

滨海地区地铁隧道盾构法联络通道 渣土改良技术研究*

姜 鹏¹ 张 崇¹ 李 刚² 董子博³ 邓岳保² 朱瑶宏²

(1. 中铁十九局集团轨道交通工程有限公司, 101300, 北京; 2. 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心, 315211, 宁波; 3. 宁波用躬科技有限公司, 315105, 宁波)

摘 要 [目的] 土压平衡盾构机在滨海地区黏性土层推进过程中, 常发生泥饼、出土不顺、土仓闭塞等现象。为满足盾构掘进要求, 需对黏性土层渣土改良技术进行研究。[方法] 依托宁波地铁 5 号线联络通道粉质黏土盾构工程, 通过渣土改良试验确定最优泡沫剂质量分数和最佳泡沫剂注入比, 将试验成果应用于联络通道盾构施工现场以检验改良技术的可靠性, 基于有限元法分析渣土改良前后盾构施工对场地土层变形的影响。[结果及结论] 通过试验确定最优泡沫剂质量分数为 3%, 最佳泡沫剂注入比为 20%。将试验成果应用于联络通道盾构施工现场渣土改良, 发现场地土层改良后盾构刀盘扭矩和推力均显著下降, 且刀盘处未形成泥饼, 现场施工处于良好状态。有限元法分析表明, 渣土改良后地面沉降虽有所增加但数值较小。

关键词 地铁隧道; 滨海地区; 联络通道; 盾构法; 渣土改良技术

中图分类号 TU442: U455. 43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.008

Muck Improvement Technology for Connection Passage of Shield Tunneling Metro Tunnels in Coastal Areas

JIANG Peng¹, ZHANG Chong¹, LI Gang², DONG Zibo³, DENG Yuebao², ZHU Yaohong²

(1. China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., 101300, Beijing, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coastal Urban Rail Transit, Ningbo University, 315211, Ningbo, China; 3. Ningbo Yonggong Technology Co., Ltd., 315105, Ningbo, China)

Abstract [Objective] In the process of the earth pressure balance shield machine advancing in the coastal area cohesive soil layer, phenomena such as mud cake formation, unsmooth muck discharge, and blockage of the soil chamber often occur. In order to meet the requirements of shield tunneling, it is necessary to study the muck improvement technology in the cohe-

sive soil layer. [Method] Based on a silty clay shield tunneling project of the connection passage on Ningbo Metro Line 5, the optimal mass fraction and the best injection ratio of the foaming agent are determined through the muck improvement test. The test results are applied to the shield tunneling construction site of the connection passage to verify the reliability of the improvement technology. The finite element method is used to analyze the influence of shield tunneling construction on the deformation of the soil layer at the site before and after the muck improvement. [Result & Conclusion] The optimal mass fraction and the best injection ratio of the foaming agent are determined to be 3% and 20% respectively through tests. The test results are applied to the muck improvement at the shield tunneling construction site of the connection passage. It is found that both the torque and thrust of the shield cutter head decrease significantly after the improvement of the soil layer at the site, and no mud cake is formed at the cutter head. The on-site construction is in a good state. The finite element method analysis shows that despite the increasing after the muck improvement, the ground settlement is relatively small.

Key words metro tunnel; costal area; connection passage; shield tunneling method; muck improvement technology

在盾构隧道联络通道施工过程中, 对渣土进行物理力学性能的改良, 以满足盾构掘进的要求, 是必不可少的措施。目前, 国内外学者主要围绕地铁隧道土压平衡盾构机掘进中渣土改良进行了一系列研究^[1-8], 而缺乏对盾构法联络通道工程的相关研究。另外, 针对滨海地区典型黏性土层的渣土改良技术研究也较少。为此, 以宁波某条地铁线路的盾构法联络通道工程为背景, 以泡沫剂作为渣土改良剂, 通过确定泡沫剂最优质量分数和最佳注入比, 并将试验成果应用于实际工程进行检验, 通过

* 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心开放基金项目(XT2021012)

数值模拟的方式分析了渣土改良前后盾构施工对场地土层变形的影响。

1 渣土改良试验

配制不同质量分数的泡沫剂,其质量分数分别为1%、2%、3%、4%、5%。观测发泡倍率与半衰期,绘制泡沫剂质量分数与发泡倍率、半衰期的变化曲线,由此进一步得到最佳泡沫剂质量分数^[9]。泡沫剂性能-质量分数关系曲线如图1所示。

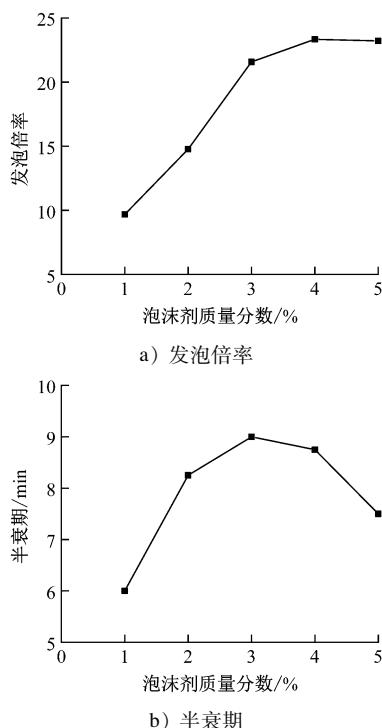


图1 泡沫剂性能-质量分数关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between the performance and the mass fraction of the foaming agent

由图1 a)可知:泡沫剂质量分数较低时,泡沫发泡倍率迅速提高;泡沫剂质量分数为3%时,泡沫发泡倍率提高至22倍左右;泡沫剂质量分数超过3%时,泡沫发泡倍率增长速度不显著。由图1 b)可知:泡沫半衰期随泡沫剂质量分数增大而迅速增大;泡沫剂质量分数超过3%时,其半衰期开始下降。综上考虑,泡沫剂质量分数采用3%为最优。在此基础上,依托宁波某条地铁线路联络通道工程穿越的粉质黏土,以质量分数为3%的泡沫剂作为渣土改良剂,按照FRI(泡沫剂注入比)0%、20%、40%、60%分别配置试样,测试改良前后试样的流动性、密度、压缩性、抗剪强度及渗透系数,以此来获得最佳泡沫剂注入比。

1.1 渣土改良对流动性的影响

对泡沫剂改良后的渣土进行坍落度试验。渣土坍落度-泡沫剂注入比关系曲线,如图2所示。由图2可知:渣土经注入泡沫剂改良后,坍落度显著改善;FRI为20%时,相较于未改良前渣土坍落度增加了120%;FRI为20%和40%时,渣土坍落度集中在100~160 mm范围内;当泡沫剂注入比大于40%时,渣土坍落度严重超限。根据已有经验,滨海地区黏性土地层盾构法联络通道施工中渣土最佳坍落度为100~160 mm,因此选用最优泡沫剂注入比为20%~40%。

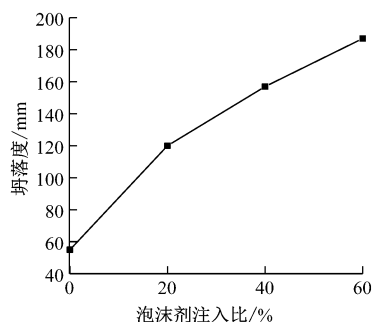


图2 渣土坍落度-泡沫剂注入比关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between the muck slump and the injection ratio of the foaming agent

1.2 渣土改良对密度的影响

试验测试了不同泡沫剂注入比对不同含水率渣土密度的影响,如图3所示。由图3可知:不同含水率渣土的孔隙被泡沫填充后,土体密度与泡沫注入比成反比,但变化幅度不大。由此,现场施工过程中仅需略加注意泡沫剂注入对渣土体积的影响,防止泡沫剂注入过度对土体周边环境造成污染。

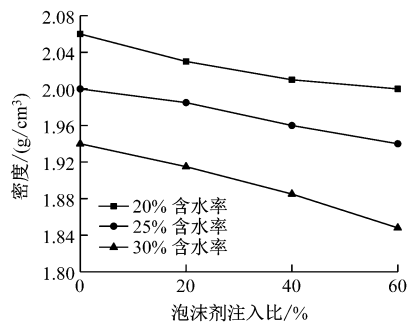


图3 不同含水率渣土密度-泡沫剂注入比关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between the muck density with different moisture contents and the injection ratio of the foaming agent

1.3 渣土改良对压缩性的影响

依据工程实际情况,联络通道采用盾构法推进时需将土仓压力控制在 230 ~ 270 kPa,故试验中最大竖向压力设定为 300 kPa。图 4 为不同含水率 W 及不同泡沫剂注入比下改良土压缩系数曲线。由图 4 可知:土样 W 越大,压缩系数越大;未改良土样的压缩系数在 300 kPa 时均低于 0.2 MPa^{-1} ,不满足泡沫剂黏土压缩系数要求;注入泡沫剂后土样压缩系数均有不同程度的提高;泡沫剂注入比越高,改良土的压缩系数越高。结合经济性考虑,土样 W 为 20%、25% 和 30% 时,最佳泡沫剂注入比分别为 40%、20% 和 20%。因此,可以在施工过程中适当

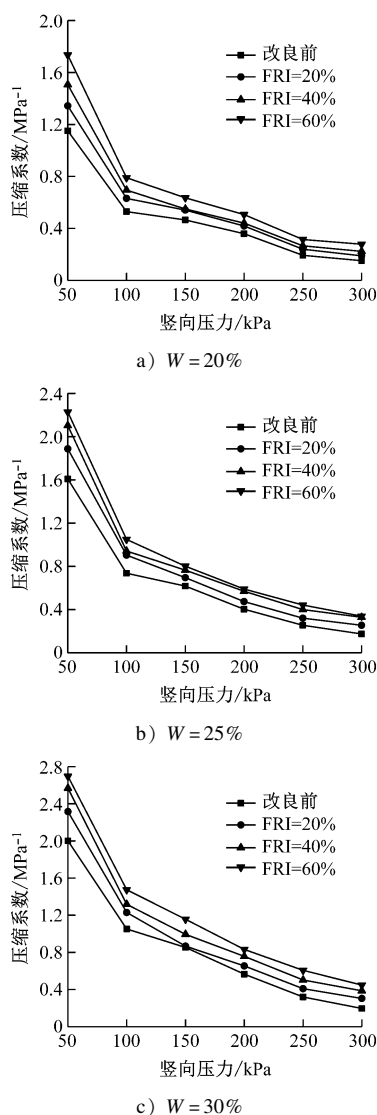


图 4 不同 W 及不同泡沫剂注入比下改良土压缩系数曲线
Fig. 4 Compression coefficient curves of the improved soil with different values of W and different injection ratios of the foaming agent

加水,以降低泡沫剂的使用。

1.4 渣土改良对抗剪强度的影响

为模拟实际施工条件,对试样先进行 300 kPa 预压固结,然后进行剪切。图 5 为改良土试样黏聚力和内摩擦角随泡沫剂注入比的变化曲线。由图 5 可知:随着泡沫剂注入比增大,改良土的黏聚力和内摩擦角均有不同程度下降;当 FRI 为 20% 时,土体黏聚力下降较快,整体下降了约 40%;随着 FRI 逐步增大,黏聚力下降幅度变缓;当 FRI 超过 40% 后, W 为 30% 的土体黏聚力仅下降 10% 左右,此时增加注入泡沫剂改良效果已不明显;土体内摩擦角随泡沫剂注入比的变化趋势与黏聚力变化趋势接近。综上,泡沫剂注入比增大对于土仓压力及螺旋排土机出土有利;综合考虑成本和改良效果,最佳泡沫剂注入比宜为 20% ~ 40%。

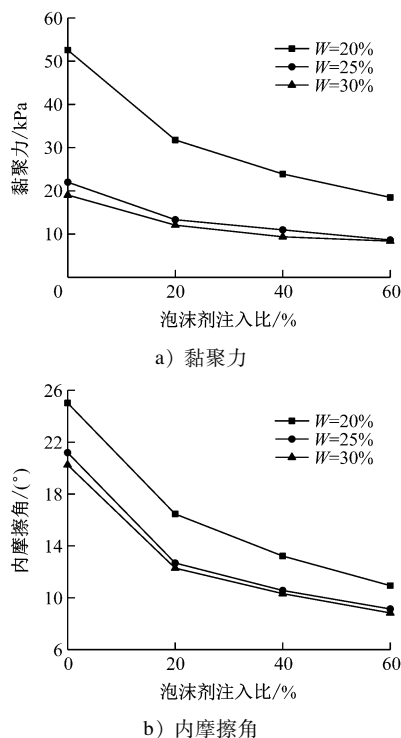


图 5 改良土黏聚力和内摩擦角随泡沫剂注入比变化曲线
Fig. 5 Curves of the cohesion and internal friction angle of the improved soil varying with the injection ratio of the foaming agent

1.5 渣土改良对渗透系数的影响

通常认为土体渗透系数越低越有利于施工^[10]。对此,通过变水头试验测试不同泡沫剂注入比改良土样的渗透系数。改良土渗透系数-泡沫剂注入比关系曲线,如图 6 所示。由图 6 可知:泡沫剂能较显著提升土体的抗渗性能;未改良试样渗透系数为

$4.78 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 泡沫剂的注入使得试样渗透系数先迅速降低, 后续随着泡沫剂注入比的增加而趋势变缓。由此, 结合渣土抗剪性能综合考虑, 最佳泡沫剂注入比宜为 20% ~ 40%。

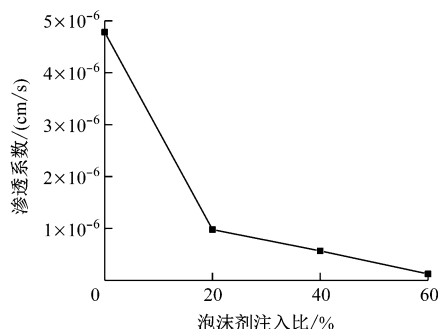


图6 改良土渗透系数-泡沫剂注入比关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between the permeability coefficient of the improved soil and the injection ratio of the foaming agent

综上, 根据试验对渣土流动性、密度、压缩系数、抗剪强度和渗透系数的研究, 综合考虑试验效果、现场需求、经济和绿色施工等方面, 最佳泡沫剂注入比选定为 20%。

2 现场应用

2.1 工程概况

宁波轨道交通 5 号线泗港站—曹隘站区间位于金达路下方, 联络通道上方毗邻居民小区。该处中心埋深为 23.43 m, 线间距为 29.19 m。联络通道上方土层由上至下依次为: 杂填土、淤泥、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、黏土, 主要穿越粉质黏土。

2.2 应用效果

为了验证室内试验得到的泡沫剂最优质量分数及最佳注入比, 将该方案应用到现场联络通道的第 16 环—第 25 环管片进行试验。试验段第 16 环—第 20 环管片为优化前对比段, 第 21 环—第 25 环管片为优化后对比段。现场收集改良前后盾构掘进参数, 主要包括刀盘扭矩和推进总推力。试验段内地质情况基本一致, 可认为施工过程中盾构掘进参数变化均由改良渣土引起。

图 7 为渣土改良前后试验段盾构推进阶段刀盘扭矩和油缸推力对比曲线。由图 7 可知: 注入泡沫剂 (FRI = 20%) 改良后, 掘进施工阻力显著下降, 其中, 刀盘扭矩下降了 200 kNm, 油缸推力下降了约 1 000 kN。盾构刀盘处未形成泥饼, 现场施工处于

良好工程状态。由此说明, 采用 20% 泡沫剂注入比对滨海地区粉质黏土的改良效果较好。

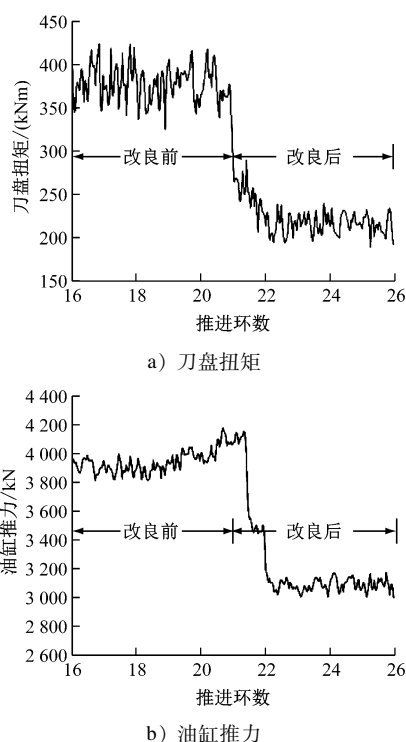


图7 渣土改良前后试验段盾构掘进参数对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of shield tunneling parameters in the test section before and after muck improvement

3 联络通道有限元分析

依托宁波地铁 5 号线联络通道实际工程, 利用 PALXIS 3D 软件进行数值模拟, 对比分析盾构法联络通道施工在渣土改良前后引起的地面沉降。

3.1 模型建立及参数选取

建立长 80 m、宽 80 m、高 40 m 的联络通道有限元模型, 如图 8 所示。由于盾体整体强度与刚度极高, 在现场施工中变形量很小, 因此在模型中视为刚体。联络通道管片材料为 C50 钢筋混凝土, 弹性模量 E_c 取 3.45 GPa, 泊松比取 0.2。数值模拟计算考虑了注浆材料强度随时间的变化, 共分为 4 个阶段; 浆液刚注入时强度较低, 最终凝结后强度较高; 根据试验测试情况, 不同阶段注浆材料的弹性模量取值分别为 0.2 GPa、0.4 GPa、0.7 GPa 和 1.0 GPa。边界条件为: 顶部为自由边界, 其余边界设置约束。

联络通道有限元模型通过改变开挖面土体的物理力学参数来模拟渣土改良。土体物理力学参数取值见表 1。

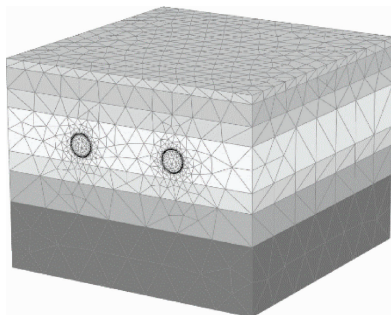


图8 联络通道有限元模型

Fig. 8 Finite element model of the connection passage

表1 土体物理力学参数取值

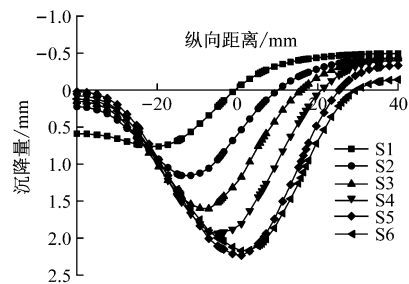
Tab.1 Values of physical and mechanical parameters of the soil mass

土体名称	孔隙比	天然重度/ (kN/m^3)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^\circ$)	压缩模 量/MPa
杂填土	0.835	19.4	32.0	15.4	6.55
淤泥质黏土	1.343	17.1	16.0	8.4	2.66
淤泥	1.375	17.2	10.0	8.3	2.24
粉质黏土	0.877	18.8	19.0	20.3	5.18
改良后粉黏土	0.901	18.4	9.4	10.3	4.12
淤泥质粉黏土	1.166	17.8	18.0	10.6	3.61
黏土	1.143	17.9	21.0	14.3	4.98

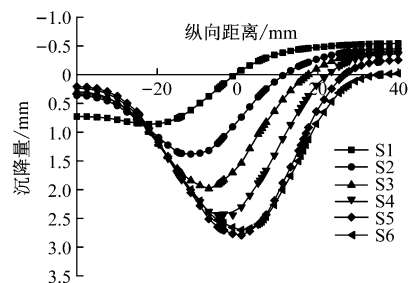
3.2 渣土改良前后地面沉降对比分析

从横向与纵向两个方向分析地面变形。将施工监测阶段划分为盾构始发洞阶段 S1、盾构掘进至断面前方阶段 S2、盾构掘进通过断面时阶段 S3、盾构掘进离开断面后方阶段 S4、地面沉降稳定阶段 S5、盾构接收出洞阶段 S6 等 6 个阶段,全过程监测施工中地面变形情况。

以联络通道中间顶部 1 组测点为断面,分析渣土改良对纵向地面沉降影响。渣土改良前后纵向地面沉降对比,如图 9 所示。由图 9 可知:盾构始发端地面沉降大于接收端地面沉降,中间地面沉降量最大;由于盾构掘进操作中一般采用稍大于实际土压的数值,故靠近始发端的地面沉降相较于接收端的地面沉降大,体现了盾构掘进过程对前方土体起到了隆起作用。地面沉降量随着盾构掘进逐渐加大,纵向最大地面沉降量在 3 mm 以内;渣土改良导致刀盘前端开挖土体部分土性改变,渣土改良后纵向最大地面沉降量为 2.85 mm,稳定地面沉降量为 2.70 mm,相较改良前地面最大沉降量(2.20 mm)和稳定地面沉降量(2.15 mm)分别增大了 29.5%、25.6%,但地面沉降量仍远小于盾构控制规范要求。



a) 改良前



b) 改良后

图9 渣土改良前后纵向地面沉降量对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of longitudinal ground settlement before and after muck improvement

以垂直联络通道中心横向监测断面为对象,对比分析渣土改良前后盾构施工带来的横向地面沉降。渣土改良前后横向地面沉降对比,如图 10 所示。由图 10 可知:随着盾构掘进进行,地面沉降持续增加;在盾构靠近断面 S2 前出现明显的沉降槽,在通过断面 S3 时地面沉降显著增加;在通过断面 S5、S6 时,盾构掘进接近完成且断面 S6 处浆液固结,稳定后地面沉降量达到最大值,横向地面沉降量在 3 mm 以内;盾构掘进的影响区域在以联络通道为中心附近 20 m 范围内;联络通道掘进对其正上方影响最大,其影响程度同盾构掘进管片环与监测断面的距离呈负相关。

4 结语

1) 针对滨海地区地铁隧道联络通道工程开展渣土泡沫剂改良试验。当泡沫剂质量分数小于 3% 时,发泡倍率未达到峰值,无法充分利用泡沫剂原液;当泡沫剂质量分数超过 3% 时,泡沫剂半衰期与泡沫质量分数成反比;改良渣土的最优泡沫剂质量分数为 3%。

2) 泡沫剂能显著改善渣土性能,减少盾构施工阻力。针对滨海地区典型粉质黏土开展不同泡沫剂注入比下渣土的流动性、密度、压缩系数、抗剪强度、渗透系数对比试验,综合考虑试验效果、现场需

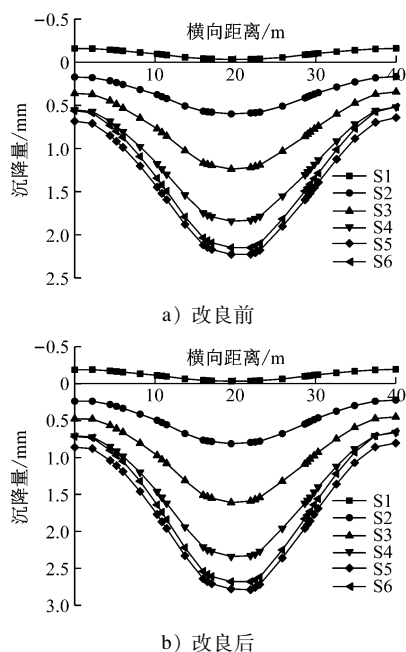


图10 渣土改良前后横向地面沉降量对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of transverse ground settlement before and after muck improvement

求、经济和绿色施工等方面,确定依托工程的最佳泡沫剂注入比为20%。

3) 结合依托工程对比研究渣土改良前后盾构掘进参数变化,在保障掌子面稳定的前提下,采用室内试验得到的泡沫剂注入比最优方案降低了盾构刀盘扭矩,同时减小了油缸顶推力,使得渣土排出顺利。

4) 通过数值模拟研究了渣土改良前后地面横、纵向沉降变化,发现渣土改良后横、纵向地面沉降量略微增大,但仍远小于规范限值。

参考文献

- [1] 魏康林. 土压平衡式盾构施工中“理想状态土体”的探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(1): 67.
WEI Kanglin. On the "ideal soil" in the earth pressure balanced shield tunnelling[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(1): 67.
- [2] 王明胜, 路军富, 罗奥雷. 粉质黏土地层隧道盾构施工渣土改良剂试验[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 74.
WANG Mingsheng, LU Junfu, LUO Aolei. Experiment on soil improver for shield tunnel construction in silty clay stratum[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(5): 74.
- [3] 刘朋飞, 王树英, 阳军生, 等. 渣土改良剂对黏土液塑限影响及机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 91.

- LIU Pengfei, WANG Shuying, YANG Junsheng, et al. Effect of soil conditioner on Atterberg limits of clays and its mechanism [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 91.
- [4] 程池浩, 赵国强, 廖少明, 等. 武汉老黏土地层土压盾构适应性研究[J]. 施工技术, 2016, 45(19): 105.
CHENG Chihao, ZHAO Guoqiang, LIAO Shaoming, et al. Adaptability study of EPB shield machine in hard clay in Wuhan [J]. Construction Technology, 2016, 45(19): 105.
- [5] 李培楠, 黄德中, 黄俊, 等. 硬塑高黏度地层盾构施工土体改良试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 59.
LI Peinan, HUANG Dezhong, HUANG Jun, et al. Experimental study on soil conditioning of shield construction in hard-plastic high-viscosity layer [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(1): 59.
- [6] AVUNDUK E, COPUR H, TOLOUEI S, et al. Possibility of using torvane shear testing device for soil conditioning optimization [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103665.
- [7] ZUMSTEG R, LANGMAACK L. Mechanized tunneling in soft soils: choice of excavation mode and application of soil-conditioning additives in glacial deposits [J]. Engineering, 2017, 3(6): 863.
- [8] WAN Z, LI S, YUAN C, et al. Soil conditioning for EPB shield tunneling in silty clay and weathered mudstone[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(9): 06021020.
- [9] 赵世森, 李树忱, 王鹏程, 等. 土压平衡盾构渣土改良泡沫半衰期细观测定方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 195.
ZHAO Shisen, LI Shuchen, WANG Pengcheng, et al. Mesoscopic measurement method of foam half-life for soil conditioning of earth pressure balance shield[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 195.
- [10] 易鹏程, 陈志敏, 张常书. 粉质黏土层土压平衡盾构施工中的渣土改良技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 177.
YI Pengcheng, CHEN Zhimin, ZHANG Changshu. Residue improvement technology for EPB shield construction in silty clay soil [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 177.

· 收稿日期:2022-07-31 修回日期:2022-09-15 出版日期:2025-01-10

Received:2022-07-31 Revised:2022-09-15 Published:2025-01-10

· 通信作者:姜鹏,高级工程师,1301690900@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