

温州软土地层盾构隧道基于长期沉降控制的地基加固方案分析*

苟长飞¹ 谢波涛^{2,3}

(1. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 325029, 温州; 2. 温州大学建筑工程学院, 325035, 温州;
3. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 325035, 温州)

摘要 [目的] 软土地区盾构隧道投入运营后, 因各种原因引起的长期隧道沉降对轨道交通的运营安全造成了一定的影响。列车荷载是引起软土地区盾构隧道长期沉降的重要原因之一, 因此有必要研究盾构隧道地基加固方案。[方法] 对比分析了采用注浆、水泥搅拌桩、高压旋喷等地面预加固法, 以及洞内注浆加固法的加固效果、适用地层、工程实施难易程度、加固范围及加固费用。以温州轨道交通 S2 线瓯江北口隧道的地基加固方案为例, 采用数值模拟方法分析了软土盾构隧道采用不同地基加固方案时, 车辆荷载引起的基底土体附加应力, 并通过应力分析研究了隧底加固宽度和加固深度对加固效果的影响规律, 进而确定了瓯江北口隧道的加固方案。通过现场沉降监测数据, 验证了加固方案的有效性。[结果及结论] 对盾构隧道底部软土进行加固后, 车辆荷载引起的附加应力在加固区产生了应力集中(增大)现象, 在非加固区产生了应力扩散(减小)现象。加固宽度对附加应力集中或扩散效应影响不显著, 加固深度对隧道沉降影响显著, 当加固深度超过一定限值后, 对隧道沉降的控制效果不再显著。

关键词 城市轨道交通; 盾构隧道; 地基加固; 沉降控制

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.016

Analysis of Foundation Reinforcement Schemes for Shield Tunnels in Wenzhou Soft Soil Strata Based on Long-term Settlement Control

GOU Changfei¹, XIE Botao^{2,3}

(1. Wenzhou Mass Transit Railway Investment Group Co., Ltd., 325029, Wenzhou, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, 325035, Wenzhou, China; 3. Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, 325035, Wenzhou, China)

Abstract [Objective] After the shield tunnels in soft soil

areas are put into operation, long-term settlement of the tunnel caused by various factors poses a threat on the safety of rail transit operation. Train load is one of the important causes for the long-term settlement of shield tunnels in soft soil areas. Therefore, it is necessary to study the foundation reinforcement schemes for shield tunnels. [Method] A comparative analysis is carried out on the reinforcement effects, applicable strata, difficulty levels of engineering implementation, reinforcement scopes, and reinforcement costs of the ground pre-reinforcement methods such as grouting, cement mixing piles, high-pressure jet grouting, and the in-tunnel grouting reinforcement method. Taking the foundation reinforcement scheme for the Oujiang North Estuary Tunnel of Wenzhou Rail Transit Line S2 as an example, the numerical simulation method is used to analyze the additional stress of the foundation soil caused by train loads when different foundation reinforcement schemes are adopted for the shield tunnels in soft soil areas. Through stress analysis, the influence patterns of the reinforcement width and depth at the tunnel bottom on the reinforcement effect are studied, thereby the reinforcement scheme for the Oujiang North Estuary Tunnel is determined. Then, the effectiveness of the reinforcement scheme is verified through on-site settlement monitoring data. [Result & Conclusion] After the soft soil at the bottom of the shield tunnel is reinforced, the additional stress caused by train loads shows a stress concentration (increase) phenomenon in the reinforced area and a stress diffusion (decrease) phenomenon in the non-reinforced area. The reinforcement width has an insignificant impact on the stress concentration or diffusion effect, while the reinforcement depth has a significant impact on tunnel settlement. When the reinforcement depth exceeds a certain limit, the control effect on tunnel settlement is no longer significant.

Key words urban rail transit; shield tunnel; foundation reinforcement; settlement control

* 住房和城乡建设部科技计划项目(2021-K-080);浙江省建设科研项目(2021K159)

温州地处东海之滨,约 60% 区间隧道洞身处于深厚淤泥及淤泥质软土地层中^[1]。软土地区盾构隧道投入运营后,因各种原因引起的长期沉降,对轨道交通运营安全造成了一定的影响。列车荷载是引起软土地区盾构隧道长期沉降的重要原因之一。文献[2]分析了隧道净距、列车运行速度和隧道衬砌刚度对土体沉降的影响。文献[3]使用经验公式预测软土地基在长期循环列车荷载作用下的累积变形。文献[4]建立了三维数值模型,对比分析了地铁列车运行速度对软土盾构隧道沉降的影响。文献[5]采用修正指数模型,预测昆明轨道交通在列车循环荷载作用下隧道基底的长期沉降变形规律。文献[6]采用有限差分软件,结合经验拟合模型,分析了列车荷载对隧道及周围软土的长期沉降影响规律。文献[7]采用数值模拟的方法,获得了不同加固方式下的地面沉降和隧道变形规律,提出一套能使盾构安全穿越的加固建议。文献[8]通过现场监测的方法,分析了土压盾构穿越上软下硬地层的洞内超前注浆加固效果。

本文针对软土地层盾构隧道的长期沉降问题,通过 ABAQUS 有限元软件,计算了不同地基加固方式下车辆荷载引起的土体附加应力,根据土体应力-应变关系建立了沉降计算概化模型,并通过该模型分析了温州轨道交通 S2 线瓯江北口隧道的地基加固方案。本文研究可为软土地层盾构隧道长期沉降计算和控制提供工程经验与技术指导。

1 工程概况

温州轨道交通 S2 线一期工程瓯江北口隧道采用盾构法施工,管片外径为 14.5 m,内径为 13.3 m,管片厚度为 0.6 m。温州轨道交通 S2 线一期工程瓯江北口隧道示意图如图 1 所示。盾构段起、终点里程为 DK49+240.0—DK51+904.6,长为 2 664.4 m。盾构段主要穿越地层为(2)2 淤泥、(3)1 淤泥质黏土、(3)2 黏土、(3)2-1 粉砂夹粉质黏土及(4)2 黏土。盾构隧道 DK51+220—DK51+700 段的隧道底部存在淤泥质黏土,在列车循环荷载作用下,容易产生沉降现象。

2 常用加固方法

2.1 地面预加固

在地面条件允许的情况下,在地面上采用搅

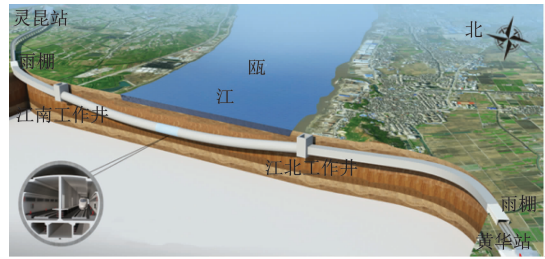
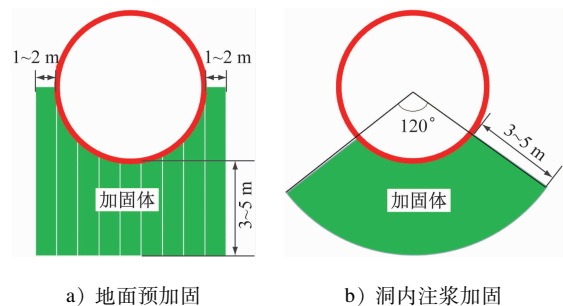


图 1 温州轨道交通 S2 线一期工程瓯江北口隧道示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the Oujiang North Estuary Tunnel of Wenzhou Rail Transit Line S2 Phase 1 Project

拌、旋喷及注浆等方式对盾构通过断面的软弱地层进行加固,加固深度一般为盾构圆心至管片结构底以下 3~5 m,宽度为管片两侧各 1~2 m。地面预加固示意图如图 2 a) 所示。

2.2 洞内后加固

在地面条件不允许的情况下,通过盾构管片预留的注浆孔向结构周边岩土体注浆,加固深度为隧底以下 3~5 m,加固范围为腰部以下 120°。洞内后加固示意图如图 2 b) 所示。



a) 地面预加固

b) 洞内注浆加固

图 2 地面预加固及洞内注浆加固示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ground pre-reinforcement and in-tunnel grouting reinforcement

2.3 加固措施综合对比

综合对比各加固方法的加固效果、适用地层、工程实施难易程度、加固范围、加固费用,结果如表 1 所示。

3 车辆荷载下土体应力及沉降分析

3.1 计算模型

采用 ABAQUS 有限元软件建立模型,未加固、地面预加固及洞内注浆加固计算模型示意图如图 3 所示。

3.2 计算工况

加固计算工况如表 2 所示,其中加固体圆心角(以下简称“加固圆心角”)见图 2 b)。依据实际工

表 1 盾构隧道加固方法对比

Tab. 1 Comparison of shield tunnel reinforcement methods

加固方法	加固效果	适用地层	工程实施难易程度	加固范围	双线每延 m 加固费用/万元
地面注浆预加固	加固体强度、承载能力不易保证	可注性好的地层	较易实施,但需要增加临时征地、平整场地、绿化恢复、道路桥梁破覆等工作	较大	3.6(费用较高)
地面搅拌预加固	加固体均匀性、承载能力易保证	各种松软地层	较易实施,但需要增加临时征地、平整场地、绿化恢复、道路桥梁破覆等工作	最大	3.0(费用较低)
地面高压旋喷预加固	加固体均匀性、承载能力易保证	各种松软地层	较易实施,但需要增加临时征地、平整场地、绿化恢复、道路桥梁破覆等工作	最大	4.5(费用最高)
洞内注浆后加固	加固效果不易保证	可注性好的地层	最易实施,但施工控制要求高,否则容易引起管片开裂及破损	最小	2.4(费用低)

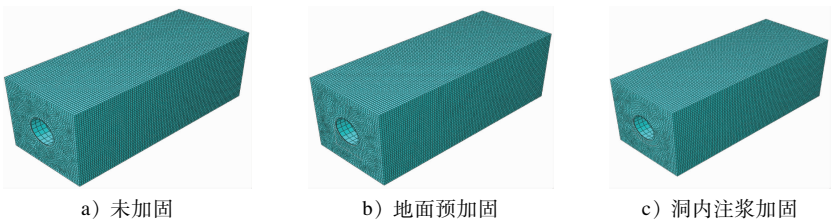


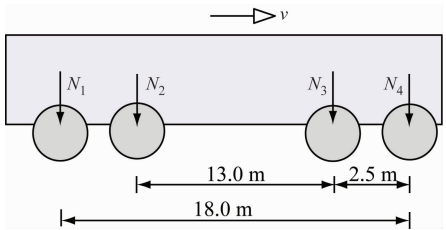
图 3 未加固、地面预加固及洞内注浆加固计算模型示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of calculation models for unreinforcement, ground pre-reinforcement, and in-tunnel grouting reinforcement

表 2 加固计算工况

Tab. 2 Calculation working conditions for reinforcement

工况	工况编号	加固范围
地面加固	工况 0	未加固
	工况 1	加固深度为 3 m,加固宽度为管片两侧各 1 m
	工况 2	加固深度为 3 m,加固宽度为管片两侧各 2 m
	工况 3	加固深度为 5 m,加固宽度为管片两侧各 2 m
	工况 4	加固深度为 5 m,加固宽度为管片两侧各 1 m
洞内注浆加固	工况 5	加固深度为 3 m,加固圆心角范围为 120°
	工况 6	加固深度为 3 m,加固圆心角范围为 90°
	工况 7	加固深度为 5 m,加固圆心角范围为 120°
	工况 8	加固深度为 5 m,加固圆心角范围为 90°



注: N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 为车辆轴重; v 为车辆行驶速度。

图 4 车辆荷载示意图

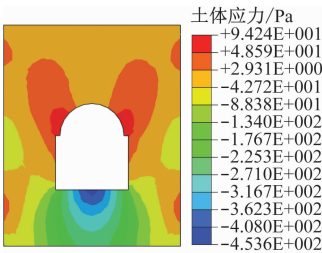
Fig. 4 Schematic diagram of vehicle load

程,本文考虑的是包含 4 节车厢的系列荷载,列车车厢荷载示意图如图 4 所示。列车每个车厢都有 4 个车轴负载,第 1 节和最后 1 节车厢的轴负载为 15 t,

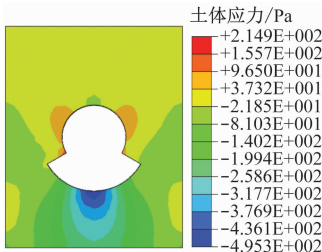
其他车厢的轴负载为 16 t,其行车计划约为每天 102 对列车,每隔 10 min 一班。

3.3 计算结果分析

地面加固工况 3 和洞内注浆加固工况 7 的土体应力云图如图 5 所示。



a) 地面加固工况 3



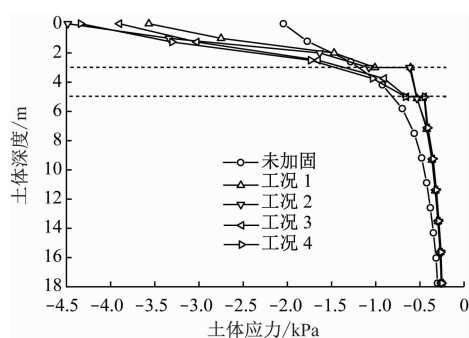
b) 洞内注浆加固工况 7

图 5 典型工况地面加固工况 3 和洞内注浆加固工况 7 的土体应力云图

Fig. 5 Soil stress cloud atlas under typical working conditions of ground reinforcement condition 3 and in-tunnel grouting reinforcement condition 7

3.3.1 地面加固

地面加固前后,土体应力与深度间的关系曲线如图 6 所示。地基加固后,在加固区域,车辆荷载引起的附加应力显著提高,约为加固前的 2.4 倍至 4.5 倍。列车循环荷载作用主要在非加固土体中产生累积变形,在加固区的土体中产生的累积变形可忽略不计。因此,下文将重点分析不同加固范围下,车辆荷载在非加固土体中产生的附加应力。采用地面加固后,车辆荷载引起的附加应力在加固区产生了应力集中(增大)现象,在非加固区产生了应力扩散(减小)现象。



注:应力值以土体受拉为正,以土体受压为负;余类同。

图 6 地面加固前后土体应力与深度间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between soil stress and depth before and after ground reinforcement

当加固宽度从管片外侧 1 m 增加到 2 m 时,加固区的附加应力值明显增大,非加固区的附加应力值较为接近。由于土体沉降主要发生在非加固区,因此,加固宽度对沉降的影响甚微。

对比工况 1 和工况 4 可知,当加固深度从 3 m 增加至 5 m 时,加固区的附加应力值明显增大,非加固区的附加应力值较为接近。由于土体沉降主要发生在非加固区,增加加固深度可以缩小非加固区范围,因此,加固深度对沉降影响显著。

3.3.2 洞内注浆加固

洞内注浆加固前后,土体应力与深度间的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知:洞内注浆加固条件下,车辆荷载引起的附加应力变化规律与地面加固时的变化规律相同。对比 4 种工况可知,附加应力在加固区和非加固区的区别均不明显,说明加固范围对附加应力集中或扩散效应的影响不显著。当加固深度从 3 m 增加至 5 m 时,加固深度的增加,缩小了非加固区范围,因此,加固深度对隧道沉降影响显著。加固圆心角为 90° 的扇形加固范围恰与

45° 应力扩散角对应。选择扇形加固范围时,加固范围取 $>90^\circ$ 加固圆心角即可。

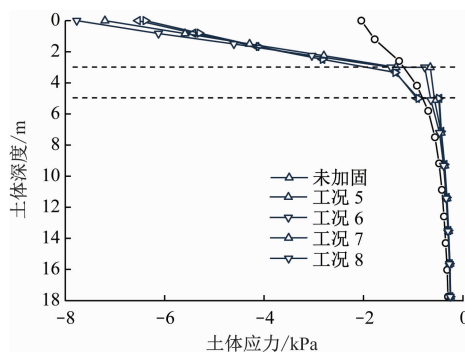


图 7 洞内注浆加固前后土体应力与深度间的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between soil stress and depth before and after in-tunnel grouting reinforcement

3.4 概化分析确定加固深度

根据前文所述的车辆荷载下的土体附加应力计算结果,可对未加固和地面加固两种工况下的附加应力曲线进行概化分析。土体沉降计算概化图如图 8 所示。其中:曲线 AB 代表未加固工况下的土体附加应力曲线;曲线 $DEFG$ 代表加固工况下的土体附加应力曲线; OM 代表加固深度。根据土力学原理,附加应力沿土体深度的积分值为附加应力曲线与纵坐标轴围成的图形面积 S_{OABC} 。采用地基加固后,可明显减少车辆振动引起的土体变形,加固深度对隧道沉降控制效果的影响显著,当加固深度超过 5 m 后,加固深度对隧道沉降控制效果的影响不再显著。

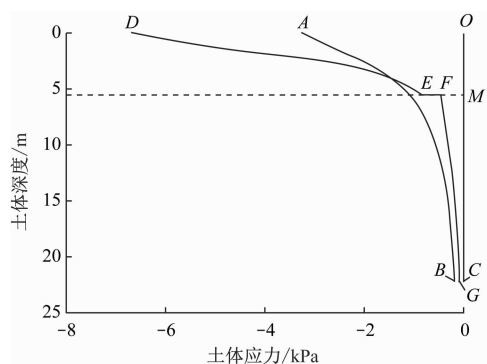


图 8 土体沉降计算概化图

Fig. 8 Generalized diagram for soil settlement calculation

4 加固方案

综合车辆荷载下的土体应力分析结果及地基加固方法,本工程区间 DK51 + 220—DK51 + 700

段,在盾构掘进前对管片结构底部软弱地层采用 $\phi 800$ mm旋喷桩加固,加固范围取为结构外边线2 m范围,结构底部5 m范围。盾构软弱地基加固横断面示意图如图9所示。列车试运行10个月后,瓯江北口隧道竖向位移监测曲线如图10所示。由图10可知:盾构隧道加固区域的最大沉降值为1.4 mm,满足轨道交通运营安全要求。

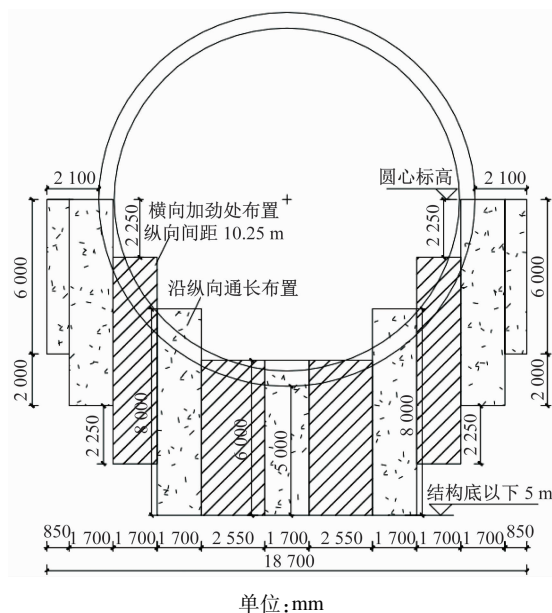


图9 盾构软弱地基加固横断面示意图

Fig. 9 Schematic cross-section diagram of soft foundation reinforcement for shield tunnel

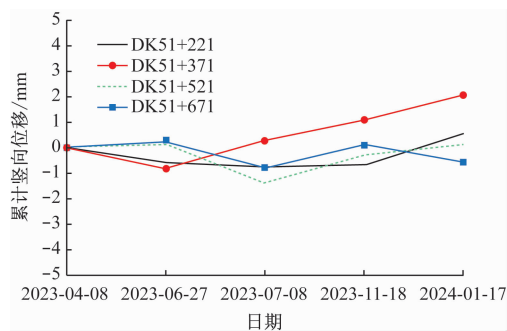


图10 瓯江北口隧道竖向位移监测曲线

Fig. 10 Vertical displacement monitoring curves of the Oujiang North Estuary Tunnel

5 结论

1) 盾构隧道地基存在软弱土层时,可通过地面注浆、地面搅拌、地面高压旋喷等加固方法,从地面对地基软弱土层进行预加固,或通过注浆从洞内对地基软弱土层进行加固。

2) 隧道地基软弱土加固后,车辆荷载引起的附加应力在加固区产生了应力集中(增大)现象,在非加固区产生了应力扩散(减小)现象。加固宽度对附加应力集中或扩散效应的影响不显著,加固深度对隧道沉降影响显著,当加固深度超过一定值后,其对沉降控制的影响不再显著。

3) 温州瓯江北口隧道采用旋喷桩加固隧道底部软弱地基,加固范围为结构外边线2 m范围,结构底部5 m范围,沉降监测结果显示,所提加固方案有效。

参考文献

- [1] 苏培森. 温州深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险及控制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 200.
SU Peisen. Geological risk analysis and control study for shield tunnel construction in deep-thick soft soil stratum in Wenzhou[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 200.
- [2] 刘羽航, 徐国元, 黎伟. 小净距平行地铁隧道下卧土体长期沉降规律研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(2): 92.
LIU Yuhang, XU Guoyuan, LI Wei. Study on long-term settlement laws of foundation soil under small-spaced double tunnels[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(2): 92.
- [3] 王国才, 徐启鹏, 刘伟阳, 等. 地铁列车荷载下软土的动力响应和长期沉降分析[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(2): 186.
WANG Guocai, XU Qipeng, LIU Yiyang, et al. Research on the dynamic response and long-term settlement of soft soil under metro loadings[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(2): 186.
- [4] 姜洲, 高广运, 赵宏. 地铁行车速度对盾构隧道运营沉降的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3283.
JIANG Zhou, GAO Guangyun, ZHAO Hong. Influence of subway train speed on operation-induced settlement of shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3283.
- [5] 薛阔, 王立娜, 翟翊飞, 等. 地铁列车荷载引起隧道基底长期沉降研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 47.
XUE Kuo, WANG Lina, ZHAI Chifei, et al. Analysis of long-term settlement of tunnel foundation induced by metro train load[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40(5): 47.
- [6] 张冬梅, 李钰. 地铁荷载引起的盾构隧道及土层长期沉降研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 563.
ZHANG Dongmei, LI Yu. Long-term settlement of shield tunnel in soft clay due to vehicle vibration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 563.
- [7] 吴永哲, 靳贻杰, 张志宇, 等. 盾构穿越软土地层预加固数值模拟与变形控制[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(1): 22.

(下转第104页)

6 结语

1) 束合管幕结构结合缝的全过程受力机理为:结合缝脱开前,结构整体性好,结合缝刚度大;结合缝脱开后,结合缝刚度迅速降低,且随着外荷载的不断增大,依次出现预应力筋屈服、锁扣接触并失效等现象。

2) 结合缝黏结强度的增大能够增加结合缝脱开弯矩,降低结合缝脱开安全系数,使预应力筋的安全储备更小。

3) 预应力筋能通过其预加荷载及受拉作用影响结合缝的受力性能。提高预应力筋的预应力值能够有效提高脱开弯矩,降低脱开状态应力重分布系数,但无法提高结合缝的屈服弯矩和极限弯矩,且结构极限状态延性系数较低。

4) 调整预应力筋位置,使之更加靠近结合缝受拉侧,能够有效提高结合缝脱开弯矩。

本文通过建立束合管幕结构结合缝数值模型,与结构试验结果进行匹配,验证所提数值模型的准确性。此外,本文还分析了束合管幕结构结合缝的全过程受力机理,以及结合缝混凝土与钢管节的黏结强度、预应力张拉力大小、预应力筋位置等因素,对束合管幕结构力学性能的影响。

参考文献

- [1] 关永平,赵文,王连广,等. STS 管幕结构抗弯性能试验研究及参数优化[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 83.
GUAN Yongping, ZHAO Wen, WANG Lianguang, et al. Study on parameter optimization and the flexural behavior of steel tube slab structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 83.
- [2] 熊学玉,高心宇,王寿生,等. 预应力管幕工艺及设计方法初探[J]. 建筑结构, 2018, 48(8): 91.
XIONG Xueyu, GAO Xinyu, WANG Shousheng, et al. Study on

technology and design method of prestressed concrete roof[J]. Building Structure, 2018, 48(8): 91.

- [3] HISATAKE M, OHNO S. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 120.
- [4] 孙钧,虞兴福,孙旻,等. 超大型“管幕-箱涵”顶进施工土体变形的分析与预测[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1021.
SUN Jun, YU Xingfu, SUN Min, et al. Analysis and prediction on soft ground deformation of a super-large shallow buried “pipe-roofing and box-culvert” jacking project under construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1021.
- [5] 毕湘利,张中杰,刘书,等. 饱和软土地区束合管幕结构受力性能足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 953.
BI Xiangli, ZHANG Zhongjie, LIU Shu, et al. Full-scale experimental study on mechanical behaviors of bundled integrate structure in saturated soft soil area[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(6): 953.
- [6] 毕湘利,王秀志,张中杰,等. 束合管幕结构结合缝压弯性能足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1342.
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on joint bending performance of bundled integrate structure[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1342.
- [7] 毕湘利,王秀志,张中杰,等. 束合管幕结构结合缝受剪性能足尺试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 245.
BI Xiangli, WANG Xiuzhi, ZHANG Zhongjie, et al. Full-scale experimental study on shear performance of joints of bundled integrate structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 245.

· 收稿日期:2023-01-18 修回日期:2023-10-23 出版日期:2025-05-10
Received:2023-01-18 Revised:2023-10-23 Published:2025-05-10

· 第一作者:吉茂杰,正高级工程师,jimaojie@shmetro.com
通信作者:柳献,教授,xian.liu@tongji.edu.cn

· ©《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

(上接第 97 页)

- WU Yongzhe, JIN Yijie, ZHANG Zhiyu, et al. Numerical simulation and deformation control of shield tunneling through soft soil layer pre-reinforcement[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(1): 22.
- [8] 刘洪亮,章邦超,郭佳,等. 土压盾构穿越上软下硬地层洞内超前注浆加固技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 240.
LIU Hongliang, ZHANG Bangchao, GUO Jia, et al. Advance grouting reinforcement technology for earth pressure shield tunnel-

ling through upper-soft-lower-hard strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 240.

· 收稿日期:2024-04-17 修回日期:2024-05-15 出版日期:2025-05-10
Received:2024-04-17 Revised:2024-05-15 Published:2025-05-10

· 通信作者:苟长飞,高级工程师,530777879@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