

DOI: 10.11779/CJGE2025S20001

# 软土地区新建地铁上穿既有盾构隧道实测分析

罗敏敏<sup>1,2</sup>, 陈 赟<sup>1,2</sup>, 申文明<sup>3</sup>, 李格焯<sup>\*4</sup>, 黄家晟<sup>1</sup>, 方利泽<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310028; 3. 中铁二院华东勘察设计院有限公司, 浙江 杭州 310004; 4. 中北大学, 山西 太原 030051)

**摘要:** 目前已有许多控制防护技术运用于穿越工程中, 但是控制防护技术的实施效果是动态的、多因素耦合作用的结果, 其优化选型及实施效果仍需深入研究, 以便适应愈加复杂的地下工程问题。本研究以宁波市轨道交通 5 号线上穿既有 2 号线为工程依托, 开展了相关监测数据分析。结果表明: 新建盾构隧道叠穿上穿对下方既有隧道的竖向变形的影响具有明显的空间效应和叠加效应, 且下方既有隧道竖向变形总体表现为隆起, 其单侧影响范围约为 6~7 倍的隧道外径; 水平收敛变形表现为水平向收缩、竖向扩张的“竖鸭蛋形”。更为重要的是, 在新建盾构隧道上穿既有盾构隧道施工时, 本工程采用的“控制施工参数+配重加压+既有隧道管片加固+土体加固+加强监测与信息化施工”综合控制技术行之有效, 可供类似工程参考借鉴。

**关键词:** 软土; 盾构隧道; 上穿施工; 自动化监测; 控制技术

中图分类号: U455.43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)S2-0025-05

作者简介: 罗敏敏(1988—), 男, 博士, 主要从事岩土工程、地质工程方面的研究。E-mail: zluominmin@163.com。

## Monitoring and analysis of newly-built subway over-passing through existing shield tunnels in soft soil areas

LUO Minmin<sup>1,2</sup>, CHEN Yun<sup>1,2</sup>, SHEN Wenming<sup>3</sup>, LI Geye<sup>4</sup>, HUANG Jiasheng<sup>1</sup>, FANG Lize<sup>1</sup>

(1. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China; 2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China; 3. CREETC East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310004, China; 4. North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Currently, many control and protection technologies have been applied in the construction of cross-passing projects. However, their implementation effects are dynamic and influenced by multiple factors. Therefore, further research is still needed to optimize the selection and implementation effect of these technologies, so as to adapt to increasingly complex underground engineering problems. This article carries out relevant monitoring data analysis based on the engineering project of Ningbo Metro Line 5 crossing over the existing Line 2. The results show that the vertical deformation of the existing tunnel is significantly affected by the superimposed construction of the new shield tunnel, with obvious spatial and superimposed effects. The vertical deformation of the existing tunnel generally manifests as bulging with a unilateral influence range of 6~7 times the outer diameter of the tunnel. The transverse deformation manifests as "vertical duck egg" shaped elliptical deformation with horizontal contraction and vertical expansion. More importantly, when constructing a new subway tunnel over-passing through the existing shield tunnel, a combination of several control and protection technologies used in this project has proved to be effective, including controlling construction parameters, weighting measurements, reinforcement of existing tunnel segments, soil reinforcement, intensifying monitoring and informationized construction. This paper can be used as a reference for similar projects.

**Key words:** soft soil; shield tunneling; overpass construction; automated monitoring; control technology

## 0 引 言

随着城市地铁越来越多地投入运营, 及地下空间开发利用程度的增加, 新建地铁盾构隧道不可避免地要穿越邻近既有地铁隧道。新建地铁盾构隧道穿越邻近既有地铁隧道的方式大致可以分为下穿、上穿、上

下交叠穿越和并行穿越等几种类型<sup>[1]</sup>。新建盾构隧道

基金项目: 浙江省建设科研项目(2023K195); 山西省基础研究计划项目(202403021222137); 杭州市建设科研项目(2024347)

收稿日期: 2025-07-15

\*通信作者(E-mail: 20230210@nuc.edu.cn)

上穿既有地铁隧道时不仅会对周围地层产生扰动,引起土体变形,同时也会引起临近既有隧道结构产生变形和附加内力,从而影响既有地铁隧道的正常运营<sup>[2]</sup>。

由于既有地铁隧道的重要性,再加上长时间运营隧道本身可能存在的损伤,盾构穿越时,必须采取必要的控制防护技术,保证既有地铁运营安全。常用的控制防护技术包括盾构施工参数控制、土体加固、既有隧道加固等。来弘鹏等<sup>[3]</sup>以西安地铁1号线二期张家村一后卫寨区间左线盾构下穿既有1号线出入段线为工程依托,研究了施工参数(土仓压力、注浆压力、注浆量)对既有隧道和轨道高差的沉降规律。白廷辉等<sup>[4]</sup>研究了软土地区盾构施工速度与地层扰动范围的相关性。廖少明等<sup>[5]</sup>指出近距离夹穿情况下,穿越节点处的预先注浆引起隧道微隆以及通过后的及时二次注浆隆起,能在一定程度上抵消地层损失引起的隧道变位及长期沉降。陈仁朋等<sup>[6]</sup>以长沙地铁4号线近距离下穿上覆2号线运营隧道工程为背景,表明MJS(metro jet system, 又称全方位高压喷射工法)水平桩加固隧道之间土层,能有效降低盾构掘进过程中对地表和上覆隧道的影响。目前已有许多控制防护技术运用于穿越工程中,但是控制防护技术的实施效果是动态的、多因素耦合作用的结果,其优化选型及实施效果仍需深入研究,以便适应愈加复杂的地下工程问题。

实测数据是穿越工程影响的最直接的表达,本文以宁波市轨道交通5号线上穿既有2号线的工程案例为背景,采用多种控制防护技术组合,通过监测数据分析,研究新建盾构隧道上穿施工对下方既有盾构隧道的变形影响规律,分析相关工程控制措施的实施效果,为类似工程选择控制防护技术提供参考与借鉴。

## 1 工程概况

宁波市轨道交通5号线一期工程同德路站—石碇站区间(以下简称“同石区间”)沿鄞县大道由西向东敷设,既有轨道交通2号线鄞州大道站—石碇站区间(以下简称“鄞石区间”)隧道沿雅戈尔大道走向。5号线同石区间隧道在鄞县大道与雅戈尔大道交汇口上跨2号线鄞石区间隧道,两条地铁线大约以 $81^\circ$ 的角度相交。交汇段周边建筑相对密集,如图1所示。

地铁5号线同石区间隧道和2号线鄞石区间隧道均为盾构法施工,采用单层装配式钢筋混凝土衬砌,衬砌管片外径6.2 m、内径5.5 m,管片厚度350 mm,环宽1.2 m,衬砌环错缝拼装。交汇段5号线与2号线的最小净距为1.17 m。两者的剖面关系及周边地层分布条件如图2所示,图中土体参数符号意义如下: $\gamma$ 为重度, $c$ 为黏聚力, $\varphi$ 为内摩擦角, $E_s$ 为压缩模量, $\mu$ 为泊松比。

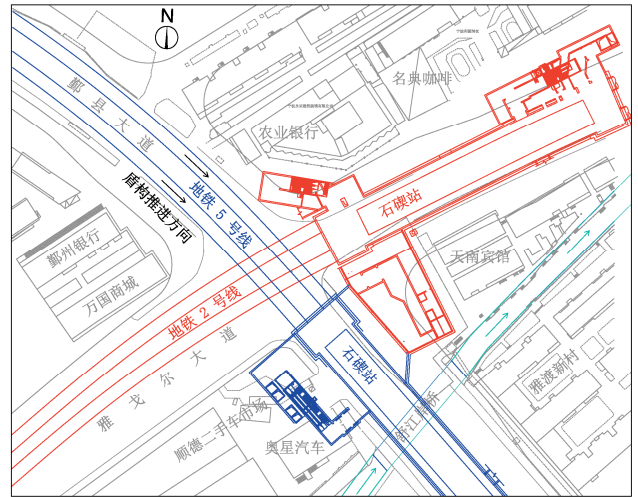


图1 地铁交汇段平面关系图

Fig. 1 Plan relationship diagram of subway intersection section

## 2 工程控制措施

为保证宁波地铁2号线在地铁5号线上穿施工期间的运营安全,采取了如下工程控制措施:

### (1) 控制施工参数

5号线盾构推进的施工参数根据“分小段慢推,匀速慢转,顶住正面,调整压力,封住盾尾,合理注浆”的微扰动控制原则,并结合工程具体情况来进行优化设置。正面压力维持在 $0.08\sim 0.1$  MPa,并保持压力波动小于 $0.01$  MPa,以保证切口前方土体稳定。推进速度控制在 $10$  mm/min左右,按每段 $20\sim 30$  cm进行推进,以缩短施工相关信息反馈的时间间隔,及时对参数进行优化调整。在慢推的基础上保证慢纠盾构姿态,盾构轴线水平向和垂直向偏角控制在 $(0.5\sim 1.0)\%$ 以内,即水平和垂直向差值控制在 $4.25\sim 8.5$  mm以内。同步注浆采取高密度浆液,稠度为 $9\sim 10$ ,浆量为 $4$  m<sup>3</sup>,以提高对盾构周围土体的填充和加固效果。

### (2) 配重加压

对穿越范围内的5号线隧道轨道下方堆设铅块进行压重,加上盾构车架等自重荷载,累积附加压重荷载约 $15$  kPa。压重作业与盾构掘进施工同步,在进行管片拼装和轨道、轨枕安装工作时,可在临近约5环范围内堆载两层管片作为临时压重,并随着堆载管片的拼装使用过程,逐步用铅块替代管片进行压重,因此对盾构掘进施工的进度基本没有影响。

### (3) 运营隧道管片加固

对已运营的2号线隧道,在穿越部位左右各 $12$  m的范围,采用6道#14槽钢对隧道管片进行纵向拉紧加固。同时对运营阶段损伤严重或变形严重的隧道管片设置环向加固型钢圈进行加固。

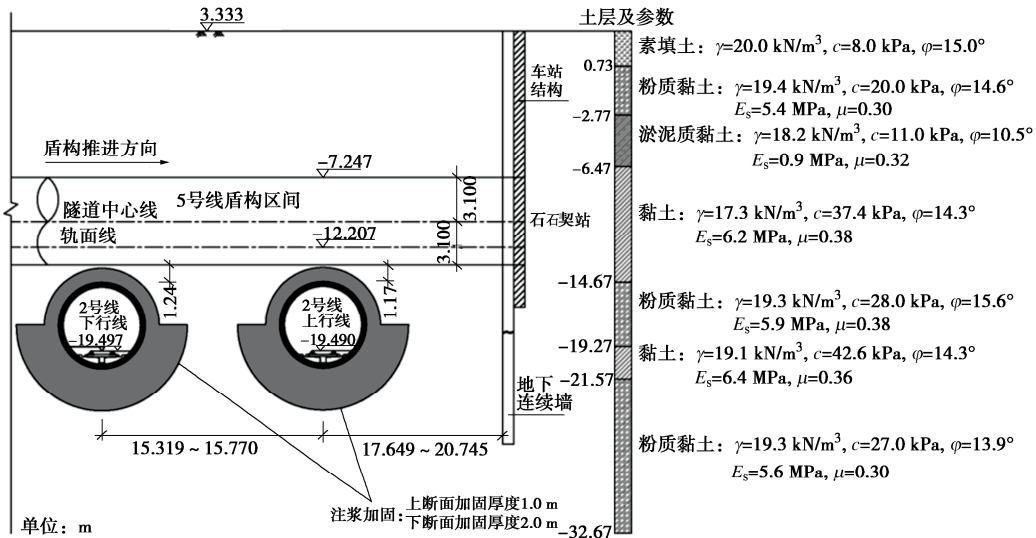


图2 地铁交汇段剖面关系图

Fig.2 Section relationship diagram of subway intersection section

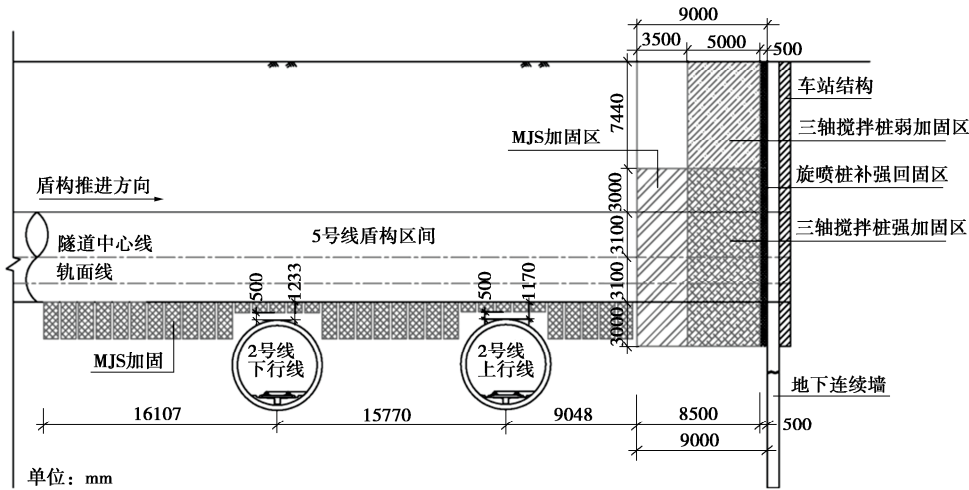


图3 MJS工法加固土体纵断面图

Fig.3 Longitudinal section diagram of soil reinforcement by MJS construction method

(4) 土体加固

对已运营的2号线, 在交汇段左右各25 m的范围, 利用隧道管片增设的注浆孔对周边土体进行注浆加固, 注浆范围为隧道上断面1m、下断面2 m, 如上图2所示。注浆浆液配比为水泥300 kg/m<sup>3</sup>、粉煤灰420 kg/m<sup>3</sup>、膨润土64 kg/m<sup>3</sup>、水660 L/m<sup>3</sup>, 注浆压力约0.3 MPa。

同时, 为控制卸载对下部运营地铁线路的影响, 对5号线和2号线交汇段附近的土体采用 MJS 工法进行加固, 如图 3, 4 所示。MJS 工法的施工造价约 1800 元/m<sup>3</sup>, 其主要技术参数参见文献[6]的表 2。MJS 加固土体芯样的平均单轴抗压强度约为 3.7 MPa。

(5) 加强监测与信息化施工

为实时掌握宁波地铁5号线上穿施工对下方地铁2号线盾构隧道的变形影响, 在2号线鄞石区间隧道内分别布置自动化监测和人工监测系统, 分别对盾构隧道的竖向变形、水平位移、隧道断面收敛变形等进行详

细监测。利用监测结果指导施工, 优化施工参数。

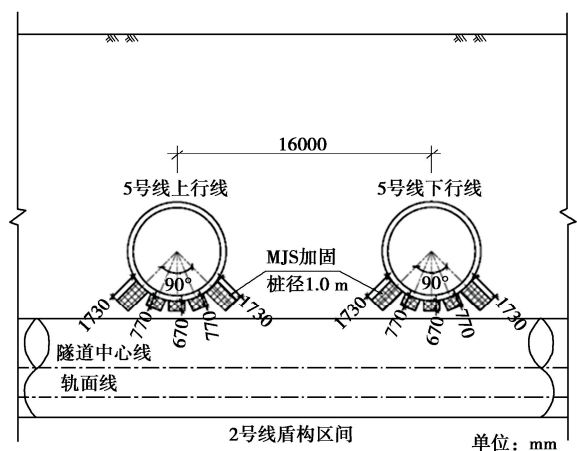


图4 MJS工法加固土体横断面图

Fig. 4 Cross section view of soil reinforcement by MJS construction method

在地铁2号线与5号线交汇段的左、右各50环范

围内（环宽 1.2 m，共 120 m）设置监测断面；其中，交汇段的外围每 5 环设置一个监测断面，交汇段（左、右各 15 环，环宽 1.2 m，共 36 m）进行加密，每 2 环设置一个监测断面。盾构隧道各项变形指标的控制值均为  $\pm 10$  mm，报警值均为  $\pm 7$  mm 或变形速率超过  $\pm 1.5$  mm/d，预警值均为  $\pm 5$  mm。

### 3 现场监测数据分析

图 5 所示为 5 号线盾构施工引起的下方 2 号线盾构隧道的附加竖向变形，图中正值表示隆起，负值表示沉降，相关数据为自动化监测的成果。由图 5 可知，既有地铁盾构隧道上方新建盾构隧道叠交穿越施工时，由于上方土体的开挖卸荷，对下方既有隧道的竖向变形的影响总体表现为下方既有隧道的隆起。其影响规律表现为：叠交区域的隆起变形最大，随着与叠交区域的距离增大，其变形影响也逐渐减小，其单侧影响范围约为  $(6\sim 7)D$  ( $D$  为隧道直径)。实际施工过程中，5 号线下行线先行施工，因此首先在 5 号线下行线中心位置附近出现隆起变形的峰值。待下行线施工完成后再进行 5 号线上行线的施工，此时 5 号线上行线中心位置附近的隆起变形显著增加，呈现双峰值的趋势。同时，5 号线上行线的施工使得 5 号线下行线附近的隆起变形继续增加，说明后施工区域的变形影响对先施工区域的变形影响具有叠加效应，使得先施工区域下方隧道的最终变形大于后施工区域下方隧道的最终变形。

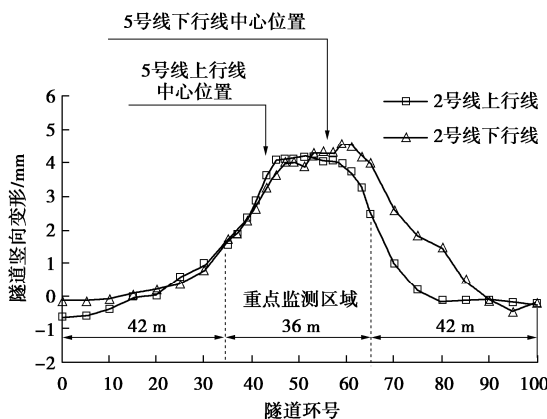


图 5 隧道竖向变形

Fig. 5 Vertical deformations of tunnel

图 5 中自动化监测结果表明，下方既有 2 号线的上行线和下行线的最大附加隆起变形分别为 4.17 mm 和 4.61 mm，相应的人工监测的结果分别是 3.32 mm 和 4.15 mm，两种监测方法之间的偏差不足 1.0 mm。监测得到的下方既有盾构隧道的附加竖向变形均小于 5 mm，满足控制要求。

图 6 所示为 5 号线盾构施工引起的下方 2 号线盾构

隧道的附加水平位移变形，图中正值表示与 5 号线盾构掘进方向相同，负值表示与 5 号线盾构掘进方向相反，相关数据为自动化监测的成果。由图 6 可知，2 号线上行线和下行线的水平位移均与 5 号线盾构掘进方向相同，即向 5 号线石碇站所在一侧发生水平位移。可能的原因如下：5 号线石碇站的建设使得侧方土体开挖卸荷，其卸荷对 2 号线盾构隧道的水平方向的变形影响大于 5 号线盾构上穿施工时的侧上方卸荷的影响，从而导致 2 号线盾构隧道总体上向 5 号线石碇站所在一侧发生水平位移。由于 2 号线的上行线比下行线更靠近石碇站，所以 2 号线上行线的水平位移变形也明显大于下行线的水平位移变形。总体而言，2 号线盾构隧道的水平位移变形较小，说明新建盾构隧道上穿施工对下方既有盾构隧道的水平位移变形的影响较小。

图 6 中自动化监测结果表明，下方既有 2 号线的上行线和下行线的最大附加水平位移分别为 2.4 mm 和 1.2 mm，相应的人工监测的结果分别是 3.3 mm 和 1.1 mm，两种监测方法之间的偏差不足 1.0 mm。监测得到的下方既有盾构隧道的附加水平位移均小于 5 mm，满足控制要求。

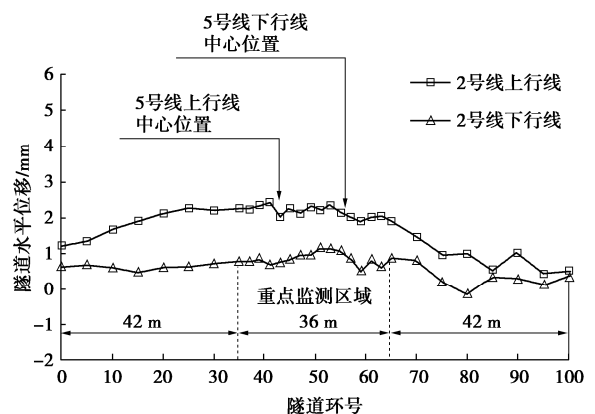


图 6 隧道水平位移

Fig. 6 Horizontal displacements of tunnel

图 7 所示为 5 号线盾构施工引起的下方 2 号线盾构隧道的附加水平收敛变形，图中正值表示隧道管径变大，负值表示隧道管径变小，相关数据为自动化监测的成果。由图 7 可知，在新建 5 号线盾构上穿区域附近，因上方土体开挖卸荷，下方既有 2 号线的盾构管径变形表现为水平向收缩、竖向扩张的“竖鸭蛋形”，其在隧道水平收敛纵向分布曲线图（图 7）上呈现出明显的双谷型，且其谷值位置与图 5 中的隧道竖向变形的峰值位置相对应。在其它区域，下方既有 2 号线的盾构管径变形则表现为水平向扩张、竖向收缩的“横鸭蛋形”，其原因在于 5 号线石碇站的建设使得侧方土体开挖卸荷。由于 2 号线的上行线比下行线更靠近石碇站，所以 2 号线上行线的水平收敛变形也明显大于下行线的水

平收敛变形。

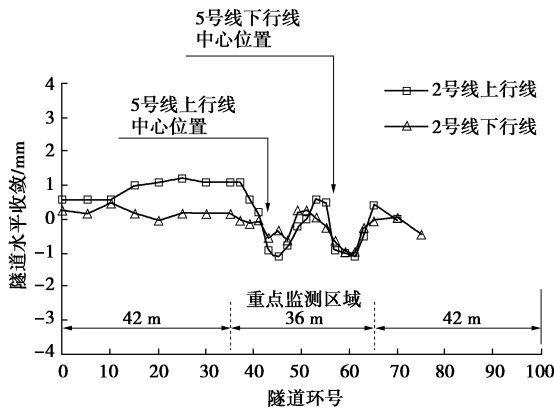


图7 隧道水平收敛

Fig. 7 Horizontal convergence displacements of tunnel

图7中自动化监测结果表明,监测得到的下方既有盾构隧道的附加水平收敛均小于5 mm,满足控制要求。综上,说明本工程采用的相关工程控制措施是行之有效的,可供类似工程参考借鉴。

## 4 结 论

本文以宁波市轨道交通5号线上穿既有2号线为工程依托,研究了新建盾构隧道上穿施工对下方既有盾构隧道的变形影响规律和变形控制措施,得到主要结论如下:

(1)新建盾构隧道叠穿上穿对下方既有隧道的竖向变形的影响总体表现为下方既有隧道的隆起,其单侧影响范围约为 $(6\sim 7)D$  ( $D$ 为隧道外径),距离叠交区域越近,隆起变形越大;相应地,下方既有隧道的水平收敛变形表现为水平向收缩、竖向扩张的“竖鸭蛋形”。

(2)新建盾构隧道叠穿上穿对下方既有隧道的竖向变形的影响具有明显的空间效应和叠加效应,先施工的区域率先引起下方既有隧道变形,后施工区域继续影响及累加其变形,最终导致先施工区域侧的下方既有隧道的变形大于后施工区域侧的下方既有隧道的变形。

(3)新建盾构隧道上穿施工对下方既有盾构隧道的水平位移的影响较小。

(4)本工程采用的“控制施工参数+配重加压+既有隧道管片加固+土体加固+加强监测与信息化施工”综合控制技术行之有效,在新建盾构隧道上穿既有盾构隧道施工时,对下方既有盾构隧道的变形控制效果良好,可供类似工程参考借鉴。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益

冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

## 参考文献:

- [1] 江 杰, 龙逸航, 邢轩伟, 等. 富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, **18**(7): 1828-1836. (JIANG Jie, LONG Yihang, XING Xuanwei, et al. Study of boring parameters of shield tunnel under traversing existing metro tunnels in water-soaked round gravel strata[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, **18**(7): 1828-1836. (in Chinese))
- [2] 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 Liang, HUANG Hong-wei, WANG Ru-lu. 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. (in Chinese))
- [3] 来弘鹏, 郑海伟, 何秋敏, 等. 砂土地层盾构隧道小角度斜下穿既有隧道施工参数优化研究[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(10): 130-140. (LAI Hongpeng, ZHENG Haiwei, HE Qiumin, et al. Investigation into parameter optimization of existing metro tunnel for shield tunnel closely undercrossing it at small angle in sand stratum[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(10): 130-140. (in Chinese))
- [4] 白廷辉, 刘树佳, 廖少明. 软土地区盾构掘进速度对地层扰动现场试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(7): 2040-2046. (BAI Tinghui, LIU Shujia, LIAO Shaoming. Experimental study of disturbance caused by the advancing speed of shield tunneling in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 2040-2046. (in Chinese))
- [5] 廖少明, 杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 812-818. (LIAO Shaoming, YANG Yuheng. Deformation analysis and control of a running subway crossed by upper- and lower-shield in succession[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 812-818. (in Chinese))
- [6] 陈仁朋, 张 品, 刘 湛, 等. MJS 水平加固在盾构下穿既有隧道中应用研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, **45**(7): 103-110. (CHEN Renpeng, ZHANG Pin, LIU Zhan, et al. Application study of MJS horizontal column reinforcement in shield tunneling[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, **45**(7): 103-110. (in Chinese))

(编校: 明经平)