

浅埋暗挖隧道开挖对既有隧道衬砌结构的影响

萧以苏

(南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 浅埋暗挖隧道开挖会引起周边既有构建筑物变形, 严重时会导致其变形过大而破坏。以某地下轨道交通工程为依托, 利用仿真软件以及实地勘探, 对既有隧道衬砌结构受力变形情况、实际施工过程中地表的下降情况、暗挖隧道位移和既有隧道衬砌结构位移情况进行研究。研究表明: 1) 采用隧道错距开挖的方式会造成隧道的沉降量变大; 2) 在隧道开挖后, 既有隧道衬砌结构受新隧道影响, 其左侧部分竖向位移整体大于右侧部分, 竖向最大位移处在隧道初始位置, 竖向最小位移处在隧道末端; 3) 对于浅埋暗挖上跨施工, 当开挖距离大于新建隧道中轴线 35 m 时, 开挖新隧道对上跨既有隧道衬砌结构横向位移影响较小; 4) 当开挖深度到达一定距离后, 拱底、左拱腰和右拱腰的应力基本保持不变; 5) 拱底的应力不随开挖距离的深入而发生变化。

关键词: 浅埋暗挖隧道; 既有隧道衬砌结构; 仿真模拟; 实地勘测; 形变分析; 监测位移

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)07-0046-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.07.091

Influence of shallow tunneling excavation on lining structure of existing tunnel

XIAO Yisu

(Nanjing Railway Vocational and Technical College, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: The excavation of shallow buried and hidden tunnels will cause deformation of surrounding existing structures, which will cause excessive deformation and damage. Based on an underground rail transit project, the mechanical deformation of the existing tunnel lining structure, the decline of the ground surface in the actual construction process, the displacement of the shallow tunneling and the displacement of the existing tunnel lining structure are studied by using simulation software and field exploration. The results show that: 1) The staggered tunnel excavation will cause the settlement of the tunnel to increase; 2) After tunnel excavation, the existing tunnel lining structure is affected by the new tunnel, and the vertical displacement of the left part is greater than that of the right part, and the maximum vertical displacement is at the initial position of the tunnel, and the minimum vertical displacement is at the end of the tunnel; 3) For the construction of the upper span of shallow tunneling, when the excavation distance is greater than 35 m of the central axis of the new tunnel, the excavation of the new tunnel has little impact on the lateral displacement of the lining structure of the existing tunnel in the upper span; 4) When the excavation depth reaches a certain distance, the stress of the arch bottom, the left arch waist and the right arch waist basically remain unchanged; 5) The stress at the bottom of the arch does not change with the depth of the excavation distance.

Key words: shallow tunneling; existing tunnel lining structure; simulation; field surveys; deformation analysis; monitoring displacements

随着城市经济与交通线路的快速发展, 地铁 的建设成为我国缓解城市道路交通堵塞问题的有

收稿日期: 2023-12-29

作者简介: 萧以苏(1981—), 男, 工程师, 从事轨道交通工程研究工作。

效措施之一。合理的开发和利用地下空间资源成为当前城市交通面临的重要课题。错综复杂的地铁网使得出行变得极为方便,但同时地下管线密集区域会无法避免地出现两条或者多条地铁隧道近接的问题。开挖新的地铁隧道无疑会对既有隧道衬砌结构产生影响,进而影响周边结构的安全。尤其对于软土层而言,其材质较为松散,在该土层上开挖地铁隧道更容易发生塌陷等事故。因此,开挖新地铁隧道的同时既能保证既有线路的正常使用又能保证既有隧道衬砌结构的安全成为当前研究人员的主要研究热点之一。浅埋暗挖法因其能够有效控制暗挖通道土体的沉降量和隆起值,并且通过加固底层的方式能够确保周边地面上建筑的安全,已成为开采城市地铁隧道的主要施工方法。探究浅埋暗挖法对既有隧道衬砌结构的影响对实际工程应用具有重要的意义。

熊家全^[1]通过实际工程监测以及仿真软件 ABAQUS 分析了软土层地区桩基位移、桩基轴力对浅埋暗挖法开采隧道的影响,并对隧道开挖造成的土层沉降量求解;石熊等^[2]以良村隧道 CRD 法施工为工程背景,利用有限元软件 FLAC^{3D} 从不同的影响因素分析了浅埋暗挖法开挖地铁隧道对既有地下管线结构沉降量的影响,并根据结果分析确定了开挖模型的最优参量;陈朝阳等^[3]利用有限元软件 FLAC^{3D} 模拟地铁隧道在穿越岩土土层时的土层的沉降情况以及应力变化,并且通过结果分析可知,加强拱脚支护是确保岩土分界区地铁隧道安全开采的有效方法;苗学云等^[4]以黄土塬区上阁村隧道工程为例,通过实地勘探的方式得出岩土沉降量随围岩含水率变化的规律,并分析了净空收敛对隧道沉降量的影响;闫少峰^[5]依托郑州地铁四号线商都路站暗挖通道工程,利用有限元软件 ABAQUS 分析了地铁隧道对地表、既有地下管线竖向位移的影响以及地铁隧道所受土层应力的分析,并将采用加固方式的既有隧道竖向位移仿真模拟的移动值与实际监测到的移动值进行对比,从实际工程的角度说明了超前加固的方式可以确保地铁隧道安全开挖。李鹏等^[6]从浅埋暗挖隧道对既有地下线路应力、形变或者附近土层沉降的影响角度出发进行研究分析,得出了

暗挖段距离对既有地下管线的影响关系。相关学者的研究内容集中于新建地铁隧道在不同施工方式(平行、上跨、下穿)^[7-9]、不同地质条件^[10-11]下对邻近既有隧道的影响,同时新建隧道采用不同施工方法对邻近既有隧道的影响也是研究热点之一^[12-13]。

本文基于某地下轨道交通工程,利用数值手段对既有隧道衬砌结构受力变形情况、实际施工过程中地表的下降规律,以及暗挖隧道位移和既有隧道衬砌结构位移情况进行研究,以期对相关隧道设计及施工提供借鉴参考。

1 工程概况

某地下轨道交通工程所处区域地形总体呈东南高西北低,勘察期间勘探点地面高程范围为 400.9 ~ 402.24 m。区间地势较为平缓,地势高度差值不大,区间长度为 1 531.991 m,其中隧道长度为 1 222.991 m,明挖段长度为 309 m。隧道埋深约为 13.144 ~ 22.462 m,左右线间距为 17.5 ~ 25.2 m。新隧道与既有隧道横向间距为 20 m,最大平曲线半径为 2 500 m,最小平曲线半径为 1 500 m,最小坡度为 2‰,竖曲线半径为 5 000 m。

工程施工方案:制定详细的施工监测计划,包括既有隧道的沉降、位移、裂缝监测。施工方法采用微台阶法,以减少对既有隧道的影响。在新隧道开挖前,对既有隧道增加支撑或注浆,在开挖面使用喷射混凝土和钢架进行初期支护,并且新隧道与既有隧道之间的土体中设置预应力锚杆,以增强土体的稳定性。分阶段进行新隧道开挖,每阶段开挖后立即进行支护交叉区域,采用短进尺、快速封闭的施工策略,以保证对既有隧道最小的影响。

2 有限元模型

利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟。模型左、右侧边界距既有隧道衬砌结构 55 m,下侧距既有隧道衬砌结构 89 m,上侧边界为地表。模型总高度为 40 m,长度为 140 m,宽度为 110 m。模型由土体、隧道衬砌结构以及临时横撑 3 部分组成。土层四周约束条件设置为法向约束,底面的约束条件

设置为三向位移约束。支撑与衬砌结构使用自由度耦合方式进行模拟。土层模型采用莫尔-库伦模型,可以较为全面地表征土层的强度特性。根据区间的钻探情况,地基土的主要组成自上而下依次为人工填土、更新统风积黄土、残积古土壤及中更新统风积黄土。有限元模型如图 1 所示。

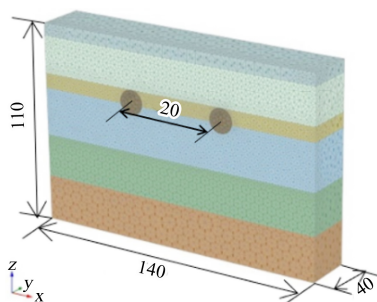


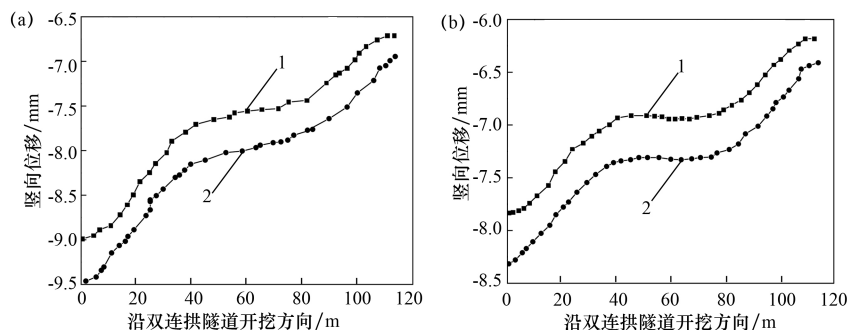
图 1 有限元模型示意

m

3 计算结果分析

3.1 开挖隧道对既有隧道衬砌结构竖向位移影响

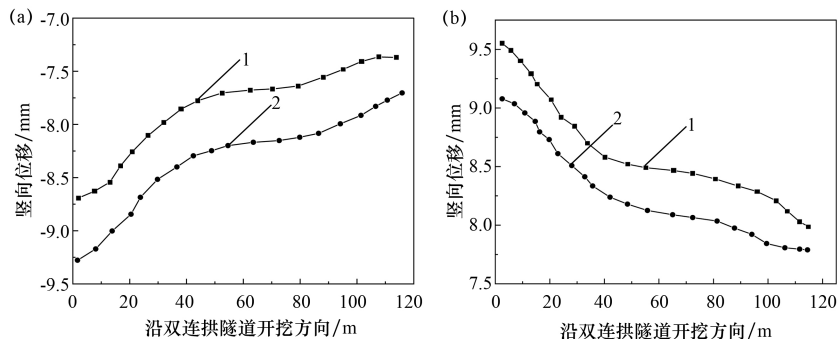
图 2 为拱顶与拱底的最终竖向位移量。由图 2 可知:在隧道开挖后,既有隧道衬砌结构的左侧部



(a) 左线; (b) 右线

1—拱顶; 2—拱底。

图 2 拱顶与拱底最终竖向位移示意



(a) 左线; (b) 右线

1—拱顶; 2—拱底。

图 3 拱顶与拱底最终横向位移示意

分竖向位移整体比右侧部分大,且竖向位移与开挖距离并非成线性关系。对于左侧部分,其拱顶沉降量为 9.0 mm,拱底沉降量为 9.4 mm;右侧部分拱顶沉降量为 7.7 mm,拱底沉降量为 8.3 mm。竖向最大位移处在隧道初始位置,竖向最小位移处在隧道末端。

3.2 开挖隧道对既有隧道衬砌结构横向位移影响

图 3 为拱顶与拱底最终横向位移量。由图 3 可知:对于左线而言,既有隧道衬砌结构的左拱腰和右拱腰沉降最大值均在新开挖隧道起始端,分别达到 8.49、9.51 mm;左拱腰的横向位移小于右拱腰的横向位移,左拱腰和右拱腰横向位移沿开挖方向距离增大的变化趋势基本相同,既有隧道衬砌结构的拱顶和拱底与开挖距离关系大致呈倾斜的 W 型。在开挖隧道末端,拱顶和拱底的横向位移分别为 7.41、7.12 mm。

综合开挖隧道对既有隧道衬砌结构竖向位移和横向位移的影响分析,开挖新隧道会导致既有隧道衬砌结构整体偏移一定的距离,且对既有隧

道衬砌结构靠近拱腰和拱底的影响大，在实际施工中，应在靠近新开挖隧道的一侧进行加固，以防止对既有隧道造成不可逆的破坏。

3.3 开挖隧道对既有隧道衬砌结构应力变化影响

图 4 为不同开挖位置的应力变化。由图 4 可知：对于左线和右线来说，不同位置受开挖新隧道影响应力变化规律基本一致。在开挖新隧道过程中，一开始既有隧道衬砌结构左线和右线拱底和左拱腰应力会随开挖距离的深入急剧下降至平缓，然后有小幅上升后再下降至平缓。既有隧道衬砌结构左线和右线拱顶和右拱腰应力基本保持不变。

图 5 为不同开挖位置的最终应力分布。由图 5 可知：随着开挖距离的深入，新隧道对既有隧道衬砌结构拱顶和拱底的应力变化影响较小，基本维持线性变化。既有隧道衬砌结构左线的左拱腰受到的应力大于右线的左拱腰，既有隧道衬砌结构左线的右拱腰受到的应力小于右线的右拱腰。

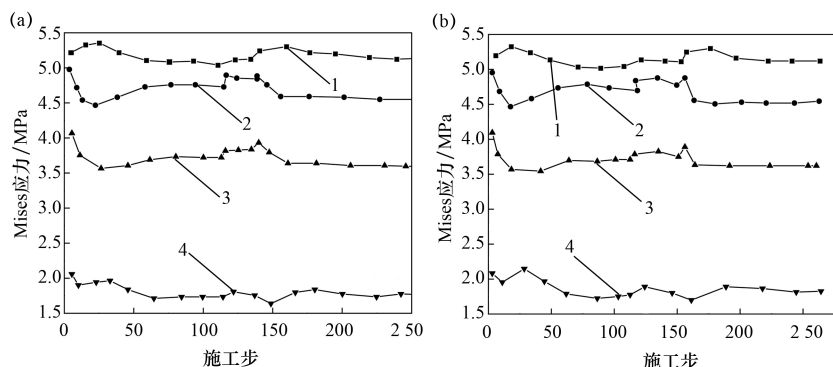
3.4 开挖隧道对上跨隧道衬砌结构竖向位移影响

错综复杂的地铁隧道网对既有隧道衬砌结构的影响不仅仅局限于横向分布，有时也会出现竖向分布的情况，如图 6 所示。由图 6 可知：既有隧道衬砌结构各位置处的竖向位移最大值均集中靠近隧道中心距离最近处，拱顶的竖向位移最大，约为 5.52 mm，拱底的竖向位移最小，约为 4.89 mm。

选取既有隧道衬砌结构中心线处断面研究，如图 7 所示。由图 7 可知：既有隧道衬砌结构的拱顶、拱底、左拱腰和右拱腰的竖向位移均随施工步的增大由平缓变为激增再至平缓，拱顶的竖向位移最大，约为 5.52 mm；拱底的竖向位移最小，约为 4.89 mm。竖向位移激增的区间出现在 10~50 施工步。0~10 施工步与 50~65 施工步的竖向位移保持平缓改变。

3.5 开挖隧道对上跨隧道衬砌结构横向位移影响

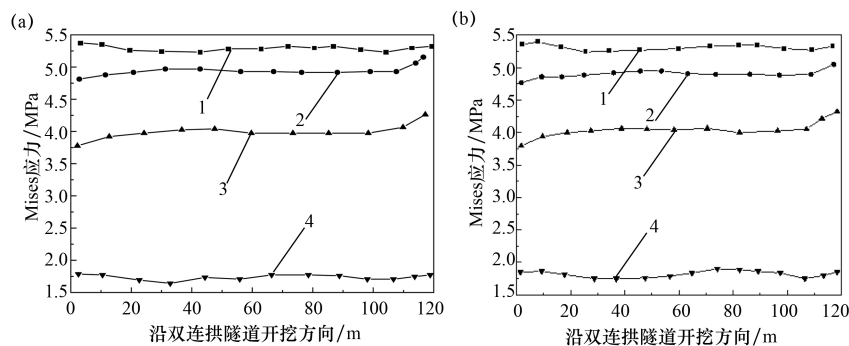
图 8 为沿既有隧道衬砌结构中心距离横向位移分布。由图 8 可知：既有隧道衬砌结构的右拱



(a) 左线；(b) 右线

1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

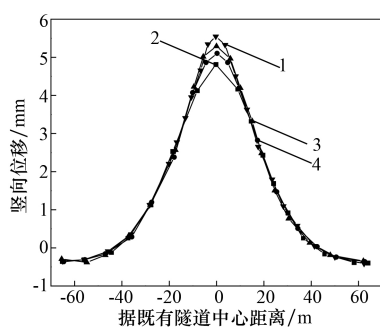
图 4 应力变化示意



(a) 左线；(b) 右线

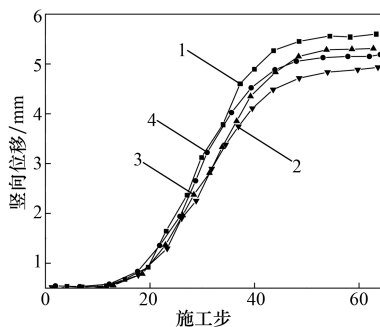
1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

图 5 最终应力分布示意



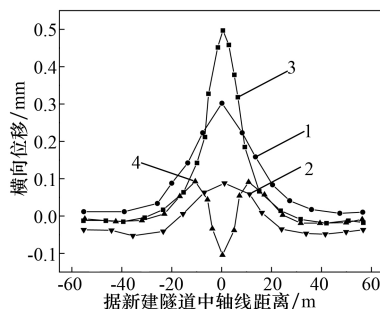
1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

图 6 沿既有隧道衬砌结构中心距离竖向位移分布示意



1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

图 7 既有隧道衬砌结构竖向位移变化示意



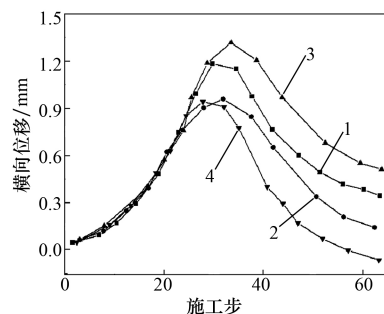
1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

图 8 沿既有隧道衬砌结构中心距离横向位移分布示意

腰靠近隧道中心时横向位移最小，而其拱顶、拱底和左拱腰在靠近隧道中心时横向位移最大，并且拱顶的横向位移最大，为 0.51 mm。既有隧道衬砌结构的拱顶、拱底、左拱腰和右拱腰的横向位移会随距隧道中心距离的增大而减小。当开挖距离大于距新建隧道中轴线 35 m，开挖新隧道对上跨既有隧道衬砌结构横向位移影响微乎其微。

选取既有隧道衬砌结构中心线处断面做研究，如图 9 所示。由图 9 可知：既有隧道衬砌结构拱顶、拱底、左拱腰和右拱腰的横向位移在施工步范围为 30~35 时达到最大值，左拱腰的横向位移最大，为 1.24 mm；当施工步小于 30 时，既有隧

道衬砌结构各处横向位移随施工步的增大而增大；当施工步大于 35 时，既有隧道衬砌结构各处横向位移随施工步的增大而减小。

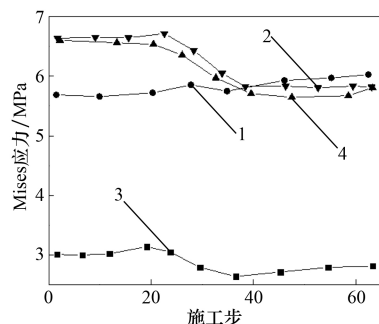


1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

图 9 既有隧道衬砌结构横向位移变化示意

3.6 开挖隧道对上跨隧道衬砌结构应力变化影响

选择既有隧道衬砌结构中心线处断面做研究，如图 10 所示。由图 10 可知：随着开挖距离的深入，拱底、左拱腰和右拱腰的应力均呈现平缓—下降—平缓的趋势；当施工步大于 35 时，拱底、左拱腰和右拱腰的应力基本保持不变。拱底的应力随开挖距离的深入，基本保持不变。拱顶应力受开挖距离深入的影响较小，各位置处应力值均小于 3.2 MPa。



1—拱顶；2—拱底；3—左拱腰；4—右拱腰。

图 10 沿既有隧道衬砌结构施工各处应力变化示意

4 结 论

本文依托某地下轨道交通工程，通过有限元软件建立三维模型，对浅埋暗挖隧道开挖对既有隧道衬砌结构的影响进行研究，得到结论如下。

(1) 采用隧道错距开挖方法会导致既有隧道的沉降量增加，特别是在隧道的初始位置。同时，既有隧道衬砌结构在新隧道开挖后，其左侧部分的竖向位移大于右侧，位移最大值出现在隧道的起始位置，最小值在末端。（下转第 61 页）

- [2] 樊小燕. C60 高强泵送混凝土在超高层建筑中的应用[J]. 工程建设,2017(4):71-73.
- [3] 张超明. 特大断面隧道高性能大体积高强度混凝土配合比设计及施工温控技术[D]. 成都:西南石油大学,2019.
- [4] 李静,张海军. 超高层建筑大体积 C80 高强混凝土的应用[J]. 施工技术,2015(12):14-16.
- [5] 于洪亮. 浅谈热带气候下 C100 大体积混凝土的施工技术[J]. 江西建材,2021(5):94-97.
- [6] 王谦,鲁统卫,郭蕾. 高强高性能混凝土在冻结井筒筑壁施工中的应用[J]. 建井技术,2013,34(1):4-7.
- [7] 高强混凝土应用技术规程:JGJ/T 281—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [8] 王天政,麦晓文,赵书震,等. C100 高性能混凝土在建井工程中的应用[J]. 中州煤炭,2015(12):75-77;116.
- [9] 李清富,孙振华,张海洋. 粉煤灰和硅粉对混凝土强度影响的试验研究[J]. 混凝土,2011(5):77-79.
- [10] 袁启涛,唐玉超,罗作球,等. C70 微珠自密实混凝土性能研究及作用机理分析[J]. 混凝土,2014(11):118-123.
- [11] 欧阳东. 混凝土矿物减水理论与 C100 超高性能混凝土[J]. 建筑技术,2001(1):24-26.
- [12] 孙晓虎,齐剑,张军. 大体积混凝土裂缝控制技术在工程中的应用[J]. 混凝土,2008(8):105-108.
- [13] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [14] 王涌. 大体积混凝土结构抗裂设计和评价[D]. 苏州:苏州科技大学,2017.

(上接第 50 页)

(2)在浅埋暗挖上跨施工中,当新隧道的开挖距离超过 35 m 时,对上跨既有隧道衬砌结构的横向位移影响较小。这表明在制定施工方案时,应考虑保持一定的安全距离,以减少对既有结构的影响。

(3)在新隧道开挖过程中,既有隧道衬砌结构的拱底、左拱腰和右拱腰的应力均会经历先下降后趋于稳定的变化。拱底的应力在整个开挖过程中变化不大,拱顶的应力变化也较小,且保持在较低水平。

(4)为了确保既有隧道的安全,建议在新隧道开挖过程中对既有隧道的一侧进行加固,有助于防止由于新隧道开挖造成的不可逆损害。

参考文献:

- [1] 熊家全. 地铁隧道浅埋暗挖施工对既有桥桩的影响分析[D]. 西安:西安科技大学,2015.
- [2] 石熊,张家生,刘宝琛. 大断面浅埋偏压暗挖通道 CRD 法施工工序研究[J]. 现代暗挖通道技术,2015,52(3):193-199.
- [3] 陈朝阳,高新强,熊华涛. 浅埋黄土隧道洞身穿越岩土分界受力变形特征[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S1):270-277.
- [4] 苗学云,范世鸿,米维军,等. 黄土塬区浅埋暗挖隧道慢坡段施工期围岩变形特征分析[J]. 铁道建筑,2020,60(7):51-54.
- [5] 闫少峰. 易塌地层浅埋暗挖通道小间距下穿既有管线的施工方法研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2022.
- [6] 李鹏,李洋,高毅,等. 基于“CC 工法”的顶管暗挖通道施工地表变形规律分析与研究[J]. 暗挖通道建设,2019,39(11):1838-1847.
- [7] 莫坤. 黄土场地双连拱地铁隧道浅埋暗挖施工对邻近既有隧道衬砌结构的影响[D]. 西安:长安大学,2022.
- [8] 许有俊,秦浩斌,李文博,等. 浅埋暗挖隧道近距离平行上跨对既有盾构隧道的变形影响分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(3):118-127.
- [9] 白鹏程. 超浅埋暗挖大跨隧道下穿既有隧道的沉降控制技术[J]. 现代隧道技术,2020,57(3):175-181.
- [10] 张学进. 淤泥质土浅埋暗挖隧道下穿既有管线影响研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(7):77-83.
- [11] 杜贵新,蒲松,叶来宾,等. 高速铁路浅埋暗挖隧道近距离上穿既有地铁隧道风险控制研究[J]. 铁道勘察,2021,47(6):86-91.
- [12] 孙长军,张顶立. CRD 法暗挖隧道下穿既有有线施工沉降控制技术[J]. 市政技术,2015,33(2):97-101.
- [13] 王岩. 基于 MJS 工法地铁近接施工对既有隧道的影响研究[D]. 西安:西安科技大学,2020.