

# 地面加、卸载下地铁盾构隧道管片 变形规律及加固效果研究

徐 浩 李慎奎 吴圣贤

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津)

**摘 要** [目的] 鉴于地铁盾构隧道因地面堆载引发管片结构变形、渗漏水等多种病害, 直接影响地铁运营安全的现状, 结合武汉地铁某区段隧道地面堆载病害治理的案例, 对不同堆载、不同加固措施下地铁盾构隧道管片结构变形规律进行深入研究分析。[方法] 依托武汉地铁病害治理项目, 建立贴合工程实际的三维数值模型, 充分考虑盾构隧道管片错缝拼装、螺栓连接等因素影响, 统计整理不同条件下隧道结构在地面加、卸载作用下管片的受力变形特性, 并与案例实况进行比对, 研究分析不同情况下管片的受力特点和变形规律。[结果及结论] 研究发现, 当地面加载土柱不大于 1.3 m 时, 隧道结构整体安全; 当地面加载土柱不大于 4.0 m 时, 隧道结构顶部采取芳纶布加固更为经济合理; 当地面加载土柱大于 6.0 m 时, 隧道内部采用全钢环加固更为有效; 加固越早实施, 效果越好。在加载后再卸载中发现, 当地面加载土柱不大于 2.0 m 时, 对其卸载后管片回弹变形幅度可达 50% 以上; 早发现堆载并及时清理是地铁维保关键一环。经与工程实测对照分析, 验证了管片变形规律的真实性和加固措施的可行性、有效性。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 管片变形; 加固效果

**中图分类号** U457+.3; U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.03.033

## Study on Deformation Law and Reinforcement Effects of Metro Shield Tunnel Segments under Loading and Unloading

XU Hao, LI Shenkui, WU Shengxian

(China Railway Liu Yuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China)

**Abstract** [Objective] Ground loading over metro shield tunnels often causes structural segment deformations, water leakage, and other issues, directly affecting metro operation safety. Based on a case of ground load-induced damage treatment in a Wuhan Metro tunnel interval, the deformation law of metro shield tunnel segments under varying loading conditions and reinforcement measures are investigated. [Method] Using the Wuhan Metro damage treatment project as a basis, a three-dimensional numerical model is developed to reflect actual en-

gineering conditions. The model accounts for factors such as staggered assembly and bolt connections of shield tunnel segments. The stress and deformation characteristics of tunnel segments from ground loading and unloading octions under different conditions are analyzed and compared with case study observations. The stress features and deformation behaviors of segments in different scenarios are examined and analyzed. [Result & Conclusion] It is found that the tunnel structure remains generally safe when the ground soil column loading does not exceed 1.3 m. When the loading does not exceed 4.0 m, adopting aramid fabric reinforcement at the tunnel crown is the most economical and reasonable solution. For loading exceeding 6.0 m, full-steel ring reinforcement inside the tunnel is more effective. Earlier implementation of reinforcement measures yields better outcomes. During unloading after loading, it is observed that when the ground soil column loading does not exceed 2.0 m, the unloading can result in rebound deformations of more than 50% in the segments. Early detection and timely removal of excessive ground loading are critical to metro maintenance comparison with engineering measurements validate the accuracy of the segment deformation law, the feasibility and effectiveness of the reinforcement measures.

**Key words** metro; shield tunnel; segment deformation; reinforcement effect

地铁盾构隧道管片出现较大变形而引发裂缝、破损、渗漏水等病害时一般采用注浆、钢环内衬、顶部加芳纶布等措施加固, 国内外学者对此进行了广泛的研究<sup>[1-6]</sup>。文献[5]对管片半钢环加固后承载能力进行试验研究; 文献[6]对隧道顶部芳纶布加固采用荷载结构模型计算, 分析研究管片变形机理。

目前, 较少采用地层结构法进一步研究不同加固措施的隧道在不同地面加、卸载情况下, 管片的变形规律。因此, 本文以武汉地铁2号线某段隧道为工程背景, 选用地层结构法数值模拟盾构隧道在顶部芳纶布加固、腰部钢环加固、道床以上全钢环

加固下,分析不同加载及再卸载引起管片受力变形的规律,探究效应机理,为工程应用提供参考。

## 1 工程概况

武汉地铁 2 号线某段区间,隧道埋深 15.3 ~ 16.0 m,位于长江一级阶地,穿③<sub>3</sub>Q<sub>4</sub><sup>1+al</sup> 淤泥质粉质黏土、③<sub>4</sub>Q<sub>4</sub><sup>al</sup> 粉质黏土夹粉土粉砂层。隧道管片采用外径 6.0 m、衬砌厚 300 mm、环宽 1.5 m 的钢筋混凝土管片,缝间以弯螺栓连接,采用错缝拼装。

地铁区间上方地面堆土高达 6 ~ 7 m,沿隧道长度范围约 220 m。堆土引起隧道沉降最大值为 82.34 mm,径向收敛为 140.9 mm。隧道被压成“横鸭蛋”形,部分道床两侧区域脱开管片形成裂缝。堆载范围的隧道椭圆度大于 10‰,最大达到 25‰,均超过规范 5‰的要求。实测数据统计详见图 1。

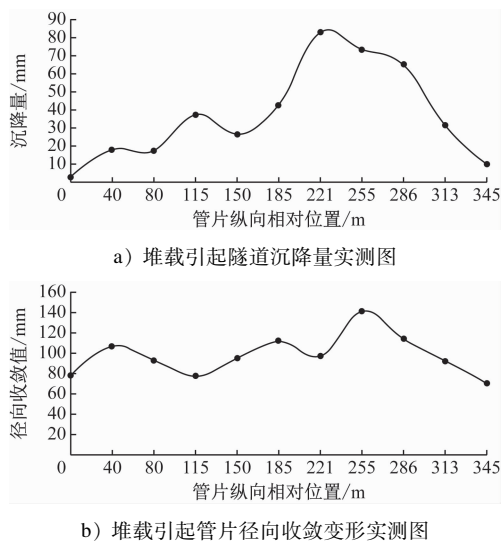


图 1 武汉地铁 2 号线某区间地面堆载范围地铁隧道实测结果

Fig. 1 Field-measured results of metro tunnels within ground loading range of an interval along Wuhan Metro Line 2

现场实测,地面堆土区域下 75% 的管片出现裂缝,裂缝分布于拱顶左右各约 1.3 m 的位置;统计裂缝共 744 条,宽度在 0.10 ~ 1.49 mm,其中宽度  $\geq 0.20$  mm 的共有 377 条;管片裂缝沿着隧道走向发展,90% 的裂缝为贯通型,管片分块多于 7 条裂缝的占比 60%;隧道顶部最大裂缝深度为 89 mm。

渗漏水集中在环缝部位,部分螺栓孔亦出现渗水现象;整个区间隧道管片第 266 环出现渗水,其中位于地面堆土区域下方约有 100 环管片渗漏水最为严重。

## 2 不同加固措施数值模拟研究

### 2.1 计算模型

依据案例工程情况,选取典型断面建立三维模型。模型整体尺寸为 130.0 m(横向)  $\times$  7.5 m(纵向)  $\times$  40.0 m(竖向),纵向模拟隧道错缝拼装 5 环管片。现实中管片环缝为平面,纵缝采用凸凹榫,利用 8.8 级 M27 型螺栓连接,导致接缝处产生很多接触面,故将螺栓强度等效为界面单元来模拟实体管片间作用。

### 2.2 计算参数

场区地层由上而下分别为①<sub>1</sub> 杂填土、③<sub>3</sub> 淤泥质粉质黏土、③<sub>4</sub> 粉质黏土夹粉土、④<sub>1</sub> 粉细砂、④<sub>2</sub> 细砂,具体参数见表 1。

表 1 土层参数取值

Tab. 1 Values of soil layer parameters

土层	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
① <sub>1</sub>	18.5	5.0	10.0	8.0	0.38
③ <sub>3</sub>	17.4	3.5	19.5	14.0	0.38
③ <sub>4</sub>	17.9	3.9	22.4	16.3	0.36
④ <sub>1</sub>	19.6	15.3	0	31.0	0.30
④ <sub>2</sub>	19.3	16.2	0	32.0	0.30

管片结构采用 C50 级混凝土,实体采用简化后的双折线线性强化弹塑性模型。管片接缝界面按照螺栓等效强度和错缝拼装刚度有效率 0.75 综合确定。加固材料为芳纶布和钢环,采用非线性本构模型。各结构材料参数见表 2。

表 2 结构材料参数

Tab. 2 Structural Material Parameters

部件名称	模拟单元类型	厚度/mm	主要性能参数
管片	实体	300	抗压强度为 32.4 MPa;弹性模量为 34 988 MPa;弹性极限为 25.3 MPa;泊松比为 0.2
接缝	界面		抗拉强度为 1 352.3 MPa;剪切强度为 122.8 MPa
芳纶布	平面应力	0.286	弹性模量为 110 GPa;抗拉强度为 2 000 MPa;极限延伸率为 1.8%
钢环	平面应力	20	弹性模量为 206 GPa;屈服强度为 225 MPa;抗拉强度为 370 MPa;泊松比为 0.3

### 2.3 计算内容及工况

计算模型通过在地面上施加土柱荷载,分析隧道沉降和管片变形;再将土柱荷载卸除,分析管片的回弹变形。在荷载施加前,通过激活加固单元来研究加固条件下隧道管片变化规律和加固效果。

模拟中考虑地质条件、隧道结构、管片接缝、外部荷载、地层超载压实及卸载回弹等多种因素共同作用下的隧道沉降和管片变形。隧道顶部覆土取15.5 m;地面加载、加载后再卸载的土柱高度分别取1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m、16 m,共11种工况,土体重度为 $19.5 \text{ kN/m}^3$ 。

### 2.4 未加固隧道变形规律研究

在不同高度土柱加载及加载后再卸载的工况下,统计分析隧道竖向位移 $\Delta_{\text{竖}}$ 和管片径向收敛 $\delta_{\text{径}}$ 数值大小和变化规律。如图2所示:随着地面堆载高度的增加,隧道沉降逐渐增大;在地面堆载高度小于3 m时,隧道沉降增加幅度较为平缓;当地面堆载高度超过4 m时,隧道沉降增量逐渐变大。如图3所示:在地面堆载高度较小时,管片径向收敛变形增加幅度较为平缓;随着地面堆载高度增加,管片径向收敛增量随之变大;地面堆载高度为6 m时,隧道最大沉降量为83.4 mm,管片收敛为126.2 mm,与地铁2号线病害区间实测数据基本一致。

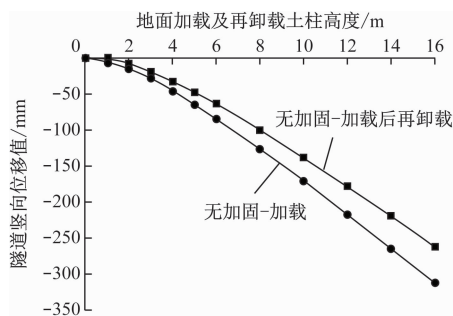


图2 加、卸载工况下无加固隧道沉降变化规律

Fig. 2 Settlement change law of tunnels without reinforcement under loading or unloading working conditions

管片径向收敛与拼装接缝位置密切相关,且管片横向收敛值大于竖向收敛值。管片结构最大应力出现在拱顶接缝外侧,腰部应力最大出现在接缝内侧,在接缝处应力集中效应明显,见图4。

加载后再卸载,管片有一定回弹,但加载引起的变形量远大于卸载产生的回弹量;回弹量随加载增加呈非线性变化。为了评价回弹量与加载关系,本文采用回弹变形占比 $\zeta$  ( $\zeta = \text{卸载回弹变形} / \text{加载总变形}$ ),统计分析结果见图5。

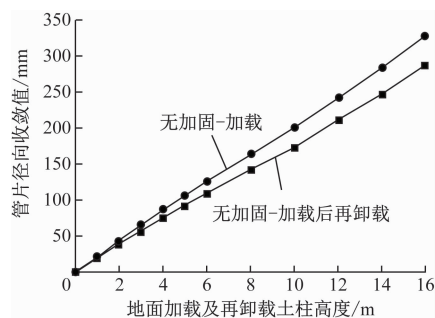


图3 加、卸载工况下无加固管片收敛变形规律

Fig. 3 Convergence deformation law of segment without reinforcement under loading or unloading conditions

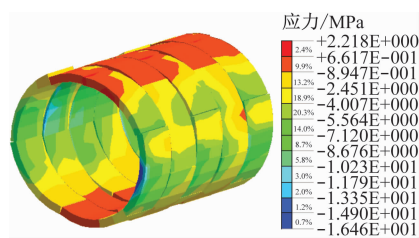


图4 管片应力分布云图

Fig. 4 Nephogram of segment stress distribution

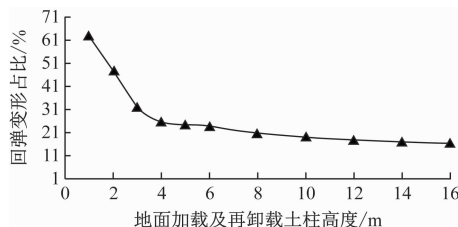


图5 管片回弹变形占比变化规律

Fig. 5 Variation law of segment rebound deformation ratio

地面加载土柱高2 m时,隧道沉降15.3 mm,卸载后沉降为7.9 mm,回弹变形占比为48.4%。土柱高为1 m、3 m、4 m、5 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m、16 m时,卸载后回弹变形占比分别为63.2%、32.3%、25.8%、24.5%、23.6%、20.8%、19.0%、18.1%、17.0%、16.2%。可见,土柱高超过4 m后回弹变形占比的变化幅度变小,因为加载作用下管片内力超过混凝土双折线本构模型的塑性转折点,同时周围土层也固结压实,导致卸载后回弹变形占比变小。

管片径向收敛不大于 $5\%D$  ( $D$ 为隧道外径),则结构安全。本文研究隧道外径6.0 m,故管片径向收敛应不大于30 mm。根据图3,按线性内插计算,地面加载土柱高为1.32 m时管片变形达到限值,相对应的隧道沉降为9.1 mm。

## 2.5 不同加固措施下隧道变形规律研究

根据地面加载引起隧道病害程度,一般用管片顶部芳纶布加固、腰部钢环加固和道床上部全钢环加固等方法。本文针对不同加固措施分别模拟,先激活加固单元,再计算地面土柱加载及加载后再卸载的各工况,统计分析隧道竖向沉降 $\Delta_{\text{竖}}$ 和管片径向收敛 $\delta_{\text{径}}$ 的变化规律。

随着地面加载的增大,隧道沉降增量有逐渐变大的趋势,其变化趋势和规律与上文未加固隧道类似。可见,隧道内的加固对隧道沉降作用不大,见图6和图7。

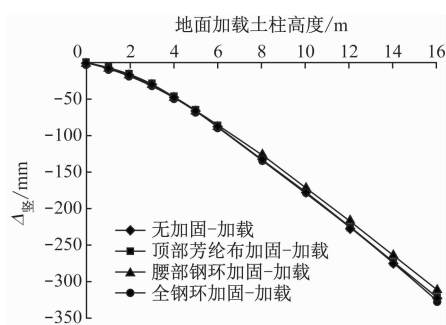


图6 隧道沉降随地面加载的变化规律

Fig. 6 Variation law of tunnel settlement with ground loading

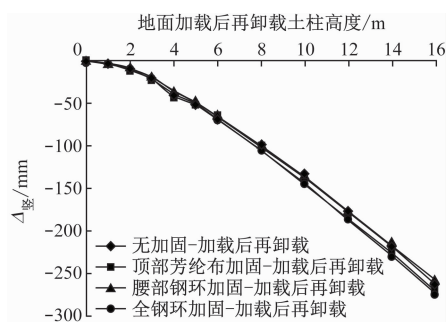


图7 隧道沉降随地面卸载的变化规律

Fig. 7 Variation law of tunnel settlement with ground unloading

根据图8和图9计算结果,隧道采取加固措施后,可有效减小管片径向收敛。同条件下加固效果依次为全钢环加固>顶部芳纶布加固>腰部钢环加固>无加固。但是,不同加固产生的效果呈非线性变化,为便于研究,本文用径向变形差 $\delta_{\text{差}}$ (管片未加固时径向收敛值-加固后径向收敛值),统计分析见图10。

根据图10分析,管片腰部钢环加固对约束径向收敛效果不明显,主要因为管片在超载作用下,最大应力发生在顶部,腰部管片结构内侧主要承受压力,故管片腰部局部钢环加固不能显著降低收敛变

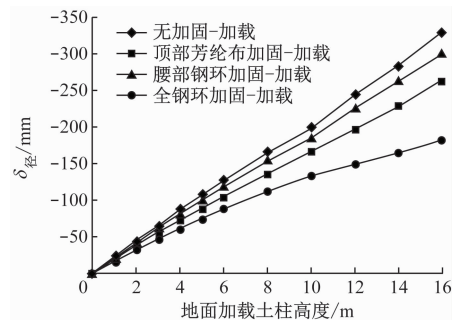


图8 径向收敛随地面加载的变化规律

Fig. 8 Variation law of radial convergence with ground loading

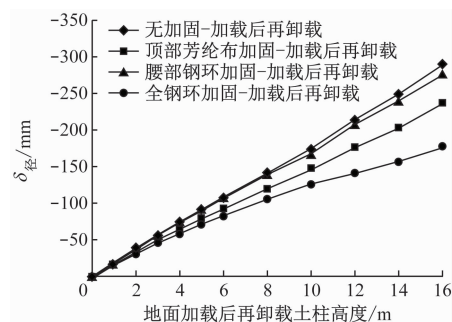


图9 径向收敛随地面卸载的变化规律

Fig. 9 Variation law of radial convergence with ground unloading

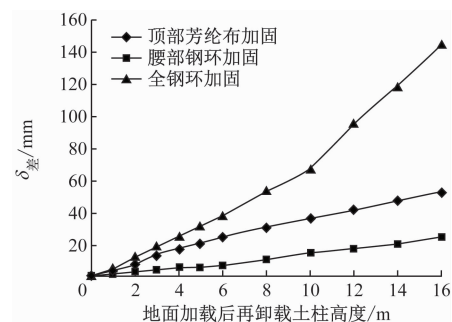


图10  $\delta_{\text{差}}$ 的变化规律

Fig. 10 Variation law of radial deformation difference

形。在地面加载高度小于4 m时,顶部芳纶布加固和全钢环加固对减小管片径向收敛的效果相当。但地面加载高度大于6 m后,全钢环加固效果明显好于顶部芳纶布加固,地面加载越大效果差距越明显。在顶部加载高度大于12 m后,因芳纶布抗拉强度无法随其变形增大而增加,效果减缓;顶部加载高度大于10 m后,全钢环加固下 $\delta_{\text{差}}$ 出现明显折点,表明无加固的管片局部已达到塑性阶段,管片变形快速增大,而全钢环加固能较好保持隧道椭圆度,减少应力集中,管片与钢环可有效承受外部作用。故全钢环可为隧道结构提供可靠、有效的加固效果。



### 3 管片病害处理措施的选择和施工

#### 3.1 处理措施的选择

管片病害处理的主要措施有:渗漏水处管片壁后压注聚氨酯浆液,环纵缝用环氧胶泥封堵;道床与管片之间间隙用高强砂浆灌浆处理;开裂管片可在裂缝处压注超细水泥浆后外贴芳纶布加固、顶部钢环局部加固、腰部钢环局部加固或道床上部全钢环加固。

根据武汉地铁区间沉降、变形、渗漏等病害情况,结合各种加固的研究分析,本工程区间加固措施主要选用顶部芳纶布加固和道床上部全钢环加固。芳纶布采用 AFS60 芳纶纤维布,厚度为 0.286 mm,与管片粘贴采用浸渍树脂。钢环加固选用 20 mm 厚钢板,环宽 1 200 mm,提前加工成弧形并分块,拼装完成后利用锚栓+刚性环氧浆液与管片连接。

#### 3.2 现场施工情况

首先对地面堆载范围内隧道进行自动化监测,对隧道的沉降、变形、裂缝、渗漏水点等进行统计分析。然后将地面堆土卸载,卸载完成后立即开展渗漏水封堵。针对大面积渗水优先采取管片壁后压注浆处理;再对渗漏水管片的环、纵缝进行封堵。待区间变形、沉降稳定后(管片连续 3 个月累计隆沉小于 3 mm)再进行裂缝及管片加固处理。对收敛变形绝对值超过 7 cm 且贯通裂缝宽度大于 0.2 mm 的管片进行全钢环加固,钢环按非骑环缝设置在管片中间,钢环与管片间的空隙采用刚性环氧浆液填充。对其余裂缝宽度大于 0.2 mm 的管片,采用环氧+外贴芳纶布处理,芳纶布粘贴采取防脱落措施,粘贴好芳纶布后,在其表面涂刷两道环氧保护膜。隧道两侧管片与道床产生的空隙,采用刚性环氧树脂灌浆处理。

### 4 病害治理后隧道监测情况分析

武汉地铁 2 号线区间病害处理完成后,历时 10 个月,进行了 5 次三维扫描测量以了解隧道变形收敛情况,具体统计数据见图 11。

根据监测数据,隧道椭圆长轴在同年 8 月~11 月期间,管片径向收敛变化不大于 0.05 mm,道床与管片间缝隙无发展,隧道结构变形趋于稳定,管片加固效果可靠有效。同时对隧道内渗漏点进行统计,管片表面仅有少量湿渍、无漏水现象,满足隧道

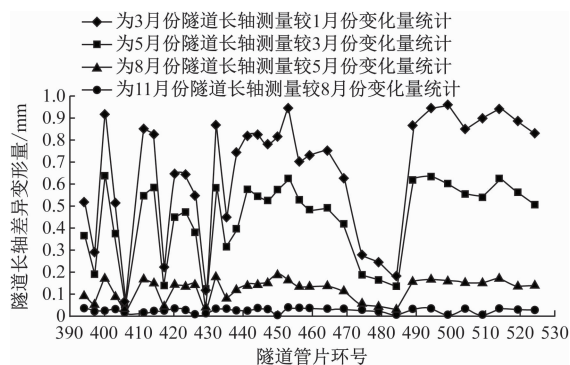


图 11 隧道加固完成后椭圆长轴三维测量收敛变化统计图  
Fig. 11 Statistical diagram of convergence change in 3D measurement of elliptic long axis after tunnel reinforcement

结构二级防水标准。故本工程通过采取上述加固措施后,隧道变形和渗漏水病害得到有效治理,为地铁运营维护和安全提供了可靠保障。

### 5 结语

结合地铁区间病害工程案例,综合考虑地层、管片错缝拼装、螺栓连接等实际情况,采用三维数值模拟方法研究隧道在地面加载和加载后再卸载工况下,不同加固措施的隧道沉降和径向变形规律,分析其变形特点及原因,指导工程选择合理的隧道加固方式处理病害并验证了治理效果,得到如下结论:

1) 隧道上方地面加载后再卸载,隧道沉降变形会有限地减小,但当地面加载土柱小于 2 m 时,卸载后变形量减小幅度可达 50% 以上。

2) 针对管片径向收敛有效加固措施是顶部芳纶布加固和全钢环加固。当上部地面加载土柱高度小于 4 m 时,综合考虑投资造价和加固效果,建议优先采用隧道顶部芳纶布加固;当上部地面加载较大时,建议优先采用全钢环加固,或两者兼有。

3) 考虑到加固材料需待管片结构发生变形后才能逐步起到效果,故加固施工越早越好。

4) 隧道结构在超载的作用下,管片外侧,特别是管片接缝处会产生较大应力,对结构耐久性和防水不利,设计方案中应有相关的处理措施。

### 参考文献

- [1] 张伯林,郑军,沈晓伟. 考虑界面黏结滑移的地铁盾构隧道内钢圈加固时机研究[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(10):26.

ZHANG Bolin, ZHENG Jun, SHEN Xiaowei. Reinforcement oppor-

- tunity of subway shield tunnel bonded steel ring with study on interfacial bond slip[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 26.
- [2] 陈春红, 周奇辉, 邢玉芳, 等. 软土地层地铁盾构隧道管片收敛变形整治方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 185.  
CHEN Chunhong, ZHOU Qihui, XING Yufang, et al. Improvement scheme for metro shield tunnel segment convergence deformation in soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 185.
- [3] 顾志敏, 吴哲. 城市轨道交通盾构隧道变形超限的壁后注浆加固治理技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 61.  
GU Zhimin, WU Zhe. Research on wall grouting reinforcement measures for urban rail transit shield tunnel deformation exceeding limit[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(5): 61.
- [4] 魏纲, 张书鸣, 崔允亮, 等. 地面堆载下盾构隧道不同加固方法的加固效果研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 85.  
WEI Gang, ZHANG Shuming, CUI Yunliang, et al. Reinforcement effect of various methods for shield tunnels under ground surcharge[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 85.
- [5] 柳献, 张浩立, 唐敏, 等. 内张钢环加固盾构隧道结构承载能力的试验研究—半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131.  
LIU Xian, ZHANG Haoli, TANG Min, et al. Experimental study on bearing capacity of shield tunnel structures reinforced by inner tensioned steel ring half ring reinforcement method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 131.
- [6] 刘梓圣, 张冬梅. 软土盾构隧道芳纶布加固机理和效果研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 155.  
LIU Zisheng, ZHANG Dongmei. The mechanism and effects of AFRP reinforcement for a shield tunnel in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 155.
- [7] 柳献, 张雨蒙, 王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 118.  
LIU Xian, ZHANG Yumeng, WANG Rulu. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 118.
- [8] 姚志雄, 吉磊, 刘耀星. 交通荷载对浅埋群洞隧道的动力影响分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 107.  
YAO Zhixiong, JI Lei, LIU Yaoxing. Analysis of the dynamic effect of traffic load on shallow multi-tube tunnel structure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 107.
- [9] 贾永刚, 阳卫卫, 吴帆, 等. 装配整体式盾构管片结构及力学性能研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 59.  
JIA Yonggang, YANG Weiwei, WU Fan, et al. Structure and mechanical properties of assembled monolithic segments in shield tunneling[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(5): 59.
- 收稿日期: 2022-12-05 修回日期: 2023-02-21 出版日期: 2025-03-10  
Received: 2022-12-05 Revised: 2023-02-21 Published: 2025-03-10  
• 通信作者: 徐浩, 高级工程师, hnlake2009@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- ZHANG Huagang. Analysis and suggestions of ATS fusion scheme for comprehensive monitoring and signal[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2023, 13(18): 153.
- [5] 彭其渊, 罗洁, 文雯, 等. 区域多制式轨道交通运输组织协同模式研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(4): 1.  
PENG Qiyuan, LUO Jie, WEN Wen, et al. Research on regional multi-standard rail transit organization collaboration mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering and Information Technology, 2020, 18(4): 1.
- [6] 陈光. 基于贯通运营的地铁延伸段信号系统设计与改造[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 139.  
CHEN Guang. Design and reform of metro signal system on the extension line based on official operation[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 139.
- 收稿日期: 2024-01-03 修回日期: 2024-02-23 出版日期: 2025-03-10  
Received: 2024-01-03 Revised: 2024-02-23 Published: 2025-03-10  
• 通信作者: 陈光, 高级工程师, 531043042@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- [1] 邹海平. 城市轨道交通全自动运行系统站台门与信号系统集成方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 261.  
ZOU Haiping. Research on FAO system platform screen door and signaling system integration scheme[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 261.
- [2] 崔惠珊, 盖克荣, 李雪枝, 等. FAO 下信号系统与站台门一体化方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 62.  
CUI Huishan, GAI Kerong, LI Xuezhi, et al. Integrated design scheme of signaling system and platform screen door under FAO[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5): 62.
- [3] 孔军, 宋丹. 城市轨道交通车-车通信系统融合设计[J]. 现代城市轨道交通, 2021(9): 13.  
KONG Jun, SONG Dan. Vehicle-to-vehicle communication system integration design of urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(9): 13.
- [4] 张华刚. 综合监控与信号 ATS 融合方案分析及建议[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(18): 153.