

富水粉细砂层盾构渣土改良与喷涌防治试验研究^{*}郭世情¹ 陈 汉² 蒋沛峰¹ 郭鹏飞³ 孙 毅³ 许平保⁴ 狄宏规⁴

(1. 中国铁建股份有限公司南京地铁9号线一期工程施工总承包, 210019, 南京;

2. 南京地铁集团有限公司, 210008, 南京; 3. 中铁十五局集团有限公司, 200070, 上海;

4. 同济大学交通学院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 土压平衡盾构施工穿越富水粉细砂层时, 因地层摩擦性大、流塑性差、渗透性高等特点, 需通过渣土改良提升施工安全性。[方法] 以南京地铁9号线(以下简称“9号线”)清河路站—绿博园站区间为例, 采用泡沫剂、膨润土及黏土作为改良剂, 开展渣土改良试验, 确定了每种改良剂和水的最佳配合比(质量比); 在此基础上采用单一改良剂和混合改良剂方案进行室内渣土改良搅拌试验、坍落度试验和渗透试验。明确了粉细砂层的渣土改良范围。以改良后的渣土坍落度为125~175 mm, 渗透系数超过 1×10^{-3} cm/s为控制指标, 提出富水粉细砂层渣土改良方案。[结果及结论] 单一改良剂优化试验中, 巴斯夫泡沫剂质量分数建议为3%, 钠基膨润土泥浆土水配合比宜为1:9, 黏土泥浆土水配合比宜为1:5。单一改良剂在坍落度方面改善优异, 使用黏土改良的渣土, 具有更好的流塑性。混合改良剂的搅拌电流和渗透系数比单一改良剂要小, 表明其在渣土的摩擦性和渗透性方面改善突出, 其中泡沫剂与膨润土的配合比为2:1的渣土改良方案较好。富水粉细砂层渣土改良方案为: 泡沫剂改良方案下, 泡沫剂的注入率为20%~30%; 膨润土改良方案下, 膨润土的注入率为15%~20%; 黏土改良方案下, 黏土的注入率为40%~45%; 泡沫剂与膨润土的配合比为1:1的改良方案下, 改良剂的注入率为20%; 泡沫剂与膨润土的配合比为2:1的改良方案下, 改良剂的注入率为20%; 泡沫剂与黏土的配合比为1:2的改良方案下, 改良剂的注入率为20%~40%。

关键词 城市轨道交通; 盾构; 渣土改良试验; 喷涌防治试验; 富水粉细砂层

中图分类号 TU411.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230555

Experimental Study on Slurry Improvement and Gushing Control in Water-rich Silty Fine Sand Layers

GUO Shiqing¹, CHEN Han², JIANG Peifeng¹, GUO Pengfei³, SUN Yi³, XU Pingbao⁴, DI Honggui⁴

(1. Nanjing Metro Line 9 Phase I Construction Contract,

China Railway Construction Corporation Limited, 210019, Nanjing, China; 2. Nanjing Metro Group Co., Ltd., 210008, Nanjing, China; 3. China Railway 15th Bureau Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China; 4. College of Transportation, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] During EPB (earth pressure balance) shield tunneling through the water-rich silty fine sand layers, the ground is characterized by high friction, poor flow plasticity, and strong permeability. These features necessitate slurry improvement to enhance construction safety. [Method] Taking the section between Qinghe Road Station and Green Expo Park Station of Nanjing Metro Line 9 (hereinafter referred to as 'Line 9') as case study, improvement agents including foam, bentonite, and clay are used to conduct slurry modification experiments. Thus, the optimal mass ratios between each agent and water are determined. On this basis, laboratory tests—including mixing, slump, and permeability tests—are conducted using both individual and combined improvement agents to define applicable range of slurry improvement in silty fine sand layers. A slurry improvement plan for water-rich silty fine sand is proposed, with a target slump of 125-175 mm and a permeability coefficient exceeding 1×10^{-3} cm/s as control indicators. [Result & Conclusion] In the optimization tests of individual improvement agents, the recommended BASF foam content is 3% by mass, the bentonite-to-water mass ratio should be 1:9, and the clay-to-water ratio be 1:5. Individual agents significantly improve the slump performance, and slurry modified with clay show better flow plasticity. Mixed agents exhibited lower mixing current and permeability coefficient compared to single agents, indicating their superior improvement in reducing slurry friction and permeability. Among the combinations tested, a foam-to-bentonite ratio of 2:1 yielded better performance. The recommended slurry improvement schemes for water-rich silty fine sand layers are as follows: foam-only improvement plan with foam injection rate of 20% -

^{*} 上海市科委基础性研究自然基金计划项目(20ZR1459900)

30% ; bentonite-only improvement plan with bentonite injection rate of 15% -20% ; clay-only improvement plan with clay injection rate of 40% -45% ; foam-bentonite 1:1 agent improvement plan with agent injection rate of 20% ; foaming-bentonite 2:1 agent improvement plan with agent injection rate of 20% ; and foaming-clay 1:2 agent improvement plan with agent injection rate of 20% -40% .

Key words urban rail transit; shield; slurry improvement experiment; gushing control test; water-rich silty fine sand layer

在富水、渗透性强的砂性层中采用土压平衡盾构机施工掘进时,存在土体黏聚力低、塑性流动状态差等问题,将会导致进入土仓的渣土具有透水性差、级配不良等问题^[1-3]。当渣土不及时处理或处置不当时,盾构机土仓内难以保压,地下水将击穿土仓内渣土,通过螺旋输送机形成水流通道,进而引起喷涌,对施工安全构成严重威胁^[4-5]。

渣土改良技术可降低螺旋输送机喷涌风险,通过添加渣土改良剂改善土仓内土体的流动状态,改良后的渣土应具备低摩擦、高流动、低渗透等特性^[6]。文献[7]认为渗透系数小于 10^{-3} cm/s 时土体具有良好的抗渗能力。文献[8]认为泡沫剂最佳质量分数为 3%,当泡沫剂注入率为 20% ~ 30%,膨润土泥浆注入率为 10% 时,改良效果最优。文献[9]发现膨润土泥浆土水配合比(质量比)为 1:8,注入率为 10% ~ 20%,泡沫剂注入率为 15% ~ 20% 时的渣土改良效果较好。文献[10]通过室内试验可得,对砂土地层,泡沫剂的加入量在 14% ~ 15% 时效果较好。文献[11]通过分析古河道分布、复合地层组合及地下水连通性,指出古河道砂砾层的高渗透性与基岩裂隙水的非均一性是诱发涌水涌砂的主控地质因素。文献[12]指出非离子聚合物泡沫剂的长链分子结构可有效吸附细颗粒形成抗渗骨架。文献[13]发现掺入质量分数为 0.5% 的聚丙烯纤维,可显著提升渣土无侧限抗压强度。文献[14]研究得出泡沫-膨润土-聚合物协同体系可实现渗透系数降低 3 个数量级。文献[15-16]通过 BP(反向传播)神经网络与相关向量机模型精准预测坍塌落度、渗透系数等参数,为现场改良提供理论支撑。文献[17]研究土压平衡盾构机穿越高渗透、高水压砂性土层时,发现膨润土泥浆改善砂土渗透性优于泡沫剂,但泡沫剂能够较好地改善砂土的流动

性。文献[18]通过搅拌试验来评价改良渣土的摩擦性,同时发现采用混合改良剂比单一改良剂改良渣土效果要好。

综上所述,目前许多学者对渣土改良的效果缺少综合的研究,评价指标较为单一,并且采用渣土改良材料基本一致。因此,本文以南京地铁 9 号线(以下简称“9 号线”)清河路站—绿博园站区间为例,对掌子面砂土进行颗粒级配分析,在采用泡沫剂、膨润土的基础上,进一步选择黏土进行改良试验,充分利用现场材料,并通过搅拌试验、坍塌落度试验、渗透试验,综合评价渣土的摩擦性、流动性及抗渗性,确定了粉细砂层下的渣土改良方案,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

9 号线清河路站—绿博园站区间长 804 m,均为地下线,盾构隧道管片外径 6.8 m,区间隧道埋深范围为 14 ~ 26 m。区间地下水类型主要为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水,地下水丰富,承压水位较高。盾构施工主要穿越地层为粉细砂层,渗透系数较大,开挖过程中极易引起螺旋输送机喷涌发生。

图 1 为测定的现场粉细砂层级配曲线。根据砂土试样粒径分布曲线,计算得到不均匀系数 C_u 小于 5,曲率系数 C_c 为 1.77,为级配不良粉细砂。本研究将通过实验室配置该粒径集配砂土,开展渣土改良试验。

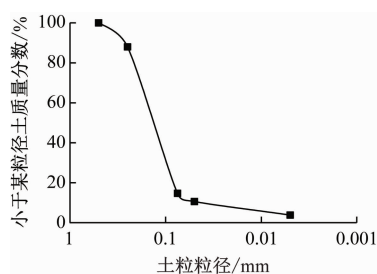


图 1 砂土试样粒径分布曲线

Fig. 1 Particle diameter distribution curve of sand samples

2 渣土改良试验

2.1 试验材料

试验材料包括现场级配砂土、巴斯夫 SLF34 型发泡剂、钠基膨润土及实验室黏土。土体物理力学参数取值见表 1。

表 1 土体物理力学参数取值

Tab.1 Values of soil physical and mechanical parameters

含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
53.2	38.3	18.3	2.1	18.8	2.2

2.2 试验内容

本文采用改良剂优化试验来确定改良剂的最佳配合比,主要通过泡倍率及泡沫半衰期来评价泡沫剂的稳定性和膨胀性,通过使用 NDJ-5S 型数字式旋转黏度计(见图 2 a))测定改良剂泥浆性能。文献[17]指出,盾构机施工要求膨润土黏度在 20 ~ 30 mPas 范围内较好。

采用渣土改良试验综合评判渣土改良效果。其中使用搅拌机(见图 2 b)),记录渣土的搅拌电流,并对比不同措施下改良渣土的摩擦性;使用坍落筒(见图 2 c))测试坍落度来评价渣土的流动性;通过 TST70 型渗透仪(见图 2 d))评价改良渣土的渗透性。



图 2 试验装置

Fig.2 Experiment devices

2.3 试验方案

2.3.1 改良剂优化试验方案

通过文献[19]可知,采用泡沫剂对渣土进行改良时,泡沫剂的质量分数会影其发泡率和半衰期。采用膨润土和黏土对渣土进行改良时,改良剂泥浆性能通常根据泥浆黏度确定。本次试验中,具体的改良剂优化试验方案如表 2 所示。

2.3.2 渣土改良试验方案

渣土改良方案分别为泡沫剂改良方案、膨润土改良方案、黏土改良方案、泡沫剂与膨润土配合比

表 2 改良剂优化试验方案

Tab.2 Agent optimization experiement schemes

泡沫剂质量分数/%	土水配合比	
	膨润土泥浆	黏土泥浆
1	1:6	1:4
2	1:7	1:5
3	1:8	1:6
4	1:9	1:7
5	1:10	1:8
6	1:12	1:9
	1:14	1:10
	1:16	1:12
	1:18	1:14
	1:20	1:16

为 1:1 改良方案、泡沫剂与膨润土配合比为 2:1 改良方案、泡沫剂与黏土配合比为 1:2 改良方案。不同改良剂下渣土改良试验方案如表 3 所示。

表 3 不同改良剂下渣土改良试验方案

Tab.3 Slurry improvement experiment schemes with different agents

改良剂	注入率/%				
泡沫剂	10	20	30	35	40
膨润土	10	15	20	25	30
黏土	25	30	35	40	45
泡沫剂与膨润土配合比为 1:1	10	20	30	40	50
泡沫剂与膨润土配合比为 2:1	10	20	30	40	50
泡沫剂与黏土配合比为 1:2	10	20	30	40	50

3 试验结果分析

3.1 改良剂优化效果

3.1.1 泡沫剂优化效果分析

图 3 为不同质量分数下泡沫剂的发泡体积和半衰期。由图 3 a)可以发现:泡沫剂的发泡体积随着其质量分数的增大而逐渐增多,尤其是当泡沫剂质量分数小于 3% 时,其发泡体积增加迅速;当泡沫剂质量分数大于 3% 时,其发泡体积趋于稳定。由图 3 b)可以发现:当泡沫剂质量分数等于 3% 时,其半衰期为 380 s,其发泡体积为 670 mL。综合考虑,本文使用泡沫剂质量分数为 3% 开展试验。

3.1.2 膨润土和黏土优化结果分析

图 4 为不同土水配合比下膨润土泥浆和黏土泥

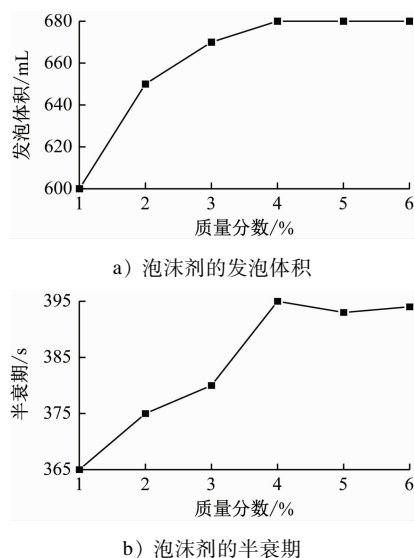


图3 不同质量分数下泡沫剂的发泡体积和半衰期
Fig. 3 Foam volume and half-life of foaming agent under different mass fractions

浆的黏度。由图4可以发现:随着土水配合比的增大,膨润土泥浆黏度呈增大趋势。据文献[7]的研究结果,当膨润土泥浆黏度控制在20~30 mPas范围内时,膨润土与水的最佳配合比为1:9。通过试验,测得该配合比下泥浆黏度为22 mPas。对于黏土改良剂,选用土水配合比为1:5的黏土泥浆进行改良试验,此时黏土泥浆黏度为28 mPas。

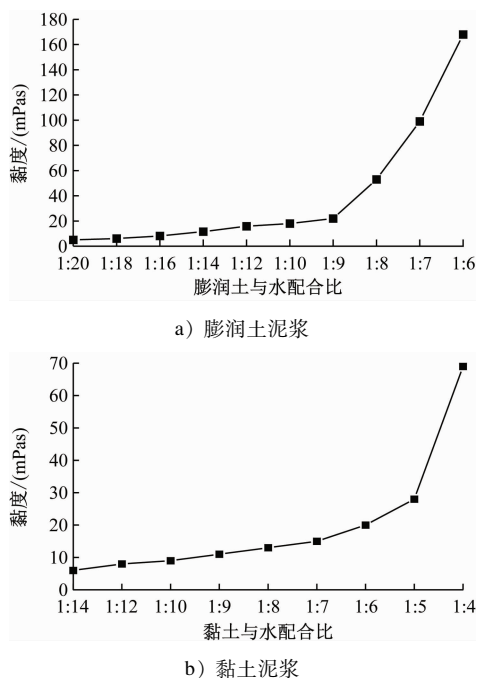


图4 不同土水配合比下膨润土泥浆和黏土泥浆的黏度
Fig. 4 Viscosity of bentonite and clay slurries under different soil-to-water ratios

3.2 不同方案下渣土改良对比分析

3.2.1 搅拌试验

图5汇总了6种改良剂注入率下的搅拌电流结果。由图5可见:整体上搅拌电流会随着改良剂注入量的提高而逐渐降低,同时也意味着盾构机土仓内所需的扭矩降低,更有利于盾构机的顺利工作;混合改良剂方案下的搅拌电流明显低于单一改良剂方案下的搅拌电流。因此采用多种混合改良剂可以更好地改善渣土的流动性,降低刀盘扭矩。

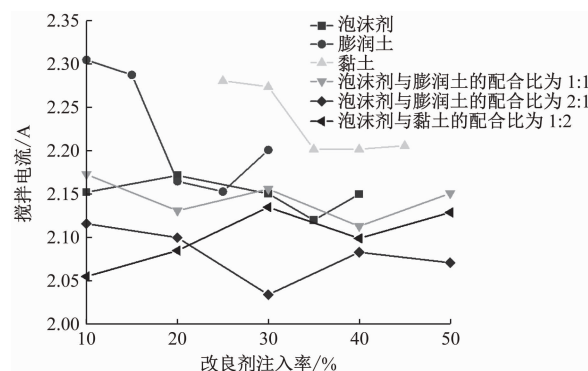


图5 不同改良剂注入率-搅拌电流关系曲线
Fig. 5 Relation curves of injection rates of different agents and mixing current

单一改良剂方案下,搅拌电流由大到小依次为黏土、膨润土、泡沫剂。膨润土、黏土泥浆混合砂土后,通过填充孔隙形成表面泥膜,从而改善了流动性;同时膨润土水化后转为膏状,从而提升了稳定性。泡沫剂可以大幅降低液体表面张力,将泡沫剂与渣土充分混合后,渣土空隙充满泡沫,其整体流动性将大大提高^[20]。

混合改良剂方案下,泡沫剂与膨润土的配合比为2:1时,搅拌电流最低。而对于泡沫剂与黏土的配合比为1:2的改良方案,以及泡沫剂与膨润土的配合比为1:1的改良方案,由于实验室使用的黏土含水量为50%,黏土质量分数仅占1/3,泡沫剂起主导作用,因此泡沫剂与黏土的配合比为1:2的改良方案下,渣土的搅拌电流略小于泡沫剂与膨润土的配合比为1:1的改良方案下渣土的搅拌电流。

3.2.2 坍塌度试验

图6汇总了6种改良剂注入率下的坍塌度结果。由图6可见:整体上坍塌度随着改良剂注入率的提高而逐渐增大。其中,膨润土改良方案>泡沫剂与膨润土的配合比为1:1的改良方案>泡沫剂与膨润土的配合比为2:1的改良方案>泡沫剂改良方

案>黏土改良方案>泡沫剂与黏土的配合比为1:2的改良方案。但对于实际工程,坍落度处于125~175 mm范围内^[17]时,渣土的工作性能较好。

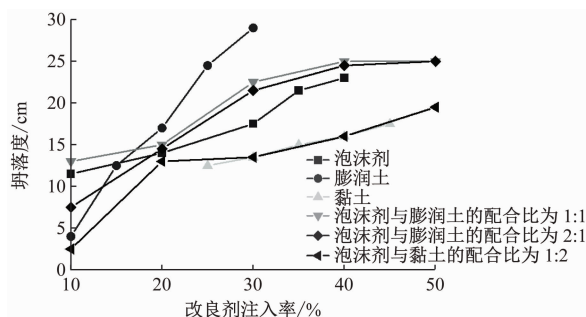


图6 不同改良剂注入率-坍落度关系曲线

Fig. 6 Relation curves of injection rates of different improvement agents and slump

同时可以发现,混合改良剂方案下的坍落度值处于单一改良剂方案下的坍落度值之间,并且其中一种改良剂质量分数越大,其坍落度越靠近单一使用该种改良剂的效果,这种规律在黏土和泡沫剂混合改良剂方案下也是存在的。

3.2.3 渗透试验

图7汇总了6种改良剂注入率下的渗透试验结果。由现场勘测可知,粉细砂的渗透系数为 $1.5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。通过渗透系数试验,发现改良渣土的渗透系数会随着改良剂注入率的提高而减小,远小于粉细砂本身的渗透系数。改良后的渣土渗透系数基本均小于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,满足普遍渣土渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的要求。单一改良剂方案下的渗透系数明显高于混合改良剂方案下的渗透系数,其中泡沫剂与膨润土的配合比为2:1的改良渣土的渗透系数普遍高于 10^{-5} cm/s ,最优时达到了 $1.4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。因此采用混合改良剂可以更好地改善渣土的渗透性,降低施工风险。

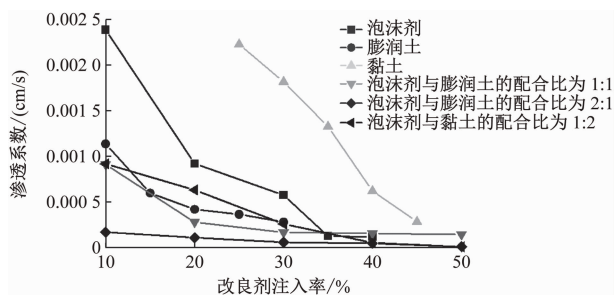


图7 不同改良剂注入率-渗透系数关系曲线

Fig. 7 Relation curves of injection rates of different improvement agents and permeability coefficient

单一改良剂方案下,3种改良剂效果差异显著,这是由于钠基膨润土颗粒的单位晶层中的键较弱,水容易进入膨润土单位晶层,使晶格发生10~40倍的体积膨胀,因此钠基膨润土颗粒吸水膨胀后渗透性降低至几乎不透水^[20];并且膨润土泥浆会对砂土孔隙进行充填,降低砂土渗透系数,因此膨润土改良渣土渗透系数的方案效果最好。而当泡沫剂注入后,砂土孔隙中加入了大量的封闭气体,这些封闭气体在砂土中以气泡的形式阻断了孔隙水的渗流通道,从而达到改良土体渗透性的目的。对于黏土,黏土泥浆能够降低渣土渗透性,这是由于黏土泥浆中存在大量的细小颗粒,填充了渣土中的微小空隙。

混合改良剂方案下,泡沫剂与膨润土的配合比为2:1方案的渗透系数最低($1.4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$),抗渗性最优;黏土改良方案下,渣土坍落度达125~175 mm,流塑性最佳。

总体而言,以上6种渣土改良方案均能够在一定程度上改善渣土的摩擦性、流塑性和渗透性,并且部分注入率下改善效果十分突出。然而,在实际施工过程中,需要满足一定的施工和易性。因此本文根据前人的研究,以改良后的渣土坍落度为125~175 mm,渗透系数超过 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 为控制指标,选择出相应的渣土改良方案为:泡沫剂改良方案下改良剂的注入率为20%~30%;膨润土改良方案下改良剂的注入率为15%~20%;黏土改良方案下改良剂的注入率为40%~45%;泡沫剂与膨润土的配合比为1:1的改良方案下改良剂的注入率为20%;泡沫剂与膨润土的配合比为2:1的改良方案下改良剂的注入率为20%;泡沫剂与黏土的配合比为1:2的改良方案下改良剂的注入率为20%~40%。

4 结论

1) 单一改良剂方案下,巴斯夫泡沫剂质量分数宜为3%;钠基膨润土中膨润土和水的配合比采用1:9;含水量50%的黏土中,黏土和水的配合比采用1:5。

2) 在6种改良方案下,随着改良剂注入率的提高,改良渣土的摩擦性、流塑性和渗透性均有较好的改善。混合改良剂作用下,土体的搅拌电流和渗透系数比单一改良剂的要小,表明其在渣土的摩擦性和很渗透性方面改善效果突出。其中泡沫剂与膨润土的配合比为2:1的渣土改良方案较好。单一

改良剂在坍塌度方面改善优异,尤其是通过黏土改良的渣土,具有更好的流塑性。

3) 根据坍塌度和渗透系数的要求,提出了粉细砂层渣土改良方案,泡沫剂改良方案下改良剂注入率为 20%~30%;膨润土改良方案下改良剂注入率为 15%~20%;黏土改良方案下改良剂注入率为 40%~45%;泡沫剂与膨润土的配合比为 1:1 和 2:1 改良方案下改良剂注入率为 20%;泡沫剂与黏土的配合比为 1:2 的改良方案下改良剂的注入率为 20%~40%。

参考文献

- [1] 齐飞,刘江涛,钟小春,等. 泡沫稳定性对土压平衡盾构砂卵石渣土改良效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 105.
QI Fei, LIU Jiangtao, ZHONG Xiaochun, et al. Effect of foam stability on improvement of sandy pebble stratum in EPB shield tunneling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 105.
- [2] 黄逢源,张康健,陈登开,等. 富水复合地层土压平衡盾构渣土改良试验研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 262.
HUANG Fengyuan, ZHANG Kangjian, CHEN Dengkai, et al. Experimental study on the muck improvement of earth pressure balance shield tunnelling in water-bearing composite stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 262.
- [3] 邱龑,杨新安,唐卓华,等. 富水砂层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1703.
QIU Yan, YANG Xin'an, TANG Zhuohua, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in watered sandy stratum[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1703.
- [4] 刘国栋,鞠义成,何普鑫. 渣土保压泵送技术在富水复合地层土压盾构施工防喷涌控变形中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 32.
LIU Guodong, JU Yicheng, HE Puxin. Application of slag pressure-retaining pumping technology in anti-gushing and deformation control for earth pressure shield in water-rich composite stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 32.
- [5] 孟凡伦. 高含水率盾构废弃泥浆固化及强度特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 152.
MENG Fanlun. Research on solidification and strength characteristics of shield waste mud with high moisture content[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 152.
- [6] WU Y, NAZEM A, MENG F, et al. Experimental study on the stability of foam-conditioned sand under pressure in the EPBM chamber[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103590.
- [7] 毕佳蕾,沈振中,旦增赤列. 振冲碎石桩复合地基的等效渗透系数计算方法[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 87.
BI Jialei, SHEN Zhenzhong, Tenzin Tinley. Calculation method of equivalent permeability coefficient for vibroflotation gravel pile composite foundation[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 87.
- [8] 徐琳琳,余金,蒋亚龙,等. 泡沫性能测试及其在富水砂层渣土改良中应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 1): 345.
XU Linlin, YU Jin, JIANG Yalong, et al. Testing of foam properties and its application in soil conditioning for water bearing sandy grounds[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 345.
- [9] 隋冬冬. 无水砂层渣土改良技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
SUI Dongdong. The technique of sediment improvement in sandy bed without water[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [10] 王卫华. 泡沫剂在土压平衡盾构中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
WANG Weihua. Research and application on foam agent in earth pressure balanced shield tunneling[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [11] 顾雷雨,杨晶晶,赵新杰,等. 富水砂层地下工程涌水涌砂主控地质因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增刊 1): 275.
GU Leiyu, YANG Jingjing, ZHAO Xinjie, et al. Research on main geological factors controlling water gushing and sand gushing of underground engineering in water-rich sand layer[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 275.
- [12] 万泽恩,李树忱,赵世森,等. 富水砂性土层盾构渣土改良试验与喷涌防治技术[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 83.
WAN Zeen, LI Shuchen, ZHAO Shisen, et al. Soil conditioning tests and screw conveyor spewing prevention technology of earth balance pressure shield tunneling in water-rich sandy stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(3): 83.
- [13] 张建勇. 聚丙烯纤维改性盾构渣土强度特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 400.
ZHANG Jianyong. Study on the strength characteristics of polypropylene fiber modified smuck[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 400.
- [14] 唐卓华,徐前卫,杨新安,等. 富水砂层盾构掘进渣土改良技术[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 153.
TANG Zhuohua, XU Qianwei, YANG Xin'an, et al. Soil conditioning technology for shield tunnelling in a water-rich sandy stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 153.
- [15] 展超. 基于 BP 神经网络的富水砂层渣土改良试验效果预测[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 988.
ZHAN Chao. Experimental effect prediction of ground conditioning of water-rich sandy stratum based on BP neural network[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 988.

(下转第 93 页)

- ZHENG Gang, LEI Yawei, CHENG Xuesong, et al. Influences and mechanisms of anchor failure on anchored pile retaining system of deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 421.
- [12] 朱湘旭,徐昭辰,章定文,等. 硬质地层中偏压基坑支护结构受力特性研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):166.
- ZHU Xiangxu, XU Zhaochen, ZHANG Dingwen, et al. Behaviors of supporting structures of asymmetrically loaded deep excavation in hard soil layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (S2): 166.
- [13] 张后全,吴宇,陈彦龙,等. 煤矿锚杆安装质量无损检测方法与应用[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(2):283.
- ZHANG Houquan, WU Yu, CHEN Yanlong, et al. Non-destructive testing method and its application on bolt installation quality in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 283.
- [14] 刘学,郭廷科,沈龙,等. 土岩复合地层不同锚固长度预应力锚索锚固机制及现场测试[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增刊1):154.
- LIU Xue, GUO Tingke, SHEN Long, et al. Anchorage mechanism and field test of prestressed anchor cables with different anchorage lengths in soil-rock composite strata [J]. Tunnel Construction, 2023, 43 (S1): 154.
- [15] 余瑜,刘新荣,刘永权. 基坑锚索预应力损失规律现场试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(5):1932.
- YU Yu, LIU Xinrong, LIU Yongquan. Field experimental investigation on prestress loss law of anchor cable in foundation pits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1932.
- [16] 刘永权,刘新荣,谢应坤,等. 基坑预应力锚索初始张拉锁定值取值规律探讨[J]. 岩土力学,2018,39(6):2164.
- LIU Yongquan, LIU Xinrong, XIE Yingkun, et al. Discussion on selection law of initial stretch locking value of prestressed anchor cables in foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2164.
- [17] 罗贤民,黄勇,陆剑明,等. 明挖异形基坑下穿高架桥及近接航站楼施工的影响与控制[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(5):113.
- LUO Xianmin, HUANG Yong, LU Jianming, et al. Construction impact and control of open-excavation irregular shape foundation pit under-passing viaduct bridge and adjoining terminal building [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 113.
- [18] 白学平. 河湖相沉积软土地层地铁车站深基坑施工位移分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(6):62.
- BAI Xueping. Analysis of metro station deep foundation pit construction displacement in fluvial and lake sedimentary soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 62.
- [19] 刘季富. 富水砂卵石地层大型地铁车站基坑变形与支护结构受力分析[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(6):43.
- LIU Jifu. Foundation pit deformation and supporting structure stress analysis of large metro station in water-rich sandy cobble stratum[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 43.
- [20] 王渭明,曹正龙,王刚刚,等. 厚冲积层锚索预应力损失研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1607.
- WANG Weiming, CAO Zhenglong, WANG Ganggang, et al. Prestress loss of anchor cables in thick alluvial clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1607.
- 收稿日期:2023-06-05 修回日期:2023-09-01 出版日期:2025-06-10
Received:2023-06-05 Revised:2023-09-01 Published:2025-06-10
· 第一作者:孙超,高级工程师,lwtg_201@126.com
通信作者:徐东明,硕士研究生,wangkexuehblg@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

(上接第86页)

- [16] 张研,梁卓悦,廖逸夫. 基于相关向量机的富水砂层渣土改良试验效果预测[J]. 科学技术与工程,2021,21(17):7293.
- ZHANG Yan, LIANG Zhuoyue, LIAO Yifu. Prediction of slag improvement in water-rich sand layer based on relevance vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (17): 7293.
- [17] 齐跃军. 泡沫和膨润土泥浆对改良砂土渗透性的研究[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(3):26.
- QI Yuejun. Influence of foam and bentonite slurry on conditioning sand soil permeability [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25 (3): 26.
- [18] 张润来,宫全美,周顺华,等. 砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(5):673.
- ZHANG Runlai, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, et al. Soil conditioning tests for earth pressure balance shield applications in sandy cobble strata [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(5): 673.
- [19] 陈中天. 基于渗透性试验的土压平衡盾构泡沫渣土改良研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- CHEN Zhongtian. Study on soil conditioning for EPB shields by permeability tests[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [20] 李文辉. 土压平衡盾构中改良剂对砂土渗透性影响研究[D]. 北京:中国地质大学,2020.
- LI Wenhui. Study on the effect of improvers on the permeability of sandy soil in soil pressure balance shield[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- 收稿日期:2023-05-18 修回日期:2023-05-31 出版日期:2025-06-10
Received:2023-05-18 Revised:2023-05-31 Published:2025-06-10
· 通信作者:郭世情,高级工程师,gsq-73@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