

DOI: 10.7672/sgjs2026070104

# 杂填土环境隧道下穿既有建筑沉降控制研究\*

卢悦琪

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 针对杂填土环境下隧道施工易引发结构沉降、开裂的安全问题,以某隧道下穿既有建筑为工程背景,研究施工扰动下建筑结构的动态响应与沉降控制效果。通过 MIDAS GTS NX 建立三维有限元模型,发现隧道开挖引起的地表与拱顶沉降呈现出“缓慢增长-急剧发展-逐渐稳定”的时空演化特征,并分析了拱顶沉降大于地表沉降的规律。结合现场监测和数值模拟结果,明确了通过超前小导管注浆加固、短进尺开挖、强支护等关键技术,能有效将拱顶沉降控制在 7.4mm 以内,确保了施工安全与建筑稳定。研究成果揭示了隧道下穿施工引起地层与建筑结构的变形规律,验证了综合控制措施的有效性。

[关键词] 隧道;既有建筑;加固;沉降;数值模拟;监测

[中图分类号] U455.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0104-06

## Research on Settlement Control for Tunnels Undercrossing Existing Buildings in Miscellaneous Fill Environments

LU Yueqi

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

**Abstract:** In view of the safety problems of structural settlement and cracking caused by tunnel construction in miscellaneous fill environments, the dynamic response and settlement control effect of building structures under construction disturbance are studied by taking a tunnel that underpasses existing buildings as the engineering background. A three-dimensional finite element model was established by MIDAS GTS NX. It is found that the surface and vault settlement caused by tunnel excavation show the spatial and temporal evolution characteristics of slow growth-rapid development-gradual stabilization, and the law that the vault settlement is greater than the surface settlement is analyzed. Combined with on-site monitoring and numerical simulation results, it is clear that the key technologies, such as advanced small pipe grouting reinforcement, short footage excavation, and strong support, can effectively control the vault settlement within 7.4mm, ensuring construction safety and building stability. The research results reveal the deformation law of strata and building structure caused by tunnel construction and verify the effectiveness of comprehensive control measures.

**Keywords:** tunnels; existing buildings; reinforcement; settlement; simulation; monitoring

### 0 引言

随着城市地下空间开发向纵深发展,地铁隧道下穿既有建筑的情况不断增加。隧道开挖会扰动周围土体并破坏原有应力场,引起地表变形,同时对上部建筑的安全和功能也会构成潜在威胁<sup>[1-5]</sup>。对于城市核心区的商业建筑、老旧结构等敏感性建筑,隧道施工影响显著增大,准确了解施工引起的

沉降及其传播规律,是保障城市建设安全的关键。

暗挖法施工具有开挖面暴露时间长、卸荷效应强、施工工序对地层敏感等特征。围岩软化和支护滞后往往会使得拱顶下沉、拱腰水平收敛及地表沉降。此外施工过程频繁反复,易出现沉降速率阶段性突变。因此,拱顶沉降与地表沉降的时空演化特征是暗挖施工影响分析的核心内容。近年来,众多学者对暗挖隧道施工影响开展了大量研究。白铭海等<sup>[6]</sup>通过建立竖井横通道暗挖隧道的模型对其施工过程分析,结果表明预加固技术可对地表沉

\* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 卢悦琪,工程师,E-mail:295313080@qq.com

[收稿日期] 2025-11-19

降量实现有效控制。奚魏征等<sup>[7]</sup>则聚焦超小净距隧道采用浅埋暗挖法下穿高速公路,重点探讨了该类施工的关键技术与风险防控要点。对于邻近建筑物受暗挖工程影响,漆震云等<sup>[8]</sup>通过数值模拟研究了建筑物基础在多源扰动下的力学特性。谢雄耀等<sup>[9]</sup>对于隧道下穿老旧建筑物的变形提出有效的控制措施。

然而,现有成果多基于相对理想地质条件,对建筑垃圾杂填土这种结构松散的特殊地层关注不足,该环境下隧道施工对结构变形的影响机理仍需进一步明确。依托西安地铁8号环线环园中路停车场出入场线暗挖段隧道工程,结合数值模拟与现场监测,系统分析隧道施工对既有建筑的影响,对保障城市敏感环境下隧道工程安全建设具有重要意义。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

西安地铁8号环线环园中路停车场出入场线右线起于堡子村车站,沿沪灞一路向东敷设,于北辰大道路口转向北并行敷设,接入环园中路停车场,如图1所示。暗挖区间隧道总长度为394.187m,轨顶埋深范围为12.4~16.3m,平面曲线半径设计为280m,纵坡设置为-12.635‰。隧道采用矿山法(浅埋暗挖法)施工,开挖断面为马蹄形,净宽5.98m、净高6.67m。初期支护采用“超前小导管+钢筋格栅+喷射混凝土”体系,其中2.5m长 $\phi 42$ mm超前小导管、环向间距0.3m,C25早强喷射混凝土设计厚度20cm,二衬采用C35模筑混凝土,厚度30cm。

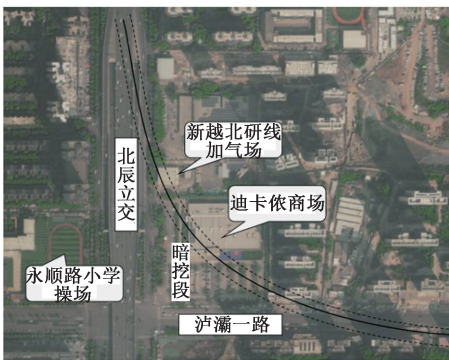


图1 施工线路平面

Fig. 1 Plan of the construction alignment

线路下穿商业建筑及新建北沿线加气站,隧道位于商场及北辰大道主干道正下方,周边环境复杂,施工扰动敏感。商场仅1层,建筑高度约8m,柱下为独立基础,其下设2m厚换填层。

## 1.2 工程地质条件

工程场区位于西安市渭河冲积平原二级阶地,地形总体平坦,场区地面高程386.500~388.200m,地表以城市硬化路面及商场硬化地面为主。隧道沿线在平面上穿过商场及相邻道路,施工区段周边建筑及市政设施较为密集。隧道下穿商场时,拱顶埋深9m,拱顶与建筑基础的垂直净距6.3m,上覆土层以杂填土为主。地下水埋深较深,稳定水位约为20.400~27.800m,低于隧道拱底标高,隧道施工影响较小。根据勘察资料,场区钻探深度范围内资料显示,沿线地层主要由第四系全新统人工填土覆盖,下伏第四系冲洪积层及其盘积/粉土、黏土与砂类土组成。

## 2 施工关键技术

### 2.1 超前小导管加固技术

为防止掌子面坍塌及开挖扰动引起的围岩失稳,施工前在掌子面上方 $120^\circ$ 范围内布设 $\phi 42$ mm、长3.0m的单排超前小导管。导管端部设计为加工成型的锥形密封结构,确保施工过程中密封性达标。从端部起2.1m范围内,沿导管周壁梅花形布设直径8mm的泄浆孔。导管尾部采用 $\phi 6$ 钢筋设置刚性加强箍,一方面可避免导管在打入作业中因冲击荷载发生破损,另一方面为注浆工序的密封操作提供结构保障,确保支护注浆施工的稳定性和有效性。采用0.5~1.0MPa压力注入水泥浆加固前方土体,超前小导管注浆预加固围岩如图2所示。该措施有效改善了粉质黏土层的自稳性,提前形成加固拱,有助于削减拱顶沉降和掌子面变形。该技术是暗挖隧道中防止坍塌的首要控制手段,对施工安全与结构稳定性具有决定性意义。

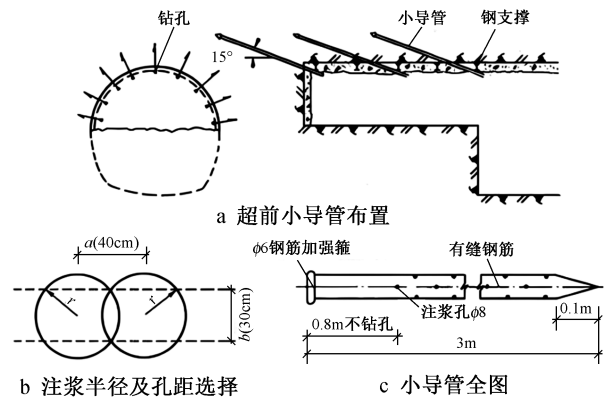


图2 超前小导管注浆预加固围岩

Fig. 2 Pre-reinforcement of surrounding rock with advance small pipe grouting

### 2.2 地层注浆加固技术

结合地层为杂填土、新黄土及古土壤等软弱地

基,采用“洞内高压注浆+分层止浆墙控制”的方式,在开挖轮廓线外3~5m范围内形成加固体。浆液扩散半径控制在1.0~1.5m,注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆,配合比1:1。通过钻孔检测与取芯试验验证,加固体无侧限抗压强度不小于0.3MPa。此外,现场杂填土开挖可以发现地层成分杂乱,空隙较大。经过注浆后,杂填土能够填充密集,掌子面稳定,浆液扩散明显。该技术提高了地层的整体性和抗剪强度,是控制沉降和防止渗漏的关键前置工艺。

### 2.3 “短进尺、强支护、快封闭”施工原则

在弱地层中采用“短进尺、强支护、快封闭”原则。在掌子面未开挖前,沿隧道拱部120°范围用风钻顶进 $\phi 42\text{mm}$ 、 $L=3\text{m}$ (2.5m)的单排超前小导管,在完成清孔后注浆,加固掌子面前土体。每循环开挖进尺控制在0.5m或0.75m,缩短开挖和支护的间隔时间。施工过程严格依据相关设计文件及现行施工规范要求,采用钢筋格栅拱架、钢筋网、锁脚锚管、超前小导管与喷射混凝土协同构成的联合支护体系,及时开展初期支护施工。该支护体系能有效约束围岩塑性变形发展,控制塑性区范围扩大,保障施工过程中围岩稳定性。由于隧道围岩呈软塑~硬塑状态,开挖卸荷后若未及时封闭,易导致开挖面失稳坍塌。因此需立即喷射3cm厚混凝土对开挖面进行封闭处理,同时缩短分部开挖的循环周期,快速安设钢筋格栅拱架并喷射混凝土形成封闭支护环。由此,可以显著优化支护结构与围岩的协同受力状态,避免初期支护产生过大变形或隧道底部隆起,进而降低严重坍塌事故的发生概率。

## 3 暗挖隧道数值模拟

### 3.1 计算模型

为精确模拟隧道施工对既有建筑的影响,采用MIDAS GTS NX建立了建筑-土体-隧道的三维有限元模型。模型尺寸为60m $\times$ 40m $\times$ 30m,模型底部采用固定约束,四周施加位移约束,顶部为自由表面。为监测拱顶在不同施工阶段的沉降变化规律,沿车站拱顶布置了13个监测点(DG1~DG13),监测点布置如图3所示。

岩土体采用实体单元模拟,本构模型选用莫尔-库伦模型,以反映土体的弹塑性特性。基于工程地质勘察报告,将地层划分为杂填土与冲洪积层2个主要土层单元。隧道初期支护采用板单元析取模拟,本构模型为线弹性模型。超前小导管采用植入式桁架单元模拟,等效考虑其加固作用,初期支护和超前小导管如图4所示。建筑物采用C35混凝土

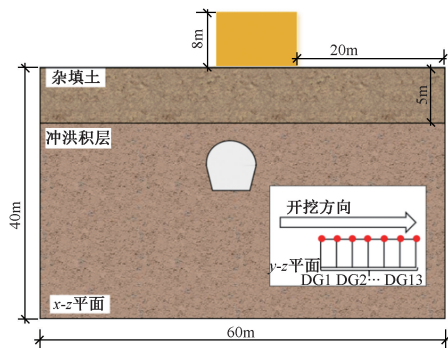


图3 模型及拱顶监测点布置

Fig. 3 Model and arrangement of vault monitoring points

的实体单元进行模拟。假设区段周围各岩土层为水平层状分布、各向同性的均匀连续介质,岩土体及支护结构的物理力学参数如表1所示。初始地应力仅考虑自重应力场作用,计算中忽略地下水的影响。

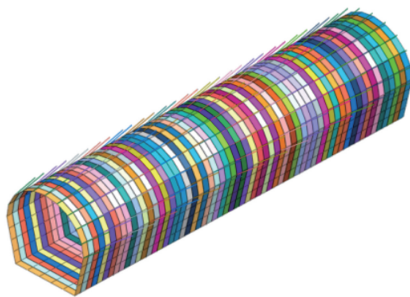


图4 初期支护和超前小导管

Fig. 4 Primary support and advanced small pipes

表1 材料力学参数

Table 1 Mechanical properties of materials

名称	弹性模量 $E/\text{MPa}$	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
杂填土	8	18.0	0.30	10	20
冲洪积层	30	20.0	0.28	25	32
初期支护	30 000	24.0	0.20	—	—
建筑物	31 500	24.0	0.20	—	—
超前小导管	210 000	78.5	0.30	—	—

### 3.2 开挖全过程模拟

为精确再现隧道动态掘进过程,本研究采用MIDAS GTS NX中的“生死单元”技术,定义了共计61个有序的分析步,以模拟从初始状态至隧道贯通的全施工流程。模拟过程始于初始地应力场的平衡,并将建筑物结构作为既有条件激活,同时将初始位移归零,以此为所有后续施工分析提供基准。施工步序1首先激活相应区域的超前小导管单元并赋予其材料属性,模拟其对前方土体的预加固效应。自施工步序2起,模型进入隧道开挖与支护的阶段,其次“杀死”相应区域的土体单元以模拟开挖

卸荷;随即,立即激活该段的初期支护单元,从而在数值上实现“快封闭”的施工原则。从步序 2 至步序 62,隧道完成了共计 30m 的全长开挖和支护。通过上述设定,施工步序便成为了隧道开挖进尺的直接标尺,施工开挖模拟如图 5 所示,施工步序 21 对应隧道开挖至 10m 的工况,而施工步序 41 则对应开挖至 20m 的工况。

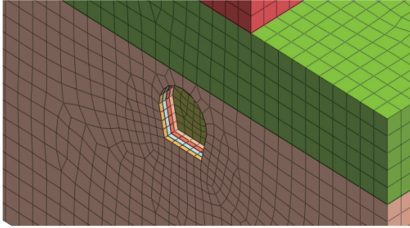


图 5 施工开挖模拟

Fig. 5 Simulation of excavation process

## 4 数值计算结果分析

### 4.1 地面沉降变形分析

为分析矿山法施工过程中地表沉降的时程特征,在建筑物后方沿隧道纵向布置了 8 个地表监测点(JK1~JK8),监测点布置如图 6 所示。

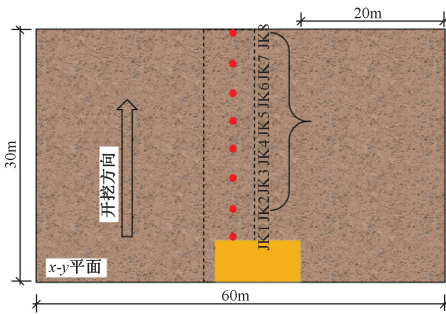


图 6 地表监测点布置

Fig. 6 Layout of ground surface monitoring points

整体来看,所有监测点的沉降曲线均呈现出“缓慢沉降-快速发展-趋于稳定”的规律,如图 7 所示。隧道施工初始阶段受开挖扰动范围较小,地表沉降变化不明显。随着开挖面推进至监测点正下方,沉降速率显著增大,曲线斜率加大,表明该阶段地层应力重分布及围岩松弛效应最为明显。当施工步序约为 57 时,即施工到 28m 时,各监测点沉降值达到最大,沉降范围为 1.75~3.25mm。随后,随着初期支护的完成及结构受力体系逐步形成,地层变形趋于稳定,沉降曲线逐渐平缓。

进一步分析开挖结束的不同监测点之间的沉降量,发现存在一定差异,如图 8 所示。其中 JK8 的沉降量最大,其余监测点沉降值随开挖距离增加,沉降增加速率逐渐降低。既有的对超浅埋暗挖隧

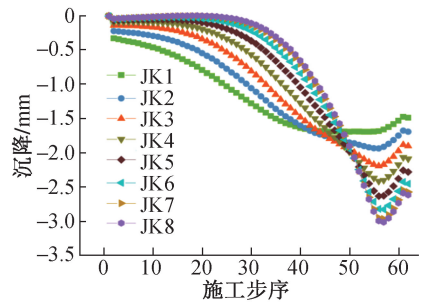


图 7 建筑物后方地表沉降曲线

Fig. 7 Ground surface settlement curve behind the building

道现场监测数据显示开挖距离到 30m 时地表沉降逐渐趋于稳定<sup>[10]</sup>。这表明随着开挖距离的增加,地层扰动逐渐降低,地表沉降趋于稳定,且地表沉降值整体数值低于 DBJ61—98—2015《西安城市轨道交通工程监测技术规范》监测控制值,表明项目采用的关键施工技术有效控制了地表沉降。

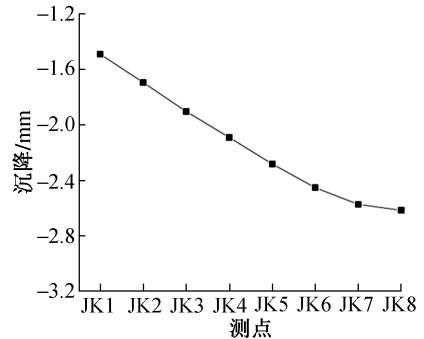


图 8 建筑物后方监测点沉降

Fig. 8 Settlement at monitoring points behind the building

### 4.2 拱顶沉降变形分析

为研究矿山法施工过程中隧道结构的竖向变形特征,沿暗挖隧道拱顶布置了 13 个监测点(DG1~DG13),以监测拱顶在不同施工阶段的沉降变化规律。各拱顶测点随施工步序变化的沉降曲线如图 9 所示。总体来看,各监测点沉降曲线的演化过程与地表沉降规律基本一致,均表现为随施工推进逐步增加并在后期趋于稳定。从各测点的对比结果看, DG13 沉降量较大,最大沉降为 7.75mm,说明测点位于开挖影响最强的区域;施工初期,因围岩支护体系尚未形成,拱顶上方应力重分布显著,沉降增速较快。随着开挖完成及初期支护的逐步施作,体系整体刚度提高,拱顶变形趋缓,整体进入稳定阶段。当工程继续向前推进,在距离初始开挖段一定距离外进行新的开挖作业时,新的区域会发生应力释放和卸荷,早期开挖段在后续施工中轻微抬升。不同测点曲线形态总体一致,说明隧道拱顶整体受力协调,结构响应连续性较好。

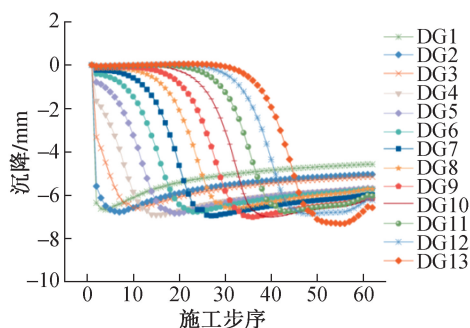


图 9 拱顶沉降曲线

Fig. 9 Vault settlement curve

随着开挖距离增加,拱顶各监测点沉降整体数值逐渐增加<sup>[11]</sup>,如图 10 所示。此外,拱顶沉降整体大于地表沉降,这一现象侧面说明了所采用的“超前支护+注浆加固+短进尺开挖”综合控制措施,通过提高土体强度、及时提供支护力,有效地将地层损失降至极低水平。

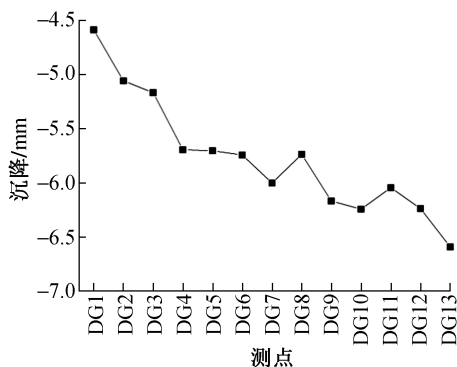


图 10 拱顶监测点沉降

Fig. 10 Settlement of vault monitoring points

## 5 基于现场监测数据的反分析

为进一步了解施工控制措施效果,开展了基于现场监测数据的反分析。根据现场监测方案,暗挖区间正线隧道内沿线路方向每 10m 左右布设 1 个监测断面。借助水准仪与钢尺开展拱顶位移监测,通过整合读数差系列数据,分析支护体系及土体的变形态势。隧道拱顶下沉的监测控制指标明确:最大允许沉降量为 11.25mm,平均允许最大变形速率与最大允许变形速率均为 3mm/d。

各监测点(GDY1~GDY3)的实测拱顶沉降数据如图 11 所示。由图 11 可见,拱顶沉降总体随施工推进逐步增加,最大沉降约为 7.4mm,均在控制标准范围内。与数值模拟结果对比可知,实测拱顶沉降的变化趋势与模拟结果随时间变化规律总体一致,均表现为初期沉降较缓、当开挖面临近时快速增大、后期轻微上升的特征。模拟结果最大值接近 8mm,略大于实测值,差异主要来源于地层非均质性

及施工扰动的不确定性,但总体偏差控制在工程允许范围内。这表明模型能较准确反映隧道施工过程中拱顶的变形特征。研究结果表明,该模型可用于进一步分析开挖引起的拱顶变形规律及施工阶段受力演化特征,为类似工程提供参考。

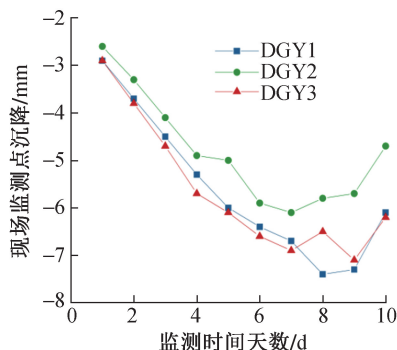


图 11 现场实测拱顶沉降变化曲线

Fig. 11 Field-measured vault settlement variation curve

## 6 结语

在建筑垃圾杂填土地层环境下,西安地铁 8 号环线环园中路停车场出入场线暗挖段隧道工程成功完成,解决了复杂环境下隧道下穿安全控制问题。建立了考虑既有建筑的三维精细化有限元模型,对隧道施工全过程进行了模拟,得出以下主要结论。

1) 地层主动加固与预支护技术是控制沉降的根本保证。在隧道上部位于杂填土等软弱地层时,采用合理参数进行注浆加固,能有效改良土体力学参数。

2) 通过数值模拟,发现隧道拱顶沉降和地表沉降时程曲线呈现出“缓慢增长-急剧发展-逐渐稳定”三阶段特征。并通过工程监测数据,进一步验证数值模拟的正确性。

3) 结合地层与断面设计所确定的“超前小导管注浆”和“短进尺、强支护、快封闭”等综合技术,本质上是主动加固土体、限制开挖卸荷量和及时提供支护力的结果,实现了对地表和拱顶沉降变形的有效控制。

### 参考文献:

- [1] 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.  
BAI P C. Settlement control techniques of the super-shallow buried large-span mined tunnel underneath an existing tunnel [J]. Modern tunnelling technology, 2020, 57(3): 175-181.
- [2] 龙际权. 盾构施工下穿建筑物时诱发沉降数值分析及预测[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(7): 19-24.  
LONG J Q. Numerical analysis and prediction of settlement induced during shield construction underneath buildings [J]. Construction technology, 2025, 54(7): 19-24.
- [3] 段宝福, 宋立坤, 周鑫明, 等. 浅埋暗挖地铁隧道地表沉降研

- 究现状[J]. 现代隧道技术,2017,54(4):25-32.
- DUAN B F, SONG L K, ZHOU X M, et al. On research status of surface settlement of a bored subway tunnel with a shallow overburden[J]. Modern tunnelling technology, 2017, 54(4): 25-32.
- [4] 吴康,申玉生,易鹏豪,等. 软土地层浅埋暗挖矩形大断面隧道施工力学响应特征[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(10): 45-50.
- WU K, SHEN Y S, YI P H, et al. Mechanical response characteristics of shallow-buried concealed rectangular large-section tunnel in soft soil stratum[J]. Urban mass transit, 2024, 27(10):45-50.
- [5] 范未鹏. 软岩隧道开挖围岩变形与受力特征研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):123-127.
- FAN W P. Study on deformation and stress characteristic of surrounding rock in soft rock tunnel excavation[J]. Construction technology, 2025, 54(9): 123-127.
- [6] 白铭海,吉小明. 地铁小竖井转横通道施工大跨隧道数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(2):469-476.
- BAI M H, JI X M. Numerical simulation analysis of large-span tunnel construction through cross aisle from subway small shaft[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(2):469-476.
- [7] 奚魏征,刘云雨,王万平. 超小净距隧道浅埋暗挖法下穿高速公路关键技术[J]. 公路,2025,70(1):300-304.
- XI W Z, LIU Y Y, WANG W P. Key technology of ultra-small clear distance tunnel under expressway by shallow excavation method[J]. Highway, 2025, 70(1):300-304.
- [8] 漆震云,霍育达,姚爱军,等. 多源干扰条件下暗挖工程穿越建筑物变形特征与控制研究[J]. 市政技术,2025,43(1): 176-182.
- QI Z Y, HUO Y D, YAO A J, et al. Research on the deformation characteristics and control of underground excavation project through buildings under multi-source interference conditions[J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(1): 176-182.
- [9] 谢雄耀,张永来,周彪,等. 盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(10): 1781-1789.
- XIE X Y, ZHANG Y L, ZHOU B, et al. Micro-settling control technology for shield tunnels crossing old buildings[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41(10): 1781-1789.
- [10] 唐志强. 超浅埋地铁隧道复合地层暗挖关键技术[J]. 铁道工程学报,2025,42(6):87-91,103.
- TANG Z Q. The key technology of mining method on composite strata of ultra-shallow subway tunnel[J]. Journal of railway engineering society, 2025, 42(6):87-91, 103.
- [11] 杨彬. 广阳湾站超大断面暗挖车站施工稳定性数值模拟研究[J]. 科技创新与应用,2025,15(30):59-63.
- YANG B. Numerical simulation study on construction stability of super-large cross-section underground excavation station in Guangyangwan station[J]. Technology innovation and application, 2025, 15(30):59-63.

## (上接第103页)

- [10] 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 L, HUANG H W, WANG R L. 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.
- [11] 麻歆,王军华,谢家冲,等. 上软下硬地层盾构上穿既有地铁双线隧道的工程实例分析[J]. 建筑结构,2022,52(S1): 2849-2854.
- MA X, WANG J H, XIE J C, et al. Case study of a shield tunneling project over-crossing two existing metro tunnels in the upper-soft and lower-hard stratum[J]. Building structure, 2022, 52(S1):2849-2854.
- [12] 沈丹祎,陈赞,罗敏敏,等. 宁波浅层软土小应变硬化土模型参数试验研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(S1):114-118.
- SHEN D Y, CHEN Y, LUO M M, et al. Experimental research on parameter selection of HSS model for Ningbo shallow soft soil[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(S1): 114-118.
- [13] 王书雄,宋建正,宋彦杰,等. 富水软土地区盾构法联络通道施工环境影响分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(17): 94-100.
- WANG S X, SONG J Z, SONG Y J, et al. Analysis on influence of connecting passage construction using tunnel boring machine method in water-rich soft soil area[J]. Construction technology, 2025, 54(17):94-100.
- [14] 宫志群,王永志,廖少明,等. 地铁车站明暗挖施工引起的地表沉降叠加效应研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3): 6-13.
- GONG Z Q, WANG Y Z, LIAO S M, et al. Study on superposition effect of surface settlement caused by subway station open and subsurface excavation construction[J]. Construction technology, 2024, 53(3):6-13.
- [15] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):269-278.
- LIANG F Y, JIA Y J, DING Y J, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(2):269-278.
- [16] 丁智,吴云双,张霄,等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(3):663-671.
- DING Z, WU Y S, ZHANG X, et al. Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2018, 49(3):663-671.
- [17] 严长征. 盾构隧道近距离共同作用机理及施工技术研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- YAN C Z. Research on the mechanism and construction techniques of interaction for adjacent tunneling preformed by shield[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.