

大断面长距离矩形顶管施工变形控制关键因素研究

Research on Key Factors of Deformation Control in Long-distance Rectangular
Pipe Jacking Construction with Large Section

李琳¹, 张文涛², 冯明月³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 中铁二十四局集团有限公司, 上海 200433;
3. 河北省交通规划设计院有限公司, 石家庄 050200)

摘要: 为了探究大断面长距离矩形顶管施工中注浆压力、摩阻力、开挖面顶推力和步长对地表沉降的影响规律, 并对施工参数优化。以济南轨道交通 4 号线段店站矩形顶管通道工程为依托, 采用正交试验法设计数值模拟方案, 利用 FLAC 3D 有限差分软件进行模拟分析。结果表明: 顶管施工过程中地表监测数据与模拟结果基本吻合; 步长是最敏感因素, 开挖面顶推力为重要因素, 注浆压力次之, 摩阻力影响最小; 步长与地表沉降呈正相关, 开挖面顶推力、注浆压力与其呈负相关, 摩阻力在 25 kPa 前呈负相关, 25 kPa 后呈正相关; 最佳施工参数: 步长 1.5 m, 开挖面顶推力 200 kPa, 注浆压力 230 kPa 以及摩阻力 25 kPa。研究结果可为济南地区矩形顶管法开挖地铁出入口通道提供参考。

关键词: 大断面; 长距离; 矩形顶管; 正交试验法; 地表沉降

中图分类号: U455 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0111-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.021

LI Lin¹, ZHANG Wentao², FENG Mingyue³

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. China Railway 24th Bureau Group Corporation Limited, Shanghai 200433, China; 3. Hebei Provincial
Communications Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050200, China)

Abstract: In order to explore the influence laws of grouting pressure, frictional resistance, thrust force at the excavation face and step length on ground surface settlement during the construction of large-section and long-distance rectangular top pipe, and to optimize the construction parameters. Taking the rectangular top pipe channel project of the Duandian Station of Jinan Metro Line 4 as the basis, the orthogonal test method was adopted to design the numerical simulation scheme, and the FLAC 3D finite difference software was used for simulation analysis. The results show that the ground surface monitoring data during the top pipe construction process are basically consistent with the simulation results; The step length is the most sensitive factor, the thrust force at the excavation face is an important factor, the grouting pressure is the second, and the frictional resistance has the least influence; The step length is positively correlated with the ground surface settlement, the thrust force at the excavation

基金项目: 河北省自然科学基金优秀青年科学基金项目 (E2021210041)。

作者简介: 李琳 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程。

通信作者: 冯明月 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程和地质灾害防治设计。

收稿日期: 2024-08-01

道桥技术

face and the grouting pressure are negatively correlated with it, and the frictional resistance is negatively correlated before 25 kPa and positively correlated after 25 kPa; The optimal construction parameters are: step length 1.5 m, thrust force at the excavation face 200 kPa, grouting pressure 230 kPa and frictional resistance 25 kPa. The research results can provide a reference for the construction of rectangular top pipe method to excavate the metro entrance and exit channel in the Jin'an area.

Key words: large section; long distance; rectangular pipe jacking; orthogonal text; surface subsidence

0 引言

近年来,我国的城市建设发展速度越来越快,对于城市空间的需求也越来越大,城市建设不断向地下空间开发和规划。传统的地下开挖方式会对城市环境造成极大的影响,为了降低影响,非开挖技术由此产生并且迅速发展^[1]。此外,随着顶管施工技术的发展,大断面长距离逐渐成为主流趋势^[2]。

与圆形顶管相比,矩形顶管能充分利用有限空间,使断面利用率提高了 20%。在地铁出入口等开挖工程上,矩形比圆形有显著的优势,并且,对于长距离通道开挖有良好的适应能力^[3]。但是在断面、浅覆土以及长距离的条件下难以精准控制地表的沉降量,无法确保不出现超挖或欠挖等情况,对地表造成不良影响。因此,越来越多的学者研究矩形顶管施工对地表的影响:Haslem^[4]针对开挖面稳定性的问题提出假设,认为顶管施工过程中顶推力的大小取决于管道和土体之间的摩阻力,并且认为开挖面一直是稳定的;Wen 等^[5]提出了五种分析计算模型讨论矩形顶管的摩擦机制,运用 FLAC 3D 对顶推力进行预测,结果一致;张轩煜等^[6]结合具体的施工案例,讨论土体摩擦角、黏聚力、弹性模量的变异性、相关距离和变异系数对地表变形的影响,总结弹性模量的空间变异性对于地表变形有较大影响;吴勇等^[7]结合深圳地铁站区间施工工程,对注浆压力和机头模拟方法进行改进,分析了矩形顶管施工技术对于浅覆土、大断面和小间距隧道地表的影响;魏纲等^[8]基于 Mindlin 位移解和随机介质理论,讨论了正面附加推力、盾壳与土体之间的摩擦力、注浆压力和土体损失对矩形盾构施工引起的土体竖向位移影响;尚亮^[9]建立三维有限元数值模型,分析不同注浆压力、支护压力、土体物理参数等影响因素对于地表位移的影响;钟小春等^[10]运用有限元软件模拟浅覆土体条件下地铁出入口矩形顶管施

工过程中引起的地表隆起,讨论了不同覆土厚度、开挖面顶推力和摩阻力作用下的地表隆起规律;曹宇春等^[11]结合杭州某隧道工程实例,运用有限元软件,通过修改模型摩阻力和支护压力参数总结出不同情况下圆形顶管在施工过程中地表沉降规律;许有俊等^[12-13]运用 Mindlin 弹性理论解、随机介质理论以及分层总和法计算地表位移,揭示了矩形顶管施工过程中注浆压力以及开挖面顶推力对地表隆起沉降的影响;赵淑芹^[14]结合某地铁施工工程,建立三维数值模型讨论不同开挖面以及开挖步长对施工隧道正上方建筑物的影响规律;魏纲^[15]对顶管施工产生的土体扰动进行了理论分析,提出了更符合实际的扰动土体分布,得出引起地表变形的原因和变形机理。

综上所述,目前研究成果大多是分析不同影响因素对地表的影响,很少有对各影响因素之间进行比较,鉴于此,结合济南轨道交通 4 号线 A 出入口通道工程,采用 FLAC 3D 有限差分软件对该施工全过程进行数值模拟,基于正交试验法,分析注浆压力、摩阻力、开挖面顶推力和开挖步长对地表影响程度和变化规律,可为类似工程提供施工和设计依据。

1 工程概况

1.1 矩形顶管通道概况

段店站位于济南市经十路与段北东路交叉口,腊山立交匝道南侧辅路下方,线路沿经十路东西向布置。车站设有 4 个出入口,其中段店站 A 号口需采用矩形顶管施工技术穿过经十路,文中主要分析 A 通道顶进过程对于地表的影响。A 通道施工段监测点的布置情况如图 1 所示。A 通道总长 71 m,顶管外径尺寸为 6.9 m×4.9 m,管节厚度为 1.5 m,顶管通道下穿多条管线,其中半径为 1.4 m 的水管理深较浅。

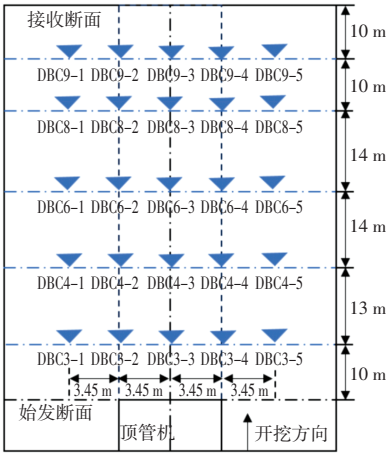


图1 监测点布置平面图
Fig.1 Layout plan of monitoring point

1.2 工程地质条件

土层从上到下依次为杂填土①₁、粉质黏土⑨₁、粉质黏土⑩₁、粉质黏土⑭₁、粉质黏土⑯₁、闪长岩等，其中顶管主要位于粉质黏土⑨₁、粉质黏土⑩₁。在建立计算模型时将土层进行简化，主要分为五层，简化后的土层参数见表1。

表1 模型基本参数
Table 1 Basic parameters of the model

名称	厚度 /m	重度 γ/(kN/m ³)	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/°
① ₁ 杂填土	3.47	16.8	20.0	0.26	28	12
⑨ ₁ 粉质黏土	6.00	19.7	25.0	0.33	30	18
⑩ ₁ 粉质黏土	8.27	19.7	29.5	0.31	31	18
⑭ ₁ 粉质黏土	5.84	19.7	39.0	0.26	33	16
⑯ ₁ 粉质黏土	6.42	19.7	42.0	0.27	33	16
水管		73.0	150 000	0.27		
管节		25.0	300 00	0.20		
注浆层（未硬化）		20.0	1	0.20		
注浆层（硬化）		21.0	200	0.20		
顶管机壳		78.5	210 000	0.30		

2 计算模型的建立

2.1 模型建立

运用有限差分软件FLAC 3D进行三维数值模拟。整个模型沿着矩形顶管通道方向为y轴，宽度为71 m；垂直于y轴为x轴，长度为80 m；垂直于x、y轴所形成的平面为z轴，高度30 m。水管正交于顶管通道方向，即沿着x轴，距离顶管2.85 m，矩形顶管断面尺寸为6.9 m×4.9 m，上覆土厚度为5.3 m，单元网格以六面体为主，如图2所示。

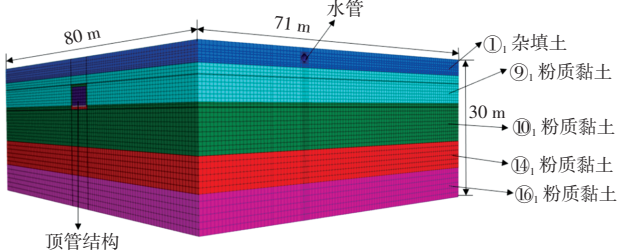


图2 矩形顶管施工三维数值模型
Fig.2 Three-dimensional numerical model of rectangular pipe jacking construction

2.2 基本假定

由于顶管顶进的施工过程较为复杂，实际的地质条件以及物理条件无法完全在软件中进行模拟，所以需要对相应的条件进行简化，模型的基本假定如下：

- (1) 土体采用摩尔-库仑本构模型。
- (2) 模型中的土层是均匀地按照水平地层进行划分。
- (3) 假设顶推力是均匀作用在开挖面上的均布荷载，作用方向与顶进方向一致。
- (4) 模型中的注浆层、管节、机壳以及水管采用实体单元进行模拟。
- (5) 注浆层和土体之间的注浆压力假设均布荷载，作用方向垂直于顶进方向。
- (6) 管节、机头和土体之间的摩阻力都假设为均布荷载，作用方向与顶进方向一致。
- (7) 不考虑地下水的影响。

2.3 计算步骤

由于实际顶管施工过程是动态连续的，在软件中无法实现动态施工，通过激活和设置空单元运用循环命令来模拟施工过程。

步骤1：依照表1中的土体参数对三维数值模型进行赋值。

步骤2：土体上表面不限制为自由边界，下表面、前后表面以及左右表面限制位移，并生成初始应力场。

步骤3：对初始应力场和位移场清零，清空管线内土体并激活管线，进行一次计算。

步骤4：顶管机头顶进4.5 m（3环管节长度），钝化该区域土体，并施加开挖面顶推力和机头摩阻力进行一次计算，如图3（a）所示。

道桥技术

步骤5：顶管机头向前顶进 1.5 m，钝化 1.5 m 土体，取消 4.5 m 处开挖面的顶推力和 1.5 m 处机壳摩阻力。在 6 m 处施加开挖面顶推力和机壳摩阻力。进行应力释放后，激活 1.5 m 处的管节和注浆层（未硬化）赋予参数，并施加管节摩阻力以及注浆压力，进行一次计算，如图 3（b）所示。

步骤6：重复步骤5的操作，再向前顶进 1.5 m，并将 1.5 m 处的注浆层（未硬化）的参数调整为注浆层（硬化）来模拟注浆层硬化过程，进行一次计算，如图 3（c）所示。

步骤7：重复步骤5和步骤6直至71 m 通道开挖完成。

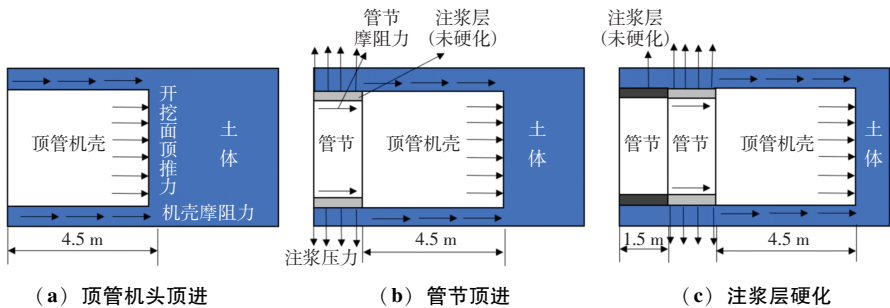


图 3 施工过程模拟效果图
Fig. 3 Simulation effect diagram of construction process

3 矩形顶管地表位移分析

3.1 方案设计

根据施工参数的计算结果进行调整形成 4 因素 4 水平的变量表，见表 2。依照表 2 设计了 A1 到 A16 共 16 种试验方案进行数值模拟，并选取地表沉降量最大位置处的位移进行分析，见表 3。将 16 组试验结果通过极差算法分析这四个影响因素作用下的影响程度，见表 4。由表 4 正交试验极差的计算结果可知，在顶管机顶进过程中，对于地表沉降影响最大的因素是开挖步长，其次是开挖面顶推力，再次是注浆压力，影响最小的是摩阻力，即：步长 > 开挖面顶推力 > 注浆压力 > 摩阻力。

3.2 开挖步长对地表变形的影响

开挖步长对地表变形影响规律如图 4 所示。开挖步长和地表最大沉降处的位移成正相关，随着开挖步长的逐渐增大，地表的沉降量逐渐增大。地表最大沉降量可以分成两个阶段：当开挖步长在 1.5~3 m

表 2 四因素四水平变量表
Table 2 Four-factor four-level variable Table

水平	因素			
	注浆压力 (A) /kPa	顶推力 (B) /kPa	开挖步长 (C) /m	摩阻力 (D) /kPa
1	140	120	1.5	5
2	170	150	3.0	15
3	200	180	4.5	25
4	230	210	6.0	35

表 3 正交试验方案及试验结果
Table 3 Orthogonal test scheme and test results

方案 编号	注浆压力 (A)	顶推力 (B)	开挖步长 (C)	摩阻力 (D)	地表沉降量最大 处的位移/mm
A1	1	1	1	1	10.956
A2	1	2	2	2	14.550
A3	1	3	3	3	15.999
A4	1	4	4	4	16.533
A5	2	1	2	3	14.732
A6	2	2	1	4	10.118
A7	2	3	4	1	16.846
A8	2	4	3	2	15.421
A9	3	1	3	4	16.444
A10	3	2	4	3	17.112
A11	3	3	1	2	9.124
A12	3	4	2	1	13.220
A13	4	1	4	2	17.356
A14	4	2	3	1	15.841
A15	4	3	2	4	13.289
A16	4	4	1	3	8.072

表 4 极差分析试验结果
Table 4 Range analysis test results

指标	注浆压力 (A)	顶推力 (B)	开挖步长 (C)	摩阻力 (D)
K_i	58.039	59.487	38.270	56.863
	57.117	57.621	55.791	56.451
	55.900	55.258	63.706	55.915
	54.558	53.247	67.847	56.384
k_i	14.510	14.872	9.567	14.216
	14.279	14.405	13.948	14.113
	13.975	13.815	15.926	13.979
	13.640	13.312	16.962	14.096
最佳水平	4	4	1	3
R	0.870	1.560	7.394	0.237

内,沉降量快速增长;当开挖步长超过 3 m,沉降量缓慢增长。由于开挖步长的增大导致更大范围内的土体被移动和开挖,同时土体进行应力释放,如果顶管顶进和注浆不及时,地表会产生较大的沉降变形。随着开挖步长的增大,顶管周围的土体压缩和沉降增加,从而地表沉降量也增加。开挖步长的增大对周围土体的扰动程度增强,进而改变土体的应力和应变状态导致地表沉降增大。因此,采用矩形顶管施工过程中,应该减小开挖步长。

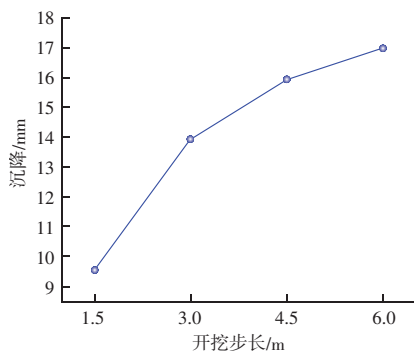


图4 地表沉降量与开挖步长的关系曲线
Fig. 4 Relation curve between surface subsidence and excavation step length

3.3 开挖面顶推力对地表变形的影响

开挖面顶推力对地表变形影响规律如图 5 所示。开挖面顶推力和地表最大沉降处的位移呈负相关性关系,随着顶推力的增大,沉降量逐渐减小。顶管机在顶进过程中开挖面顶推力是首要影响因素,顶管机顶进的最佳状态是开挖面处的顶推力刚好平衡所在位置的静止水土压力和。随着开挖面顶推力的增大,对周围土体产生挤压作用增强,造成地表隆起量增大,地表的沉降量减小;反之,随着开挖面顶推力逐渐减小,开挖面处的顶推力无法平衡周

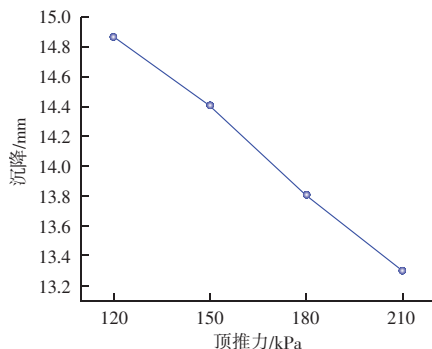


图5 地表沉降量与开挖面顶推力的关系曲线
Fig. 5 Relation curve between surface subsidence and jacking pressure of excavation face

围土压力,从而造成地表沉降量增大。如果为了降低地表沉降量而过度增加开挖面顶推力,会导致开挖面不稳定,前方土体应力集中重新分布造成隆起。因此,合理控制顶推力十分重要。

3.4 注浆压力对地表变形的影响

注浆压力对地表变形影响规律如图 6 所示。注浆压力和地表最大沉降处的位移大小呈负相关,随着注浆压力的逐渐增大,地表的沉降量逐渐减小。随着注浆压力增大对顶管上层以及四周土体造成扰动,使得地表沉降量逐渐减小;随着注浆压力的减小,顶管四周无法形成完整的泥浆套,无法较好地提高周围土体的抗剪和抗压强度,造成地表沉降量逐渐增大。

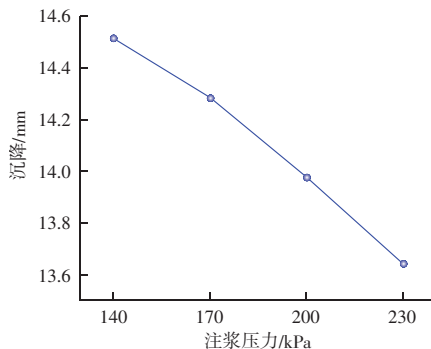


图6 地表沉降量与注浆压力的关系曲线
Fig. 6 Relation curve between surface subsidence and grouting pressure

3.5 摩阻力对地表变形的影响

摩阻力对地表变形影响如图 7 所示。从 5 kPa 到 25 kPa,摩阻力与地表最大沉降处的位移呈负相关;从 25 kPa 到 35 kPa,摩阻力与地表最大沉降处的位移呈正相关。随着摩阻力的增大,开挖面的稳定性增大,对开挖面处土体的挤压作用增强,降低了地表的沉降;当摩阻力增大到一定程度时,摩阻力会

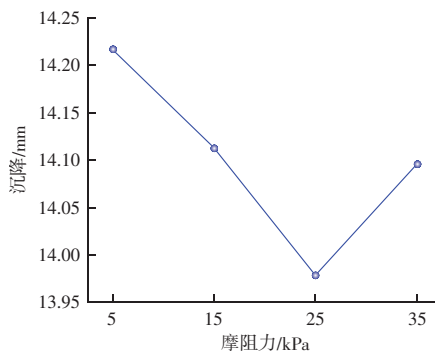


图7 地表沉降量与摩阻力的关系曲线
Fig. 7 Relation curve between surface subsidence and friction resistance

道桥技术

导致周围土体应力重分布, 引发应力集中造成土体的局部变形, 地表沉降量增加。

3.6 实际监测值与模型计算值的比较分析

选取监测点 DBC6-1~DBC6-5 实测的沉降最大值与数值模型中该位置处的地表位移进行比较, 验证数值模型的准确性, 如图 8 所示。监测点位移与模拟结果存在差距, 但差距不大。由于实际施工过程中要考虑到天气环境因素、交通荷载以及施工未能达到精准控制等因素影响, 现场监测数据结果比模拟计算结果偏大。

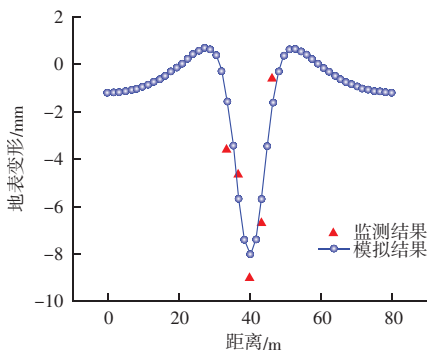


图 8 地表监测及数值计算的地表变形曲线

Fig. 8 Surface deformation curve of surface monitoring and numerical calculation

4 结论

以济南地铁 4 号线段店站 A 出入口人行通道工程为实例, 运用 FLAC 3D 软件模拟大断面矩形顶管顶进的施工, 分析了施工变形控制的四个关键因素: 注浆压力、摩阻力、开挖面顶推力和开挖步长对于地表位移的影响程度以及变化规律, 得出以下主要结论:

(1) 在顶管施工过程中四个关键因素对地表影响程度排序: 开挖步长 > 开挖面顶推力 > 注浆压力 > 摩阻力。

(2) 开挖步长对地表沉降影响程度最大, 开挖步长增大前期地表沉降量快速增长, 后期缓慢增长, 因此施工过程中为了避免沉降过大影响施工进度、破坏环境等问题发生, 选择 1.5 m 开挖步长较为合适。

(3) 开挖面顶推力是重要影响因素, 开挖面顶推力越大, 地表沉降量就越小, 且地表沉降值与开挖面顶推力大致呈线性负相关, 最佳开挖面顶推力

为 200 kPa。

(4) 注浆压力与地表沉降值呈负相关, 最佳注浆压力为 230 kPa; 摩阻力在 25 kPa 以前与地表沉降值呈负相关, 在 25 kPa 后呈正相关, 因此, 该工程施工条件下将摩阻力控制在 25 kPa 较为合适。

参 考 文 献

- [1] 彭立敏, 王哲, 叶艺超, 等. 矩形顶管技术发展与研究现状 [J]. 隧道建设, 2015, 35 (1): 1-8.
- [2] 贾连辉. 矩形顶管在城市地下空间开发中的应用及前景 [J]. 隧道建设, 2016, 36 (10): 1269-1276.
- [3] 马鹏, 岛田英树, 马保松, 等. 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (10): 1677-1692.
- [4] HASLEM R F. Pipe - jacking forces: from practice to theory [C] //Proceedings of ICE North Western Association Centenary Conference in Infrastructure Renovation and Waste Control. Manchester: Manstock, 1986: 173.
- [5] WEN K, SHIMADA H, ZENG W, et al. Frictional analysis of pipe - slurry - soil interaction and jacking force prediction of rectangular pipe jacking [J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2018 (1): 1-19.
- [6] 张轩煜, 施成华, 孙晓贺, 等. 基于随机场理论的顶管隧道施工地表变形特性分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (6): 2174-2189.
- [7] 吴勇, 徐日庆, 段景川, 等. 浅覆土大断面小间距矩形顶管施工的环境效应 [J]. 现代隧道建设, 2017, 54 (5): 78-85.
- [8] 魏纲, 张鑫海, 徐银锋. 考虑多因素的类矩形盾构施工引起土体竖向位移研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (1): 199-208.
- [9] 尚亮. 大断面矩形顶管对周围土体及地下管线的影响研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [10] 钟小春, 何纯豪, 李永运, 等. 地铁出入口浅覆土矩形顶管工程地表隆起研究 [J]. 西南交通大学学报, 2023, 58 (3): 603-612.
- [11] 曹宇春, 诸葛恒源, 曾阳, 等. 大口径顶管施工对地表沉降的影响分析 [J]. 科技通报, 2019, 35 (6): 75-79.
- [12] 许有俊, 王雅建, 冯超, 等. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (1): 192-199.
- [13] 许有俊, 张治华, 史明, 等. 土压平衡矩形顶管正面附加推力对地表隆起变形影响研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2019, 51 (6): 814-824.
- [14] 赵淑芹. 盾构隧道施工对地面砌体结构房屋的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [15] 魏纲. 顶管施工中土体性状及环境效应分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.