	厚度 h/m	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 ν	抗剪强度指标		割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	切线模量 $E_{\text{t}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	回弹模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	初始剪切模量 $G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	剪切应变 $\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$
				黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$					
黏质粉土	2.52	18.00	0.30	26.03	24.00	2 830	2 380	19 200	53 160	4.5
粉土	12.77	18.82	0.34	23.04	17.23	4 240	5 410	28 800	47 440	6.4
粉质黏土	9.23	19.99	0.35	26.00	22.00	3 230	2 800	20 200	65 160	3.7
粉砂	5.48	19.60	0.34	0.83	31.00	10 450	7 650	45 870	55 040	5.3

3.3 施工模拟

鉴于本文主要讨论新建7号线上跨既有4号线隧道对既有4号线的影响,为了尽可能模拟实际开挖过程造成的应力损失情况,在模拟盾构施工时,将开挖分为若干个施工步,而每个施工步又包含若干个增量步。计算中可分为4个施工步:①初始地应力平衡;②移除既有4号线隧道内土体,激活相应衬砌;③开挖新建7号线隧道右线,分步开挖土体、激活盾壳、施加管片,直至右线开挖完毕;④开挖新建7号线隧道左线,分步开挖土体、激活盾壳、施加管片,直至左线开挖完毕。

3.4 模拟结果与分析

通过实测值和模拟值的对比来对模型参数的合理性进行验证,如图6所示。数值模拟按照实际开挖过程分为6个工况,分别对应的盾构开挖里程为:右线开挖64m(上跨位置),右线开挖106m,右线开挖171m(贯通),左线开挖57m,左线开挖111m(上跨位置),左线开挖171m(贯通)。

1)模型中既有隧道竖向变形最大值为3.413mm,工程监测中最大变形值为3.396mm;竖向变形最小值为-0.049mm,工程监测最小值-0.154mm,可以看出模拟与监测值之间差距较小,说明模型具有一定的准确性。

2)6个工况下,模拟计算结果与工程实测基本吻合,两者在竖向位移上的变化趋势保持一致,表明本文建立的数值模型以及参数取值具有合理性,可以反映工程实际。

3)从竖向位移来看,盾构开挖后,既有隧道竖向变形呈现出近似正态分布的形式,随着盾构推进,既有隧道竖向位移峰值不断向右偏移(即向开挖掘进方向)。开挖完成后,处于上跨段中心的监测点位移最大,远离上跨段的监测点位移较小。因此,在实际工程中要着重对上跨段进行监测加固。

4 结语

本文通过对郑州城市轨道交通7号线与既有4号线所形成的近距离斜交上跨的特殊工况进行现

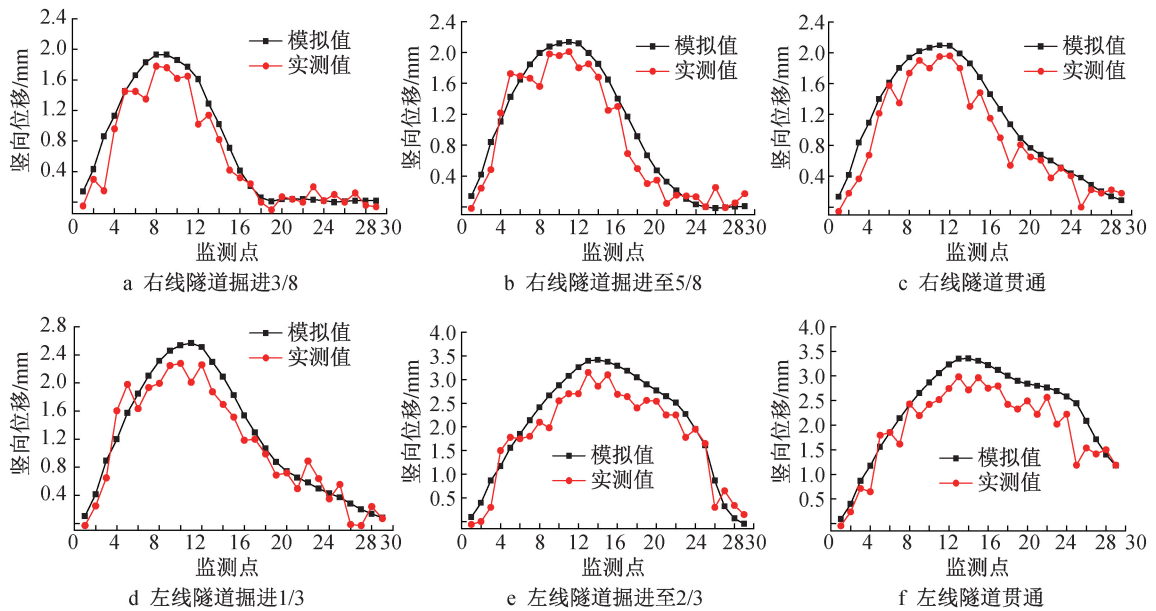


图 6 既有隧道左线竖向位移实测值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison of measured and simulated vertical displacements in the left lane of the existing tunnel

场监测和数值模拟分析,研究了近距离斜交上跨既有曲线隧道的变形特性,得到以下结论。

1)随着隧道开挖进行,既有4号线左线上的各监测点在竖直方向上的变形为先沉降再隆起。

2)开挖完成后,在空间上,沿着既有4号线轴线上的竖向位移变化曲线关于新旧隧道穿越中心点呈“单峰”对称分布,峰值所在处为上跨中心段,在施工掘进时应着重对此处进行监测和加固。

3)模拟结果与工程实测的结果基本吻合,证明了模型计算结果的合理性,在此研究中利用该有限元模型指导实际工程相对安全可靠。

参考文献:

- [1] 程光华,王睿,赵牧华,等.国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J].地学前缘,2019,26(3):39-47.
CHENG G H, WANG R, ZHAO M H, et al. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China[J]. Earth science frontiers, 2019, 26(3): 39-47.
- [2] LIU H Y, SMALL J C, CARTER J P, et al. Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels [J]. Computers and geotechnics, 2009, 36(5): 880-894.
- [3] 张晓清,张孟喜,李林,等.多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J].岩土力学,2017,38(4):1133-1140.
ZHANG X Q, ZHANG M X, LI L, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling[J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(4): 1133-1140.
- [4] ZHU Q L, DING Y P. Impact of new undercrossing tunnel excavation on the stability of the existing tunnel[J]. Frontiers in earth science, 2022, 10: 915882.
- [5] 张孟喜,张靖,吴应明,等.全风化岩层中双线盾构上穿邻近地铁隧道影响分析[J].土木工程学报,2019,52(9):

100-108.

ZHANG M X, ZHANG J, WU Y M, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation [J]. China civil engineering journal, 2019, 52(9): 100-108.

- [6] 汤新辉,雷涛,刘维正,等.地铁盾构小净距上穿既有有线变形数值模拟及施工控制[J].城市轨道交通研究,2023,26(9):80-88.

TANG X H, LEI T, LIU W Z, et al. Deformation numerical simulation and construction control for metro shield over-passing existing line in small-clearance [J]. Urban mass transit, 2023, 26(9): 80-88.

- [7] 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):1962-1966,2004.

ZHU L, HUANG H W. Monitoring data analysis of disturbing effect caused by shield-driven over operating tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2010, 44(10): 1962-1966, 2004.

- [8] 梅文胜,陈雪丰,周小波,等.盾构下穿既有隧道实时监测及其风险控制研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(8):923-927.

MEI W S, CHEN X F, ZHOU X B, et al. Real-time deformation monitoring and risk controlling during shield under-crossing existing tunnel [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2011, 36(8): 923-927.

- [9] 张立亚,张宏梅,李黎,等.地铁盾构线路穿越运营隧道的沉降影响[J].测绘科学,2017,42(2):105-109.

ZHANG L Y, ZHANG H M, LI L, et al. Settlement influence of metro shield line crossing operation tunnel [J]. Science of surveying and mapping, 2017, 42(2): 105-109.

(下转第109页)

- 究现状[J]. 现代隧道技术,2017,54(4):25-32.
- DUAN B F, SONG L K, ZHOU X M, et al. On research status of surface settlement of a bored subway tunnel with a shallow overburden[J]. Modern tunnelling technology, 2017, 54(4): 25-32.
- [4] 吴康,申玉生,易鹏豪,等. 软土地层浅埋暗挖矩形大断面隧道施工力学响应特征[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(10): 45-50.
- WU K, SHEN Y S, YI P H, et al. Mechanical response characteristics of shallow-buried concealed rectangular large-section tunnel in soft soil stratum[J]. Urban mass transit, 2024, 27(10):45-50.
- [5] 范未鹏. 软岩隧道开挖围岩变形与受力特征研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):123-127.
- FAN W P. Study on deformation and stress characteristic of surrounding rock in soft rock tunnel excavation[J]. Construction technology, 2025,54(9):123-127.
- [6] 白铭海,吉小明. 地铁小竖井转横通道施工大跨隧道数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(2):469-476.
- BAI M H, JI X M. Numerical simulation analysis of large-span tunnel construction through cross aisle from subway small shaft[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015,11(2):469-476.
- [7] 奚魏征,刘云雨,王万平. 超小净距隧道浅埋暗挖法下穿高速公路关键技术[J]. 公路,2025,70(1):300-304.
- XI W Z, LIU Y Y, WANG W P. Key technology of ultra-small clear distance tunnel under expressway by shallow excavation method[J]. Highway, 2025, 70(1):300-304.
- [8] 漆震云,霍育达,姚爱军,等. 多源干扰条件下暗挖工程穿越建筑物变形特征与控制研究[J]. 市政技术,2025,43(1): 176-182.
- QI Z Y, HUO Y D, YAO A J, et al. Research on the deformation characteristics and control of underground excavation project through buildings under multi-source interference conditions[J]. Journal of municipal technology, 2025,43(1):176-182.
- [9] 谢雄耀,张永来,周彪,等. 盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(10): 1781-1789.
- XIE X Y, ZHANG Y L, ZHOU B, et al. Micro-settling control technology for shield tunnels crossing old buildings[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019,41(10):1781-1789.
- [10] 唐志强. 超浅埋地铁隧道复合地层暗挖关键技术[J]. 铁道工程学报,2025,42(6):87-91,103.
- TANG Z Q. The key technology of mining method on composite strata of ultra-shallow subway tunnel[J]. Journal of railway engineering society, 2025,42(6):87-91,103.
- [11] 杨彬. 广阳湾站超大断面暗挖车站施工稳定性数值模拟研究[J]. 科技创新与应用,2025,15(30):59-63.
- YANG B. Numerical simulation study on construction stability of super-large cross-section underground excavation station in Guangyangwan station[J]. Technology innovation and application, 2025,15(30):59-63.

(上接第103页)

- [10] 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):83-87.
- CHEN L, HUANG H W, WANG R L. 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):83-87.
- [11] 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. Case study of a shield tunneling project over-crossing two existing metro tunnels in the upper-soft and lower-hard stratum[J]. Building structure, 2022, 52(S1):2849-2854.
- [12] 沈丹祎,陈赞,罗敏敏,等. 宁波浅层软土小应变硬化土模型参数试验研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(S1):114-118.
- SHEN D Y, CHEN Y, LUO M M, et al. Experimental research on parameter selection of HSS model for Ningbo shallow soft soil[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023,45(S1): 114-118.
- [13] 王书雄,宋建正,宋彦杰,等. 富水软土地区盾构法联络通道施工环境影响分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(17): 94-100.
- WANG S X, SONG J Z, SONG Y J, et al. Analysis on influence of connecting passage construction using tunnel boring machine method in water-rich soft soil area[J]. Construction technology, 2025,54(17):94-100.
- [14] 宫志群,王永志,廖少明,等. 地铁车站明暗挖施工引起的地表沉降叠加效应研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3): 6-13.
- GONG Z Q, WANG Y Z, LIAO S M, et al. Study on superposition effect of surface settlement caused by subway station open and subsurface excavation construction[J]. Construction technology, 2024,53(3):6-13.
- [15] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):269-278.
- LIANG F Y, JIA Y J, DING Y J, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017,39(2):269-278.
- [16] 丁智,吴云双,张霄,等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(3):663-671.
- DING Z, WU Y S, ZHANG X, et al. Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2018,49(3):663-671.
- [17] 严长征. 盾构隧道近距离共同作用机理及施工技术研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- YAN C Z. Research on the mechanism and construction techniques of interaction for adjacent tunneling preformed by shield[D]. Shanghai:Tongji University,2007.