

大直径盾构隧道穿越对邻近地铁隧道影响的研究

Study on the Impact of Large Diameter Shield Tunnel Crossing on Adjacent Subway Tunnels

何建林

(沪杭铁路客运专线股份有限公司, 上海 200040)

摘要: 随着城市地下空间的不断开发, 新建隧道不可避免的近距离穿越既有地下结构。为此, 依托苏州东大直径盾构隧道下穿轨道交通 5 号线工程背景, 通过有限元软件建立三维数值模型模拟盾构下穿施工过程, 分析了盾构掘进对既有地铁隧道和地表的变形影响。结合现场实测, 探讨了隧道掘进不同阶段引起周边环境变形的原因, 并提出了针对性的变形控制措施。结果表明: 隧道掘进主要引起斜交范围内既有隧道的变形, 既有隧道和地表最大竖向位移分别为 5.15 mm 和 4.472 mm, 均小于工程要求的 10 mm 限值; 盾构通过后引起的地表沉降和隧道沉降占比高达 42.6% 和 40.0%, 而后期固结稳定阶段的地表沉降和隧道沉降占比仅为 2.5% 和 6.6%。研究成果可为类似工程提供一定的借鉴和指导。

关键词: 大直径盾构; 近距离下穿; 数值模拟; 变形影响

中图分类号: U45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0060-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.011

HE Jianlin

(Shanghai Hangzhou Railway Passenger Dedicated Line Co., Ltd., Shanghai 200040)

Abstract: With the continuous development of urban underground space, new tunnels inevitably pass through existing underground structures at close range. To this end, based on the background of the Suzhou East Large Diameter Shield Tunnel Underpass Rail Transit Line 5 project, a three-dimensional numerical model was established through finite element software to simulate the shield tunneling construction process, and the deformation effects of shield tunneling on existing subway tunnels and ground surfaces were analyzed. Based on on-site measurements, the causes of deformation in the surrounding environment during different stages of tunnel excavation were explored, and targeted deformation control measures were proposed. The results indicate that tunnel excavation mainly causes deformation of existing tunnels within the oblique intersection range, with maximum vertical displacements of 5.15 mm and 4.472 mm for existing tunnels and the ground surface, respectively, both of which are less than the engineering requirement of 10 mm limit; The proportion of surface settlement and tunnel settlement caused by shield tunneling is as high as 42.6% and 40.0%, respectively, while the proportion of surface settlement and tunnel settlement during the later consolidation and stabilization stage is only 2.5% and 6.6%, respectively. This study can provide some reference and guidance for similar projects.

Key words: large-diameter shield tunneling machine; wearing at close range; numerical simulation; deformation impact

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC3806702)。

作者简介: 何建林 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 铁路工程。

收稿日期: 2025-09-22

0 引言

在复杂城市环境中, 新建隧道近距离下穿既有地铁隧道的情况日益增多, 施工过程中易引起既有隧道结构的附加变形, 严重时甚至威胁运营安全^[1-2]。如何有效控制既有隧道的变形, 确保其稳定性和正常使用功能, 成为隧道工程领域亟待解决的关键问题。

目前, 国内学者针对盾构下穿工程的影响机制及控制措施开展了大量研究, 包括理论分析、数值模拟、现场监测等方法。例如, 魏纲等^[3]以隧道开挖应力释放效应为基础, 改进并求解了既有隧道的围压重分布模型, 结合有限元分析法, 模拟隧道穿越过程, 分析了围压重分布后隧道的受力变形规律。杨超等^[4]以贵阳轨道交通 3 号施工为背景, 通过数值软件建立了耦合模型, 模拟了盾构穿越高速铁路过程, 分析了盾构穿越对铁路路基和轨道的影响。欧阳鸿志等^[5]以南昌地铁 4 号线为依托, 通过不同方案比选确定了该工程最优施工工法, 结合数值模拟和现场监测法, 提出了地表注浆和现浇筏板基础框架涵的加固措施。王继峰等^[6]利用有限元软件模拟了哈尔滨地铁 3 号线下穿框架铁路桥过程, 获得了盾构施工过程中地表沉降和框架桥结构变形数据。张亚洲等^[7]依托洛阳市地铁 1 号线施工背景, 采用 Ansys 软件, 分析了盾构穿越过程中桩基和桥梁结构变形规律。许有俊等^[8]依托某下穿地铁车站的盾构隧道背景, 通过有限元软件建立三维模型, 对比了车站底板下布置桩基与不布置桩基两种工况下, 盾构施工对既有车站的变形影响, 并结合现场实测分析提出了相应的沉降控制措施。姚晓明等^[9]以成都某轨道交通为例, 针对盾构隧道下穿运营地铁的难点, 提出了大管棚加固措施。江华等^[10]以北京轨道交通 8 号线为研究对象, 通过有限元分析和现场监测, 分析了双线隧道施工引起上方地铁车站的变形规律, 并探讨了盾构隧道的风险源。房倩等^[11]针对京张高铁清华园隧道下穿既有地铁的难点, 提出了地层加固措施。通过数值软件建立三维数值模型, 分析盾构掘进参数变化引起既有地铁的变形规律。施成华等^[12]在考虑地层变异性的基础上, 提出了新建隧道施工引起既有隧道纵向变形的解析解, 结合

蒙特卡罗模拟策略和随机场理论, 对解析解进行了随机性分析。范文昊等^[13]依托成都地铁 30 号线施工背景, 首次提出了近接影响度的概念, 分析了不同近接度工况下新建隧道对既有隧道的变形影响, 结合有限元分析和回归分析法, 对近接影响度结果进行量化分析。

针对大直径盾构隧道下穿既有地铁引起的地表和既有隧道沉降问题, 以苏州东隧道下穿轨道交通 5 号线为施工背景, 通过有限元软件模拟盾构下穿过程, 评估了盾构施工过程的安全性。根据现场监测数据, 分析盾构下穿过程中地表沉降及既有隧道沉降变形规律。旨在为工程的顺利实施提供一定的理论支撑。

1 工程概况

1.1 工程简介

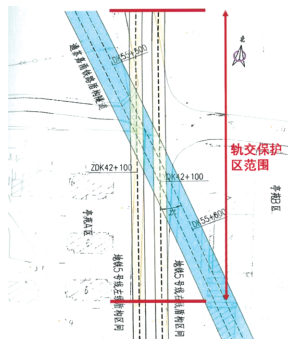
新建的苏州东隧道, 位于苏州市工业园区和吴中区, 全长 15.565 km。采用单洞双线断面, 隧道内为“W”形纵坡, 隧道最大埋深 58 m。其中盾构隧道总长 11 658.8 m, 设计 2 条盾构隧道, 分别为 1 号工作井~2 号工作井盾构区间, 长度为 5 434 m; 3 号工作井~2 号工作井盾构区间, 长度为 6 224.8 m。

既有隧道轨交 5 号线阳澄湖南站~葑亭大道站盾构区间, 右线隧道全长 1 714.015 m, 左线隧道全长 1 733.546 m。区间隧道纵断面采用“V”形坡布置, 下穿位置右线 4.1‰上坡, 左线 4‰上坡。管片衬砌结构采用内径 5 500 mm, 管片厚 350 mm, 环宽 1.2 m, 6 分块, 弯螺栓连接, 错缝拼装。线路为接触网供电。

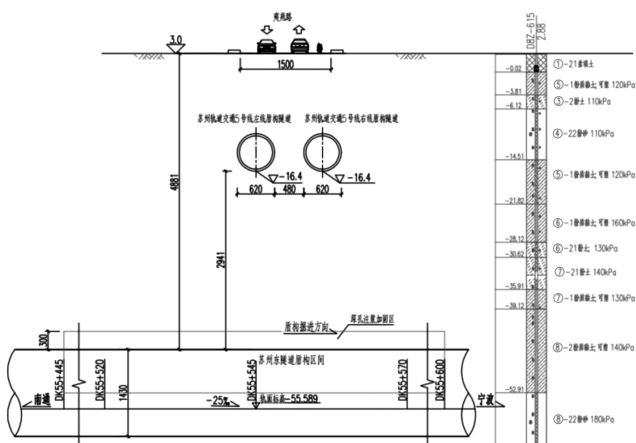
1.2 盾构隧道与 5 号线相互关系

苏州东隧道穿越轨交 5 号线影响范围总长度 70 m, 影响地段中心里程为 DK55 + 535, 隧道底标高 -16.4 m。苏州东隧道与地铁 5 号线平面交叉角度 22°, 长度为 80 m, 盾构隧道顶部与地铁 5 号线隧道底部竖向净距 29.41 m。地铁上方为夷苑路, 与铁路盾构隧道顶部竖向净距 59.2 m, 加固措施采取洞内深孔注浆。掘进过程中, 若掘进参数控制不当, 易造成既有地铁隧道沉降、变形, 影响地铁运营安全。图 1 为新建隧道与 5 号线位置关系图。

岩土力学



(a) 平面图



(b) 剖面图

图1 新建隧道与5号线位置关系图

Fig.1 Location relationship between the new tunnel and line 5

1.3 工程地质条件

盾构下穿轨交段的隧道断面内主要为⑧-2粉质黏土、⑧-22粉砂。沿线地下水类型主要为潜水、微承压水及承压水三种，其中与该隧道工程相关的含水层为潜水层、浅部③-2、④-2、⑤-11层为微承压含水层，中部⑥-2、⑦-2层为第Ⅰ层承压含水层，底部⑧-22、⑨-11为第Ⅱ层承压含水层。

2 结果与分析

2.1 三维数值模拟

2.1.1 三维数值模型

采用有限元软件建立三维数值模型。为减少边界效应对模型计算结果的影响，建立尺寸为150 m × 170 m × 100 m (长 × 宽 × 高) 的三维模型，如图2所示。隧道衬砌、盾壳使用2D板单元模型，土体使用3D实体单元。对各个单元进行网格划分，通过激活和钝化网格的方式，构建施工阶段组。综合考虑计

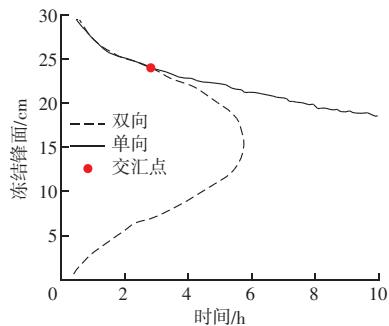


图2 三维数值模型图

Fig.2 Three dimensional numerical model diagram

算时间和计算精确度，模型采用六面体混合格网，共计划分网格158 375个。

模型边界条件：模型四周约束法向位移，模型上边界为自由边界，模型底部约束法向和径向位移。

模型中土层采用修正的摩尔-库仑模型描述其应力-应变关系。土层的模型参数见表1。盾构隧道结构本构模型为理想弹性模型，参数见表2。

表1 土层参数取值

Table 1 Soil layer parameter values

编号	土层	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩模量 /MPa
①-21	素填土	19.0	4.0	8.0	1.33
③-2	粉土	19.3	14.7	24.6	9.04
④-22	粉砂夹粉土	20.3	3.8	34.0	9.82
⑤-1	粉质黏土	19.4	24.4	12.7	5.38
⑥-1	粉质黏土	19.8	42.0	16.0	6.46
⑦-21	粉土	19.2	9.3	22.5	8.91
⑧-2	粉质黏土	19.5	29.1	14.5	5.65
⑧-22	粉砂	20.9	4.1	32.5	10.50
⑨-11	粉砂	20.5	4.6	32.6	11.40

表2 隧道结构参数取值

Table 2 Tunnel structure parameter values

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
C35 混凝土	31.5	0.2	2 400
C50 混凝土	34.5	0.2	2 400
C60 混凝土	36.5	0.2	2 400
钢筋	200.0	0.3	7 830

2.1.2 施工步骤

为准确模拟盾构隧道施工过程，模型中共设置了4个施工步，见表3。

2.1.3 结果分析

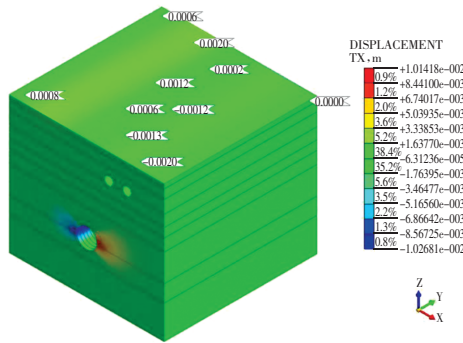
图3和图4分别为隧道掘进完成后整体模型变形云图和既有隧道衬砌变形云图。隧道掘进完成后，地表最大X向变形为0.213 mm，最大Y向变形为0.090 mm，最大Z向变形为-4.472 mm。

表3 施工工序及内容

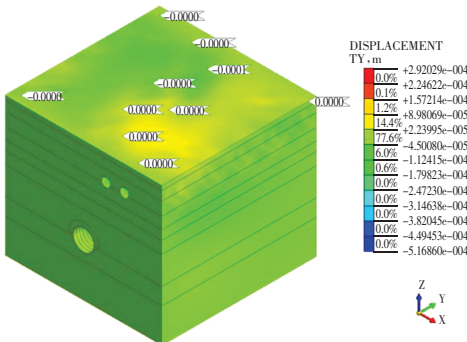
Table 3 Construction steps and content

步骤	模拟内容
1	地应力平衡, 位移清零
2	开挖轨交5号线隧道并施作隧道衬砌
3	位移清零
4	分步施工苏州东隧道(按照两环为一组分析步工况, 工序包括: 施加掌子面压力、开挖土体、生成盾壳、拼装管片、同步注浆。共42个分析步)

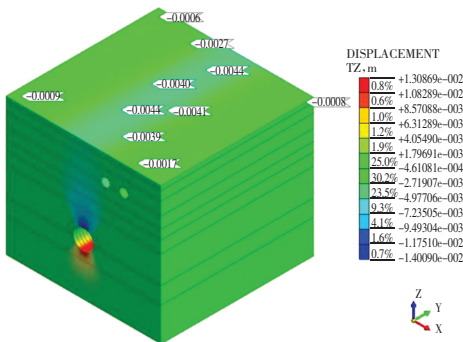
既有隧道衬砌最大X向变形为0.924 mm, 最大Y向变形为0.170 mm, 最大Z向变形为-5.150 mm; 且既有隧道的曲率半径为 1.46×10^9 mm。



(a) X方向



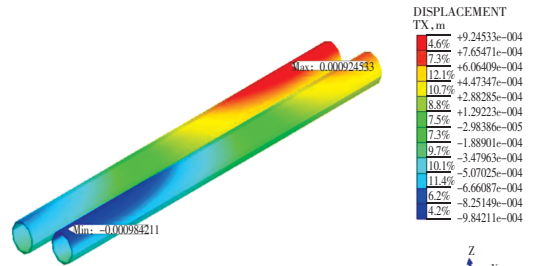
(b) Y方向



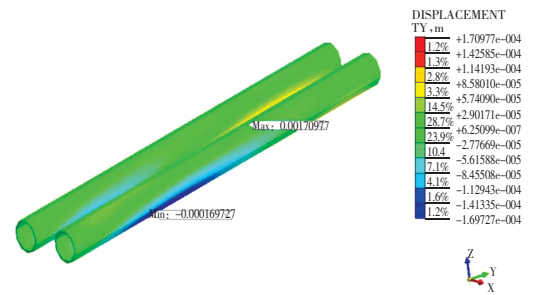
(c) Z方向

图3 整体模型变形云图

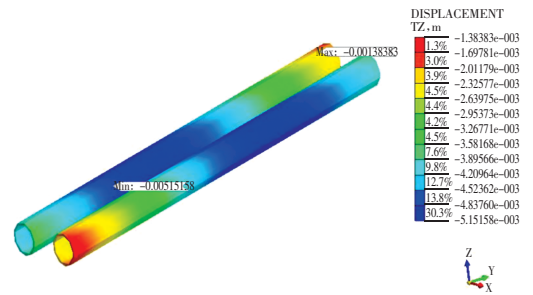
Fig. 3 Overall model deformation cloud map



(a) X方向



(b) Y方向



(c) Z方向

图4 既有隧道变形云图

Fig. 4 Deformation cloud map of existing tunnel

苏州东隧道施工后对地层有一定程度影响, 但影响程度有限, 轨交5号线衬砌变形(≤ 10 mm)、曲率半径($\geq 1.5 \times 10^7$ mm)均满足标准控制值。

2.2 实测分析

从图5中可以看出, 由于对数值模型做了相关假设和简化, 地表沉降和既有隧道沉降的模拟值和实测值存在一定的差别, 但两种结果的总体趋势接近, 说明文中所建模型对实际工程的匹配度较好。

进一步观察可知, 隧道掘进过程中既有隧道沉降和地表沉降的变化趋势基本一致, 隧道掘进完成后, 既有隧道累计竖向位移约为6.403 mm, 地表累计沉降为5.298 mm, 均在设计要求范围内。根据隧道掘进位置和变形曲线规律, 总体可以分为5个阶段: 盾构到达前、到达时、通过时、通过后及后期固结稳定。

岩土力学

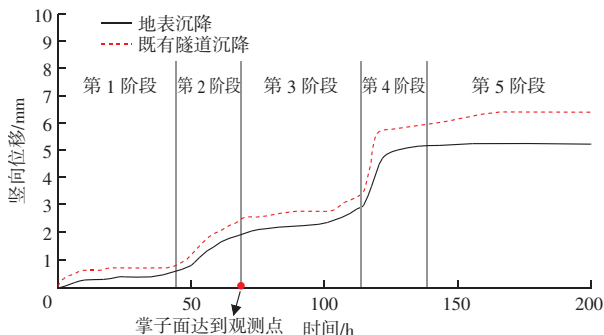


图5 既有隧道变形和地表沉降变化曲线

Fig. 5 Deformation and surface settlement curves of existing tunnels

(1) 初始沉降 (第一阶段): 指自开挖面距观测点还有相当距离 (数十米) 起, 直至开挖面到达观测点前所产生的沉降。该阶段地表沉降和既有隧道沉降累计值分别为 0.564 mm 和 0.802 mm, 分别占总累计值的 10.6% 和 12.5%。该阶段的地表沉降和既有隧道沉降是由于掌子面的水土压力扩散扰动引起周边地下水发生变化, 引发开挖断面之前较长的距离 (40 m 左右) 范围内出现不同程度的沉降变化。

(2) 开挖沉降或隆起 (第二阶段): 自开挖面距观测点极近时起, 直至开挖面位于观测点正下方之间所产生的沉降或隆起。该阶段地表沉降和既有隧道沉降累计值分别为 1.376 mm 和 1.685 mm, 分别占总累计值的 26.0% 和 26.4%。该阶段的地表沉降和既有隧道沉降多由于刀盘切削掌子面、泥水压波动、超欠挖、盾构机纠偏、盾构机周围摩擦力等作用扰动土体, 土体的应力释放而产生的地基塑性变形, 引起周围地层沉降变化。

(3) 通过时沉降或隆起 (第三阶段): 指从开挖面到达观测点的正下方之后直到盾构机尾部通过观测点为止所产生的沉降。该阶段地表沉降和既有隧道沉降累计值分别为 0.971 mm 和 0.928 mm, 分别占总累计值的 18.3% 和 14.5%。该阶段的地表沉降和既有隧道沉降主要是由于刀盘直径到盾尾直径的锥度所遗留的空间导致地层与盾体间存在间隙, 造成地层收敛, 引起土层松动。

(4) 通过后沉降 (第四阶段): 指盾构机的尾部通过观测点的正下方之后所产生的沉降。该阶段地表沉降和既有隧道沉降累计值分别为 2.258 mm 和 0.928 mm, 分别占总累计值的 42.6% 和 40.0%。该阶段的地表沉降和既有隧道沉降主要是由于开挖直

径和管片外径之差所造成的空隙, 盾尾脱离时会瞬间出现土体无支撑的状态引起松散地层范围扩大, 土体应力释放所引起的弹塑性变形。

(5) 后续沉降 (第五阶段): 指固结和蠕变残余变形沉降。该阶段地表沉降和既有隧道沉降累计值分别为 0.129 mm 和 0.431 mm, 分别占总累计值的 2.5% 和 6.6%。该阶段的地表沉降和既有隧道沉降主要是由于地层反应延迟、泥水压力和注浆压力逐步消散、被扰动的软弱土层缓慢固结, 归于稳定密实的收敛。

3 盾构下穿既有隧道的变形控制建议

针对不同阶段引起地表沉降的原因, 可采取相应的控制措施:

(1) 初始沉降 (第一阶段): 配置高质量泥浆, 使其在砂层中能形成较好的渗透带和泥膜, 精准控制切口压力, 取静止土压力计算上限值。

(2) 开挖沉降或隆起 (第二阶段): 精准控制切口压力波动, 盾构机纠偏趋势要平缓, 适当降低刀盘转速, 减少地层扰动。

(3) 通过时沉降或隆起 (第三阶段): 在盾体中部注入永不固结但可承压的“克泥效”材料, 同步填充盾体锥度造成的空隙。

(4) 通过后沉降 (第四阶段): 严格控制同步注浆及时性, 同步注浆量填充率不低于 130%, 注浆材料采用初凝时间更短的双液浆。

(5) 后续沉降 (第五阶段): 管片脱出盾尾 5 环后及时实施洞内径向深孔注浆加固, 以稳定地层。

4 结论

依托苏州东隧道下穿轨道交通 5 号线工程背景, 结合有限元模型和现场实测, 分析了盾构隧道掘进对周边环境的影响, 得到以下主要结论:

(1) 盾构隧道掘进主要引起既有隧道和地表的竖向变形。掘进完成后, 地表沉降最大值为 4.472 mm, 既有隧道竖向位移最大值为 5.150 mm, 既有隧道的曲率半径为 1.46×10^9 mm, 均满足工程要求限值。

(2) 隧道掘进过程中, 既有隧道轨道竖向位移和地表沉降的变化规律基本一致, 大致可以分为盾构到达前、到达时、通过时、通过后及后期固结稳

定这5个阶段。其中,通过后沉降(第四阶段)最大,开挖沉降(第二阶段)次之。

(3)针对不同阶段的变形原因,可以采取配置高质量泥浆、控制掘进姿态、盾构外侧空隙注入“克泥效”材料等变形控制措施。

参考文献

- [1] 刘成虎. 岩溶地区地铁盾构下穿高铁框架涵关键技术研究 [J]. 交通世界, 2023 (21): 158-160.
- [2] 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.
- [3] 魏纲, 蔡浩然, 齐永洁, 等. 盾构下穿引起围压改变对既有盾构隧道的影响研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45 (4): 708.
- [4] 杨超, 刘远明, 刘凯, 等. 贵阳地铁盾构隧道下穿高速铁路沉降规律 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (5): 2100-2110.
- [5] 欧阳鸿志, 朱定桂, 安斌, 等. 富水砂层盾构隧道下穿独立浅基础铁路桥加固方案比选研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (5): 246-253.
- [6] 王继峰, 刺宝成, 孟祥丰, 等. 盾构隧道下穿铁路框架桥施工变形规律及控制措施 [J]. 公路, 2022, 67 (3): 373-377.
- [7] 张亚洲, 林志宇, 马凝宇, 等. 砂卵石地层盾构隧道下穿施工对既有铁路框架桥的影响 [J]. 四川建筑, 2021, 41 (6): 101-104.
- [8] 许有俊, 孟贞, 李志成, 等. 盾构隧道近距下穿既有地铁车站沉降控制措施研究 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49 (6): 1044-1050.
- [9] 姚晓明, 舒波, 李波. 新建盾构隧道近距离下穿既有地铁线的安全控制技术 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (5): 243-250.
- [10] 江华, 张晋勋, 江玉生, 等. 新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征研究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53 (1): 159-164, 172.
- [11] 房倩, 杜建明, 李建业, 等. 大直径盾构隧道紧邻下穿既有地铁施工诱发地层沉降特征分析(英文) [J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (3): 882-897.
- [12] 施成华, 郑晓悦, 王祖贤, 等. 考虑地层变异性的新建隧道下穿引起既有盾构隧道纵向变形的随机分析方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55 (2): 500-512.
- [13] 范文昊, 谢盛昊, 周飞聪, 等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区及控制措施案例研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (4): 43-57.
- [14] 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.
- [15] 崔光耀, 麻建飞, 宁茂权, 等. 超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工加固方案对比分析 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (增刊2): 414-424.

(上接第34页)

- [8] ZHANG S, GHOULEH Z, SHAO Y. Effect of carbonation curing on efflorescence formation in concrete paver blocks [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (6): 04020127.
- [9] 曹天骥. 水泥基外墙系统泛碱预测模型与抑制方法 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 李朗, 张玉玮, 高育慧, 等. 新型泛碱抑制剂的制备及应用 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52 (1): 97-101.
- [11] VOSS K, 刘畅, 杜建东. 混凝土路面砖的变色现象 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2010 (6): 18-22.
- [12] ORDÓÑEZ S, LA IGLESIA Á, LOUIS M, et al. Mineralogical evolution of salt over nine years, after removal of efflorescence and saline crusts from Elche's Old Bridge (Spain) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 343-354.
- [13] 王培铭, 寿梦婕. 高温条件下不同养护湿度对聚合物改性水泥砂浆拉伸粘结强度的影响 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (1): 54-58.
- [14] 路林海, 周立民, 刘家海, 等. 轨道交通高架桥墩冬季施工混凝土泛碱机理分析 [J]. 中外公路, 2019, 39 (6): 73-76.

(上接第40页)

- [10] 王宇杰, 杜红秀. 流态固化土的电化学特性及其施工与力学性能 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (6): 2535-2541.
- [11] 梁仕华, 陈俊涛, 林焕生, 等. 水泥固化淤泥废弃土作为填土材料的试验研究 [J]. 广东工业大学学报, 2020, 37 (2): 102-106.
- [12] 张会丽, 霍光. 改性流态固化土抗压性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 89-93, 112.
- [13] 侯运炳, 丁鹏初, 韩冬, 等. 冻融循环对全尾砂固结体强度与微观结构的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2019, 39 (8): 68-73.
- [14] 胡贵泉. 冻融作用下赤泥—水泥复合土疲劳特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [15] 丁智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (11): 2328-2336.