

上跨既有地铁盾构区间地铁工程结构变形控制技术

Structural Deformation Control Technology for Crossing Existing Subway Shield Tunnel Sections in Subway Engineering

王瑞强, 郭彬彬, 梁桃, 何义, 范小叶

(中建八局第三建设有限公司, 南京 210000)

摘要: 以某新建地铁为研究对象, 研究上跨既有地铁盾构区间地铁工程结构变形控制技术。优化试验段盾构施工参数中的同步注浆压力和注浆量, 设计二次注浆施工方法, 以完成盾构区间试验段地铁工程结构变形控制; 依据监测结果, 调整盾构施工参数, 设计聚氨酯隔离环, 完成盾构区间穿越段地铁工程结构变形控制。结果表明: 在试验段和穿越段中, 拱顶最大变形量分别为 1.2 和 0.8 mm; 在穿越段中, 轨道结构上行线与下行线的最大变形量稳定在 1.5 与 1.47 mm。该技术有效控制了盾构区间地铁工程结构变形量。

关键词: 上跨既有地铁; 盾构区间; 地铁工程; 结构变形; 控制技术; 同步注浆

中图分类号: U458.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0090-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.017

WANG Ruiqiang, GUO Binbin, LIANG Tao, HE Yi, FAN Xiaoye

(The Third Construction Co., Ltd of China Construction Eighth Engineering Division, Nanjing 210000, China)

Abstract: Taking a newly constructed subway as the research object, this study investigates the deformation control technology of the subway engineering structure that spans over the existing subway shield tunnel section. Optimize the synchronous grouting pressure and grouting volume in the shield tunneling construction parameters of the test section, design a secondary grouting construction method to complete the deformation control of the subway engineering structure in the shield tunneling section test section; Based on the monitoring results, adjust the parameters of shield tunneling construction, design polyurethane isolation rings, and complete the deformation control of the subway engineering structure in the shield tunneling section. The results showed that the maximum deformation of the arch crown was 1.2 and 0.8 mm in the experimental section and the crossing section, respectively. In the crossing section, the maximum deformation of the upward and downward tracks of the track structure remained stable at 1.5 and 1.47 mm, respectively. This technology effectively controlled the deformation of the shield tunneling section subway engineering structure.

Key words: crossing above existing subway; shield zone; subway engineering; structural deformation; control technology; synchronous grouting

0 引言

随着城市的发展, 地铁已成为人们出行不可或缺的交通工具之一^[1]。然而, 地铁建设过程中经常面临的一个挑战是上跨既有地铁盾构区间施工。这种情况下, 盾构区间需要在上部穿越既有地铁线路, 增加了施工的复杂性和风险。为了确保施工期间既有地铁盾

作者简介: 王瑞强 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 土木工程 (交通土建方向)。

收稿日期: 2023-12-13

构区间结构稳定、运营安全，同时保证新建盾构区间顺利施工，上跨既有地铁盾构区间地铁工程结构变形控制技术显得尤为重要^[2]。白海卫等^[3]通过合理调整新建隧道与既有隧道的应力分布，实现既有隧道的微变形控制；寇鼎涛^[4]通过采用数值模拟和现场监测等方法，对新建隧道施工过程中的土体位移、应力分布、结构变形等进行预测和评估，并采取相应的加固措施和施工方案，最大限度地减少对既有线路结构的影响；姜之阳等^[5]使用 FLAC 3D 有限差分软件构建出大断面矩形顶管上跨既有地铁隧道的三维数值模型，研究了双线矩形顶管上跨施工时地铁隧道上浮变形规律；张建军等^[6]通过 Midas/GTS NX 软件建立上跨地铁区间环隧匝道的三维模型，分析了由基坑开挖诱发的地铁衬砌结构内力变化特征；高利宏^[7]对盾构段配筋完整性进行了计算与分析，加强施工监测以及实施弱扰动保护方案，保证地铁设施的安全与稳定；魏纲等^[8]利用影像源方法构建融入转动与错台变形调整机制的盾构隧道模型，证明下方隧道最大隆起量与基坑坑底最大隆起量之间存在正向相关关系；陈仁朋等^[9]提出了一种盾构隧道横向受力理论计算方法，分析隧道横向受力、变形与内力之间的相互作用机制；梁宇^[10]采用了盾构施工法以及克泥效工法，控制注浆量、注浆压力、注浆时间等参数，降低了因施工引起的地面沉降以及对周边建筑物的影响；朱汉华等^[11]从隧道围岩荷载与支护平衡、变形协调控制及围岩能量守恒方面分析，揭示了围岩平衡与支护结构变形协调控制机理。

盾构机在掘进过程中，可能会使盾构机周围的土体受到不均匀的扰动，影响土体应力的分布，引起周围工程结构产生不均匀的侧向位移和沉降，对结构的稳定性产生不利影响^[12-15]。为解决这一问题，研究上跨既有地铁盾构区间结构变形控制技术，确保在盾构施工期间结构的稳定以及安全，降低地下施工时的风险及复杂程度，以期为未来的地铁建设中提供有效的参考和指导。

1 上跨地铁盾构区间变形控制技术

1.1 工程概况

某市新建地铁属于双线隧道，上行线与下行线两线总长分别是 1 587.265 m 与 1 579.494 m，两线间的距离在 9~13 m 之间，盾构区间隧道上方土层厚

度在 7~12 m 之间。该工程的主要风险源是上跨既有地铁 1 号线，新建地铁盾构左线和 1 号线隧道结构的最小净距是 1.75 m。新建地铁盾构施工区间的地质性质见表 1。

表 1 新建地铁盾构施工区间的地质性质
Table 1 Stratigraphic properties of shield tunnel construction sections in newly built subway

地层	弹性模量/MPa	密度/(g/cm ³)	压缩模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	6.3	1.86	5.18	0.46	19.3	5.0	11
残积砂质黏性土	23.6	2.01	6.03	0.31	19.6	28.0	25
粉质黏土	8.9	2.13	6.16	0.24	19.9	11.0	22
中粗砂	28.3	2.00	15.40	0.29	20.4		
细砂	16.7	2.02	17.60	0.26	19.1	42.7	36
砾砂	33.6	2.26	32.00	0.21	20.1	0.1	41
粉质黏土	32.1	2.15	14.20	0.36	20.2	0.1	19
粉土	17.5	2.06	15.70	0.31	26.1	29.1	17

1.2 盾构区间地铁工程结构变形控制技术

将新建地铁上下行线隧道划分成试验段与穿越段，以盾构机掘进起点到穿越段之间的区段为试验段，以新建地铁穿越既有 1 号线的区段为穿越段。试验段及穿越段的上下行线隧道在变形控制技术上是一致的，见表 2。

表 2 盾构区间施工区段划分以及变形控制技术
Table 2 Division of shield tunnel section construction sections and deformation control technology

区段	上行线环号	下行线环号	主要控制技术	备注
试验段	1~15	1~5	优化盾构施工参数、同步注浆、二次注浆	验证注浆对控制工程结构变形的效果
	16~20	6~10	注入聚氨酯材料	避免浆液窜流
穿越段	21~24	11~14	优化盾构施工参数、同步注浆、土体加固注浆	控制工程结构变形
	25~65	15~59	注入聚氨酯材料	加快浆液凝结速度
	66~74	60~66	注入聚氨酯材料	避免浆液窜流

1.2.1 盾构区间试验段地铁变形控制技术

在上跨既有地铁盾构区间施工中，注浆压力过大会导致地面凸起、浆液渗入土仓及管片变形，压力过小则注浆填充不足导致沉降。同样，注浆量太大，则浆液将会渗透至附近土体中，导致附近土体出现变形现象，进而导致工程结构变形；若注浆量太小，则不能填满空隙，导致土体塌方，威胁施工人员的安全。为此，对盾构施工参数与同步注浆施工步骤进行优化。试验段盾构施工参数见表 3。

表 3 试验段盾构施工参数
Table 3 Construction parameters of shield in test section

隧道覆土/m	地下水位/m	设定土压/MPa	掘进速度 (cm/min)	注浆量/m ³	推进力/t	刀盘扭矩/%	注浆压力/MPa
8.2	6.54~7.95	0.08~0.11	10~14	5~7	950~1 200	45~75	0.25~0.35

通过二次注浆，可保证管壁后空隙被填满，降低隧道围岩收敛与拱顶变形，进而缩小工程结构变形量。以双液型浆液为二次注浆浆液，其中，第一种浆液为水泥加水，第二种浆液为水玻璃加水。

按照优化后的注浆压力和注浆量，每间隔 5 个环号注入一次第一种浆液（或第二种浆液）填充管壁背衬，确保浆液均匀注入管壁后空隙内，避免出现土体劈裂问题，影响注浆效果。应用间隔方式注入浆液，可有效避免工程结构变形。

1.2.2 盾构区间穿越段地铁变形控制技术

上跨既有地铁盾构区间穿越段变形控制技术主要包含土仓压力、掘进速度与排渣土量、同步注浆、土体加固注浆、聚氨酯隔离环 5 个因素。

通过分析上跨既有地铁盾构区间试验段施工的工程结构变形监测结果，确定试验段土仓压力设定值是否合理，若地表凸起较大，那么在穿越段需要适当减小土仓压力；若地面出现沉降，那么在穿越段需要适当增加土仓压力。盾构施工时通过合理控制螺旋输送机的转速，确保盾构设备平稳掘进，且掘进过程不可间断，各环出土量控制在 42~44 m³。

同步注浆的浆液初凝时间需控制在 7 h 左右，各环同步注浆量在 5 m³ 左右，注浆压力控制在 0.25 MPa 左右，注浆速度和盾构掘进速度相同。加固注浆范围为隧道顶部 270° 以内，注浆深度是 2.5 m。在上下行线穿越段首末两端每 5 环范围内，以 0.4 MPa 的注入压力，注入聚氨酯材料，形成隔离环，避免浆液窜流，加快浆液凝结速度。各环注入 1 t 左右的材料。

2 试验分析

2.1 试验监测点布设

在新建地铁工程结构中，布设 16 个监测点，如图 1 所示。1 号与 9 号监测点属于试验段，其余监测点为穿越段。盾构区间地铁工程结构变形控制指标需符合规范要求。

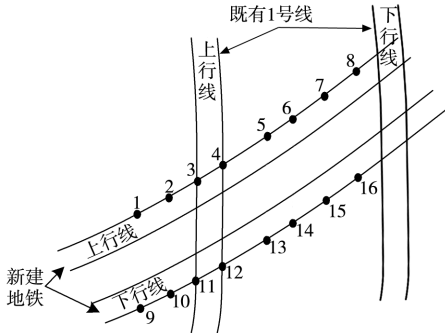
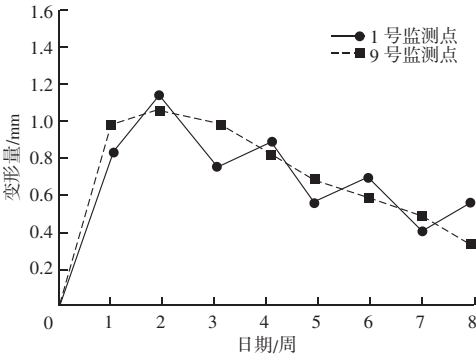


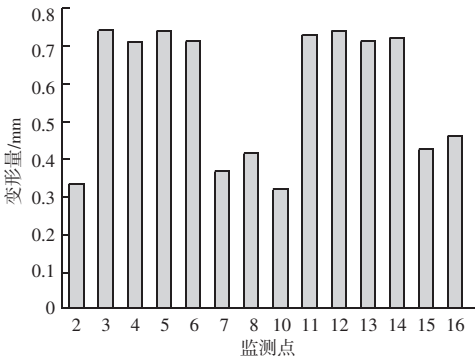
图 1 监测点布设结果
Fig. 1 Monitoring point layout results

2.2 盾构区间地铁拱顶变形控制效果

新建地铁隧道拱顶变形控制效果，如图 2 所示。在试验段，拱顶变形量在监测期最大值为 1.2 mm，小于变形允许值，说明应用该控制技术后，可有效控制盾构区间试验段地铁工程结构变形。



(a) 试验段



(b) 穿越段

图 2 拱顶变形量监测结果
Fig. 2 Monitoring results of arch deformation

在穿越段, 各监测点的拱顶变形量在 $0.3 \sim 0.8 \text{ mm}$ 之间波动, 均小于变形允许值, 说明应用该控制技术后, 可有效控制盾构区间穿越段地铁工程结构变形。其中, 位于既有地铁 1 号线上方的监测点 3 号至 6 号, 以及 11 号至 14 号的拱顶变形量相差较小, 拱顶变形量均较大; 在既有地铁 1 号线两侧的拱顶变形量较小, 监测点 7 号、8 号、15 号与 16 号的拱顶变形量, 略高于监测点 2 号与 10 号, 原因是盾构掘进过程中, 刀盘向右旋转, 导致右侧土体受到的扰动较大。

以 5 号监测点为例, 分析不同施工时间下, 该监测点的拱顶变形情况, 如图 3 所示。在施工前期, 该监测点的拱顶变形量呈上升趋势, 在施工开始的第二周, 该监测点的拱顶变形量最大, 在 0.78 mm 左右, 但并未超过限值; 随后拱顶变形量开始缓慢下降, 并逐渐趋于稳定, 此时盾构已离开监测点, 不再对土体形成挤压作用, 使土体由蠕变转变成固结沉降, 沉降趋于稳定。

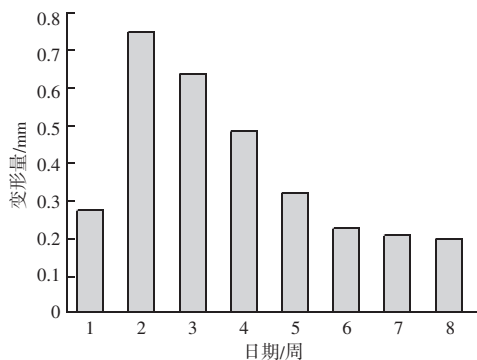


图 3 不同施工时间下拱顶变形情况

Fig. 3 Deformation of the arch crown at different construction times

2.3 盾构区间地铁轨道结构变形控制效果

新建地铁上行线与下行线的轨道结构变形情况如图 4 所示。上行线中监测点 4 号与 5 号、下行线中监测点 12 号与 13 号的轨道结构变形量明显高于其余监测点, 但均未超过轨道结构变形控制值, 说明应用变形控制技术后, 可有效控制上下行线的轨道结构变形。

以上行线监测点 4 号与下行线监测点 12 号为例, 分析不同盾构掘进时间, 应用变形控制技术控制后, 地铁轨道结构的变形情况, 分析结果如图 5 所示。

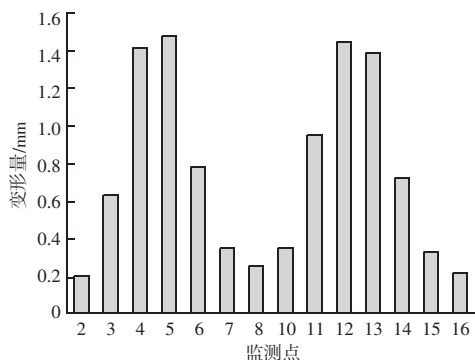


图 4 轨道结构变形情况分析结果

Fig. 4 Analysis results of deformation of track structure

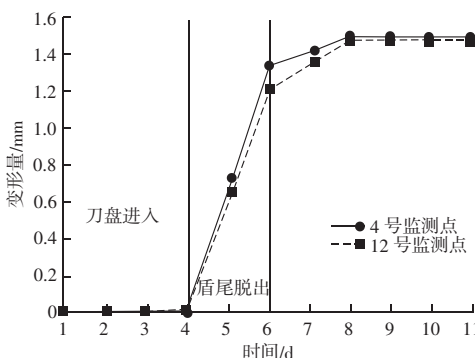


图 5 地铁轨道结构变形量的历时曲线

Fig. 5 Duration curve of deformation of subway track structure

穿越段中, 穿越段轨道结构变形呈现典型三阶段特征: 盾构刀盘进入阶段 (前 4 d) 土体扰动小, 上下行线变形稳定; 盾尾脱出阶段 (4~6 d) 扰动加剧, 变形量快速上升; 盾尾完全脱出后变形趋于稳定, 最终维持在 $1.47 \sim 1.50 \text{ mm}$, 低于控制值。

3 结论

为了确保施工期间既有地铁盾构区间结构稳定、运营安全, 同时保证新建盾构区间顺利实施, 提出上跨既有地铁盾构区间地铁工程结构变形控制技术。优化试验段盾构施工参数, 设计二次注浆流程; 调整盾构施工参数, 设置掘进速度与排渣土量、注浆参数, 设计聚氨酯隔离环, 有效控制了盾构区间地铁工程结构变形的发生。

日后, 还需要进一步探索新的加固措施和施工方案, 以应对更复杂的地质条件和施工要求, 进一步提高地铁建设的施工质量和安全水平, 为城市的繁荣和便捷做出贡献。

岩土力学

参 考 文 献

[1] 屈浩, 张波, 张振义, 等. 盾构隧道侧穿引发砌体建筑物变形损伤实例研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (3): 119-130.

[2] 董宇. 基于现场变形监测成果在盾构近接既有隧道段的变形预测研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 50-56.

[3] 白海卫, 王剑晨, 刘运亮. 基于应力平衡的上穿施工既有隧道微变形控制 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (5): 1569-1577.

[4] 寇鼎涛. 北京地铁大兴机场线矩形断面大跨度隧道上穿施工时对既有有线结构变形的控制 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (8): 56-64.

[5] 姜之阳, 张彬, 刘硕, 等. 大断面矩形顶管上跨施工对既有地铁隧道变形影响研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30 (5): 1703-1712.

[6] 张建军, 陈浩, 韩会云, 等. 上跨地铁区间环隧匝道施工稳定性控制研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (12): 100-109.

[7] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (4): 194-202.

[8] 魏纲, 郭丙来, 王哲, 等. 考虑开挖宽度的基坑卸荷引起下卧

盾构隧道变形计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (4): 1019-1030.

[9] 陈仁朋, 刘慕淳, 孟凡衍, 等. 基坑开挖旁侧盾构隧道结构横向受力与变形研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (1): 24-32.

[10] 梁宇. 地铁盾构施工在快速路下方上跨南水北调干渠技术研究 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (8): 915-917.

[11] 朱汉华, 周小涵, 王葵, 等. 隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (1): 79-86, 94.

[12] 曹洋, 林育睿, 张二望, 等. 地铁盾构施工对上跨桩板结构的扰动机制研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (7): 24-30.

[13] 丁吴玉, 刘利先, 李霖. 地表增荷比对方盾构隧道变形和内力的影响 [J]. 工业安全与环保, 2024, 50 (8): 61-65.

[14] 顾锋. 软土地区市域快速轨道交通大直径盾构隧道的横断面变形特征及其控制限值 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (8): 97-102.

[15] 杨艳玲, 韩现民, 李文江. 地铁盾构区间近距离下穿顶管隧道力学响应及沉降控制标准研究 [J]. 铁道标准设计, 2022, 66 (3): 118-123, 149.

(上接第 79 页)

满足铁路基床强度标准的最低水泥掺量需大幅提高。

(2) 粉煤灰的增强效果受含水率与水泥掺量双重制约: 在低含水率 (50%) 或不足水泥掺量条件下, 添加粉煤灰将降低固化土强度; 而高含水率 (70%) 与足量水泥 (10%) 配合时, 粉煤灰掺量提升可明显节约水泥用量。

(3) 固化土强度增长呈现显著时效特征, 约 70% 的 28 d 强度在养护前 14 d 形成。

该成果为同类型高含水率疏浚淤泥的工程化利用提供了可操作的配比设计准则, 通过优化材料组合可降低处理成本, 同时满足路基承载性能要求。

参 考 文 献

[1] 吴鸿昇, 刘勇, 蔡辉敏, 等. 固化脱水过程对淤泥固化效果影响研究 [J/OL]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 73-78. DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.014.

[2] 旷春贵, 胡世平. 复掺水泥+聚丙烯纤维改良淤泥质废弃软土试验研究 [J/OL]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 83-87, 129. DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.05.015.

[3] 王文军, 袁飞飞, 蒋建良, 等. 高含水率吹填淤泥固化土强度特性及预测模型 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (2): 461-467.

[4] 田大作. 洞庭湖北部垸内沟渠淤泥固化土物理力学性质试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019 (12): 141-144.

[5] 邹维列, 贺扬, 张凤德, 等. 改性淤泥固化土非饱和渗透特性试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2017, 51 (11): 2182-2188.

[6] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2005 (5): 32-35.

[7] 张春雷, 朱伟, 李磊, 等. 湖泊疏浚泥固化筑堤现场试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2007 (1): 27-29.

[8] 张春雷, 朱伟, 黄英豪, 等. 固化淤泥三轴试验研究 [C/OL] //第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集 (上册). 中国云南昆明, 2006, 3: 259-261 [2025-02-21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CPFD&dbname=CPFD9908&filename=ZGSL200611001064>.

[9] 黄英豪, 朱伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究 [J/OL]. 岩土力学, 2012, 33 (10): 2923-2928. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.10.003.

[10] 王国才, 吴旻炯. 滩涂淤泥固化土力学特性试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43 (4): 468-472.

[11] 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2023 [S/OL]. (2023-04-20) [2025-02-25].

[12] 铁路路基设计规范: TB 10001—2016 [S/OL]. (2016-12-20) [2025-02-25].