

# 富水砂层地铁盾构隧道渣土混合改良的 流塑性与渗透性

郑选荣<sup>1</sup> 刘莹<sup>1</sup> 丁鹏程<sup>1</sup> 李鹏<sup>2</sup> 郭峰<sup>2</sup> 陆宏朝<sup>2</sup> 李军锋<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安; 2. 中铁北京工程局集团有限公司, 230088, 合肥)

**摘要** [目的] 盾构在富水砂层中掘进时, 易产生刀盘扭矩过高、磨损严重以及螺旋输送机喷涌等问题。为了保证施工的安全性, 需对渣土进行改良。[方法] 以西安地铁16号线某盾构区间工程为依托, 根据砂土地层自稳性差、摩擦性高、渗透率高的特点选取渣土改良剂。通过渣土坍落度试验、渗透试验、现场试验相结合的方式, 采用泡沫单独改良、泡沫及膨润土泥浆混合改良两种方案开展富水砂层渣土改良试验研究。[结果及结论] 实际盾构掘进施工中, 在考虑安全、高效、经济的前提下, 结合室内试验所得数据, 确定采用膨润土泥浆、泡沫混合改良的方案。当膨润土与水质量比为1/8, 发泡液质量分数为3%时, 改良剂性能满足施工要求; 泡沫单独改良渣土受含水率影响大, 含水率越高, 泡沫最佳注入率越小。中砂的最佳改良方案是BIR(膨润土泥浆注入比)为10%, FIR(泡沫注入率)为20%~25%; 砾砂的最佳改良方案是BIR为10%, FIR为35%~40%。工程实践表明, 渣土混合改良效果良好, 盾构掘进参数平稳。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 渣土混合改良; 流塑性; 渗透性; 富水砂层

**中图分类号** U411.4; U455.43

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.03.007

## Study on Flow Plasticity and Permeability of Mixture Conditioned Muck for Metro Shield Tunnel in Water-rich Sand Stratum

ZHENG Xuanrong<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, DING Pengcheng<sup>1</sup>,

LI Peng<sup>2</sup>, GUO Feng<sup>2</sup>, LU Hongchao<sup>2</sup>, LI Junfeng<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China; 2. China Railway Beijing Engineering Group Co., Ltd., 230088, Hefei, China)

**Abstract** [Objective] When tunnel boring machine advancing in the water-rich sand layer, problems such as high cutter torque, serious wear and spout of the screw conveyor can be easily generated. In order to ensure the safety of construction, it is necessary to improve the muck. [Method] Based on a shield tunnel section project of Xi'an Metro Line 16, the muck modifier is selected according to the characteristics of poor self-

stability, high friction and high permeability of sandy soil stratum. By combining slump test, permeability test and on-site test, two schemes of foam alone conditioning and mixed foam-bentonite slurry conditioning are used to carry out the experimental research on muck conditioning in water-rich sand layer.

[Result & Conclusion] In the actual shield tunneling construction, on the premise of safety, efficiency and economy and based on the data obtained in laboratory tests, the conditioning scheme of mixed foam-bentonite slurry is adopted. The performance of the modifier meets the requirements of shield tunneling construction when the ratio of bentonite to water is 1/8 and the foam mass fraction is 3%. The muck conditioning by foam alone is greatly affected by water content. The higher the water content is, the smaller the optimal foam injection rate (FIR) becomes. The best muck conditioning option for medium sand is 10% of the bentonite slurry injection ratio (BIR) and 20%~25% of FIR. The best muck conditioning option for gravel sand is 10% of BIR and 35%~40% of FIR. Engineering practice shows that the muck conditioning has good effect and the parameters of shield tunneling are stable.

**Key words** metro; shield tunnel; muck conditioning; flow plasticity; permeability; water-rich sand stratum

西安富水砂层具有黏聚力小、颗粒间摩阻力大、含水率高等特点, 在盾构掘进过程中, 易出现刀盘扭矩过大、刀盘卡死、刀具损坏等问题<sup>[1]</sup>, 因此渣土改良必不可少。文献[2]分析了渣土粒径对渣土改良的影响。文献[3]通过泡沫改良渣土, 得出砂土的理想坍落度为150~200 mm。文献[4]通过研究发现颗粒大小是影响砂土改良效果的重要因素。文献[5]以泡沫和膨润土泥浆作为改良剂改良砂土地层。文献[6]通过室内试验, 探究各种改良剂单独或共同作用下对富水圆砾地层的改良效果。文献[7]研究膨润土泥浆与泡沫的注入体积配比间的交互影响。

上述研究大多采用一种土样作为渣土改良的

试验土样,缺乏对不同土层渣土改良效果的对比研究,且考虑不同含水率对渣土改良效果的影响研究也较少。本文以西安地铁 16 号线(以下简称“16 号线”)一期区间工程为依托,研究了不同渣土含水率对泡沫改良渣土效果的影响,以及膨润土泥浆与泡沫共同作用对中砂、砾砂两类地层渣土改良效果的影响。

## 1 工程概况

16 号线某隧道区间主要穿越地层为〈2-5-3〉中砂和〈2-7-3〉砾砂,且〈2-5-3〉中砂、〈2-7-3〉砾砂地层粒径大于 2 mm 的体积分数分别占 3.8%、28.7%。

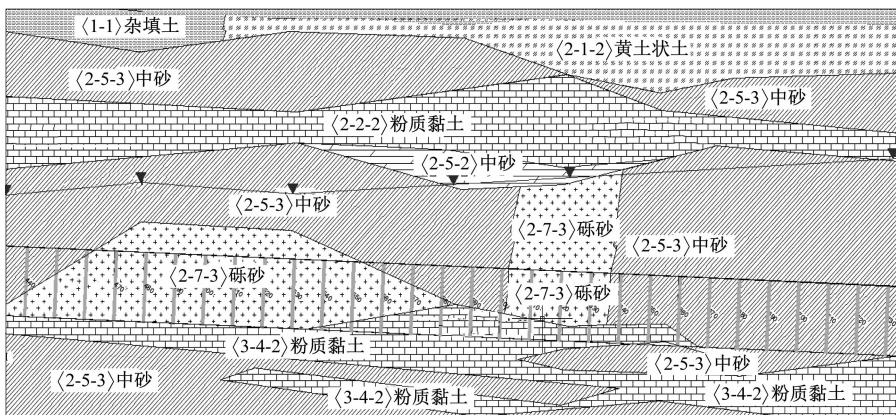


图 1 16 号线某隧道区间部分地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of the tunnel section of Line 16

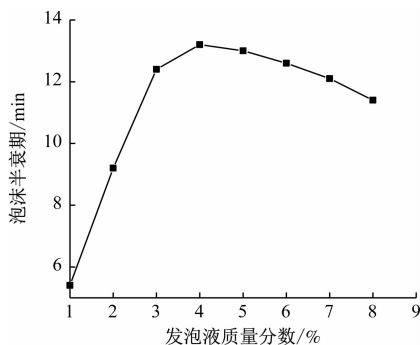


图 2 泡沫的半衰期-发泡液质量分数关系曲线

Fig. 2 Relation graph of foam half-life and mass fraction of foaming solution

从图 2—图 3 可以看出:泡沫半衰期随着发泡液质量分数的增加呈现先增大后减小的趋势,而发泡倍率随着质量分数的增大一直增大。究其原因:随着发泡液质量分数的增加,泡沫延展性变好,产生的泡沫体积变大,数量变多,造成液膜稀释,使得泡沫提前消散;另外泡沫数量过多时,也会导致泡沫连通而形成多边形泡沫,泡沫稳定性变差,使

16 号线某隧道区间部分地质剖面图见图 1。区间地下水主要为孔隙潜水,水位稳定埋深为 11.0 ~ 16.2 m,含水率丰富,渗透性强。

## 2 改良剂调配试验

### 2.1 泡沫调配试验

本次试验采用搅拌法发泡,发泡液来自广州隧吉有限公司,分别配置发泡液质量分数为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%。测量不同质量分数发泡液所产生泡沫的半衰期和发泡倍率,结果见图 2—图 3。

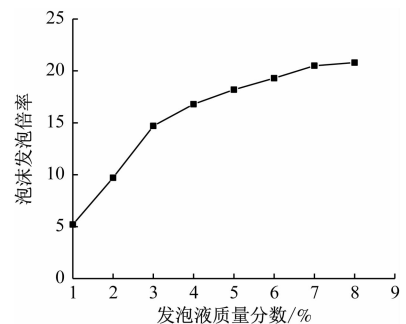


图 3 泡沫的发泡倍率-发泡液质量分数关系曲线

Fig. 3 Relation graph of foaming ratio and mass fraction of foaming solution

得其易破灭。发泡液的质量分数为 3%,半衰期为 12.4 min,发泡倍率为 14.7。

### 2.2 膨润土泥浆调配试验

本次泥浆试验通过测试膨润土泥浆黏度来评价其性能。试验采用马氏漏斗黏度计测量膨润土泥浆黏度。膨润土取用洋县天顺膨润土有限公司生产的纳基膨润土,膨润土、水的质量分数(以下简

称“泥水比”)分别设为 1:10,1:9,1:8,1:7,1:6,对膨润土膨化 24 h,期间每隔 4 h 采用马氏漏斗测量各泥水比下的泥浆黏度。膨润土泥浆黏度-膨化时间关系曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出:膨润土泥浆黏度随时间的增加不断增加,并在 16 h 后趋于稳定。根据工程经验,泥浆膨化黏度在 35 s 以上,能达到盾构施工需求。泥水比 1:8 的膨润土泥浆黏度为 50 s,故本试验采用泥水比 1:8 的膨润土泥浆作为试验泥浆配比。

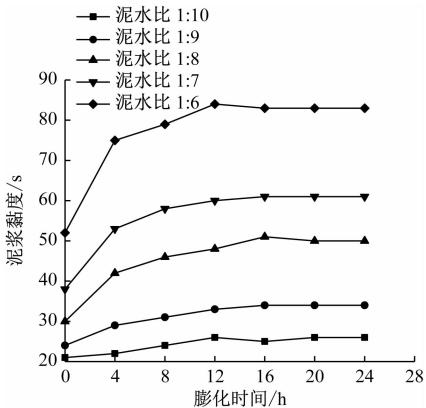


图 4 膨润土泥浆黏度-膨化时间关系曲线  
Fig. 4 Graph of bentonite slurry viscosity and swelling time

3 渣土改良试验实施及分析

3.1 重塑土样的配置

由文献[4]可知,颗粒级配是影响渣土改良的主要因素之一,而不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_a$  是影响颗粒级配的主要参数。本次重塑土样的选取以  $C_u$  和  $C_a$  为切入点,针对现场盾构穿越区段,对地勘资料内砂层土样的  $C_u$  和  $C_a$  进行大量总结归纳后,发现该区段的中砂、砾砂多为  $C_u < 5$  或  $C_a < 1$  的颗粒级配不良砂。选取中砂、砾砂中最具代表性试样的颗粒级配参数配置重塑土样。重塑土样中的中砂、砾砂颗粒级配曲线如图 5 所示。每次试验配土质量为 10 kg。

3.2 泡沫改良试验

根据有关泡沫改良机理<sup>[6]</sup>可知,泡沫改良渣土性能不仅与泡沫本身性能有关,还与渣土的孔隙比、含水率有关。泡沫改良渣土主要通过将泡沫注入渣土孔隙中,以起到润滑、止水的效果,进而改善渣土的流塑性和渗透性。同时渣土含水率的不同,也会影响泡沫改良渣土的效果。为探究不同含水率对泡沫改良渣土性能的影响,本文以中砂为例,

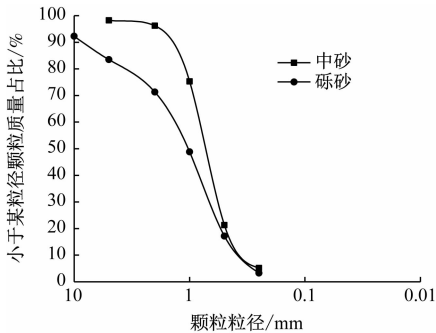


图 5 重塑土样中中砂、砾砂的颗粒级配曲线  
Fig. 5 Particle grading graph of medium sand and gravel sand in reconstructed soil samples

通过改变土样含水率,观测不同 FIR(泡沫注入率)下坍落度和渗透系数的变化趋势,分析含水率对泡沫改良渣土的影响。

渣土不同含水率下中砂坍落度-FIR 的关系曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出:中砂坍落度随 FIR 的增加呈现非线性增长;当含水率为 2.5%,FIR 小于 10% 时,泡沫对渣土流塑性的改良效果微乎其微,究其原因因为渣土内部自由水体积分数不足,导致泡沫液膜中水分被土体颗粒吸收,液膜变相稀释,从而加速泡沫破裂,导致泡沫改良的效果不佳;当含水率为 10% 时,渣土出现析水、析泡现象,从而导致其流塑性过大。由此可见,单独采用泡沫改良渣土的情况下,中砂坍落度受含水率影响波动较大,泡沫单独作用对富水砂层渣土的流塑性改良效果不佳。

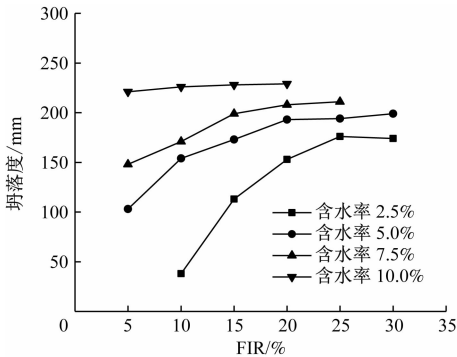


图 6 渣土不同含水率下中砂坍落度-FIR 的关系曲线  
Fig. 6 Graph of medium sand slump and foam injection rate under different water content of muck

渣土不同含水率下渗透系数-FIR 的关系曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出:当含水率为 2.5%,由于土样中水分不足,导致渣土的渗透性能微乎其微;当含水率分别为 5.0%、7.5%,FIR 小于 15%

时,渣土的渗透系数随 FIR 增加迅速降低;当 FIR 大于 15%,含水率分别为 5.0%、7.5% 时,FIR 分别从 25%、15% 两个节点开始,渗透系数随 FIR 的增加不降反增,究其原因,渣土含水率较高的条件下,当 FIR 较大时,泡沫会被自由水裹挟流出,大量泡沫在注入试样后析出,析出的泡沫伴随着水和细颗粒流出,导致土体内部形成细微的涌水通道,降低了土体的保水能力和黏聚能力;当含水率达到 10% 时,土样含水率较大,渣土内自由水体积分数较高,渣土内孔隙几乎被自由水填充,导致泡沫改良渣土效果不佳,注入泡沫后,泡沫会被自由水裹挟流出,起不到改良效果。

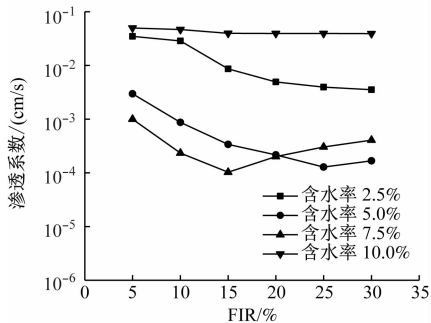


图 7 渣土不同含水率下中砂渗透系数-FIR 的关系曲线

Fig. 7 Graph of permeability coefficient of medium sand and foam injection rate under different water content of muck

综上所述,泡沫单独改良富水砂层的效果不佳。

### 3.3 泡沫、膨润土泥浆混合改良试验

#### 3.3.1 坍落度试验及结果分析

本次试验通过坍落度试验来检测渣土的流塑性。坍落度试验所用的重塑土样按第 3.1 节中的颗粒级配曲线配置。采用膨润土泥浆和泡沫作为改良剂,改良剂配比按第 2 章中的调试结果配置。泥水比取 1:8,BIR(膨润土泥浆注入比)分别取 5%、10% 和 15%。泡沫质量分数采用 3%;FIR 设定从 15% 开始增加,每次增加梯度为 5%,加至 40%。为控制试验变量,方便后续与砾砂进行对比分析,中砂、砾砂的含水率均设定为 10%,且采用相同的 FIR 和 BIR。

经泡沫、膨润土泥浆混合改良后,中砂和砾砂的坍落度-FIR 的关系曲线见图 8—图 9。从图 8—图 9 可以看出:中砂、砾砂的坍落度随 FIR 的增加呈非线性增大;在相同改良剂配比下,改良剂对中砂坍落度的效果比砾砂好,如 FIR 为 30%,BIR 为

10% 时,中砂和砾砂的坍落度分别为 189 mm 和 159 mm。由此可见,不同 BIR 下都能得到符合渣土流塑性的改良配比,因此需通过渗透试验可进一步筛选得出渣土最优改良方案。

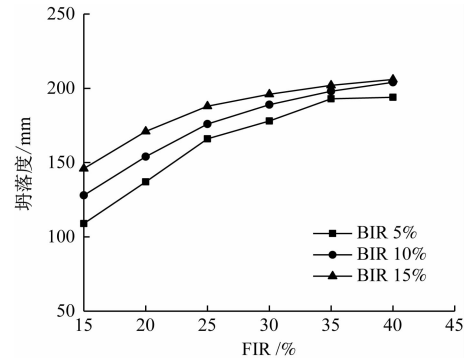


图 8 混合改良后中砂的坍落度-FIR 的关系曲线

Fig. 8 Graph of medium sand slump and foam injection rate after mixture conditioning

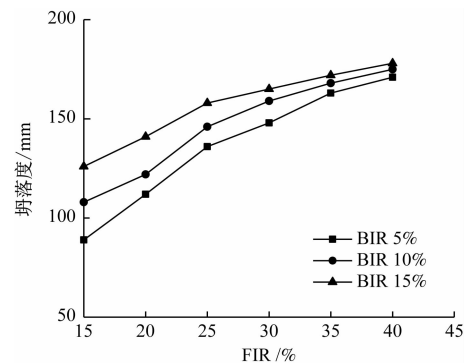


图 9 混合改良后砾砂的坍落度-FIR 的关系曲线

Fig. 9 Graph of gravel soil slump and foam injection rate after mixture conditioning

#### 3.3.2 渗透试验及结果分析

为防止螺旋运输机喷涌,维持掌子面稳定,渣土渗透性是其中不容忽视的一项指标。本文采用自制变水头渗透仪来测量渣土的渗透性。该仪器的主体是 1 个内径为 200 mm,厚度为 10 mm,高度为 650 mm 的有机玻璃筒,试验柱上部连接空气压缩机和调压装置,如图 10 所示。

试验前对自制变水头渗透仪的密封性进行检验,检验其是否有漏水、漏气现象。在保证气密性良好的情况下,向仪器内分层填土,并对土层振捣击实,从仪器内上部注入比土层面高约 10 cm 的水,封闭仪器,打开空气压缩机,增加气压至 90 kPa 并维持恒定,打开排水阀,记录排水量,最后求得渗透系数。改良后中砂、砾砂的渗透系数-FIR 的关系曲

线见图 11—图 12。



图 10 自制变水头渗透仪

Fig. 10 Self-made permeameter

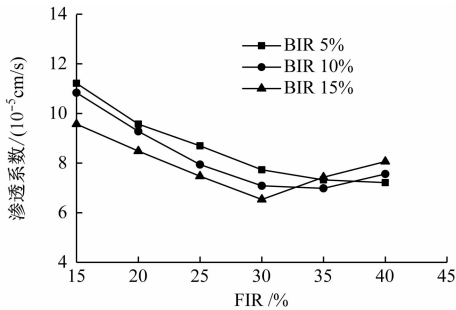


图 11 混合改良后中砂的渗透系数-FIR 的关系曲线  
Fig. 11 Graph of permeability coefficient of medium sand and foam injection rate after mixed conditioning

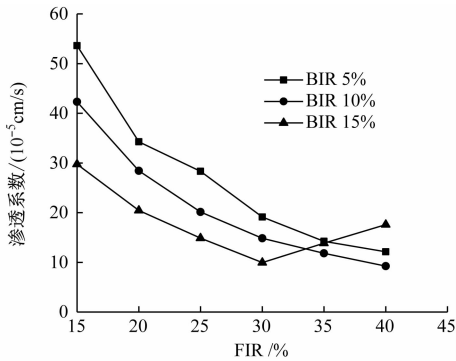


图 12 混合改良后砾砂的渗透系数-FIR 的关系曲线  
Fig. 12 Graph of permeability coefficient of gravel soil and foam injection rate after mixture conditioning

从图 11—图 12 可以看出:改良后中砂、砾砂的渗透系数总体上都随着 FIR 的增加而减小;部分中砂、砾砂的渗透系数在 FIR 增加到一定值时,呈现不降反增的趋势。究其原因为:随着 BIR 的增大,渣土空隙被自由水、膨润土泥浆,以及土中细颗粒填充的空间越多,导致泡沫渗入土体空隙越困难,当 FIR 增加到一定程度后,泡沫会被自由水裹挟流出,析出的泡沫伴随着水和细小颗粒形成小的涌水通

道,从而出现析水、析泡的现象,降低了试验土样的保水能力和黏聚力,导致渣土渗透性能不降反增。

结合混合改良渣土的坍落度试验和渗透试验,在考虑经济成本和施工需求的前提下,得出中砂改良的最佳配比为:BIR 为 10% ,FIR 为 20% ~ 25% ;砾砂改良的最佳配比为:BIR 为 10% ,FIR 为 30% ~ 40% 。膨润土泥浆地掺入量可根据实际进行适当调整。

4 实际工程应用

在实际盾构掘进施工中,采用膨润土泥浆、泡沫混合改良的方案,即采用泥水比 1/8、发泡液质量分数 3% 的改良剂对富水砂层进行改良。采用本次渣土改良试验配比前后的盾构刀盘扭矩、转速等参数随管片环号变化曲线如图 13 所示。由图 13 可以看出:在渣土原始配比下掘进时,刀盘扭矩约为 3 500 kNm,刀盘转速为 1.5 r/min;渣土改良后,刀盘扭矩大多约为 2 600 kNm,刀盘转速为 1.6 r/min。由此可见,改良后刀盘扭矩明显降低,刀盘转速有所提升,且均能维持稳定。盾构的推进速度亦维持在 40 ~ 50 mm/min 范围内,盾构每环出土量约为 50 ~ 60 m<sup>3</sup>,各项推进参数基本正常,表明渣土改良效果总体较好。结合图 1 可知,该混合改良配比对该区段渣土改良有显著的效果。

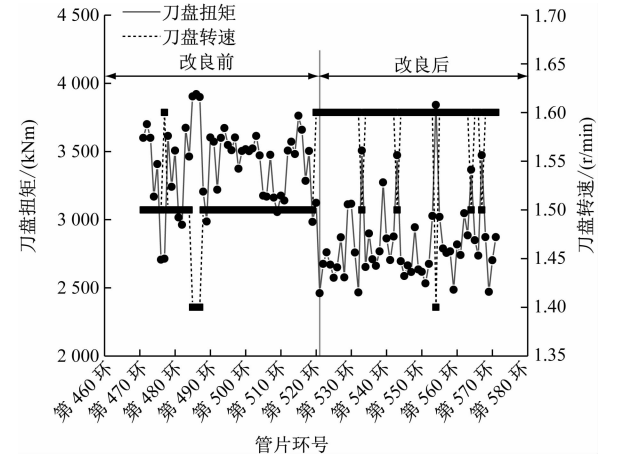


图 13 改良前后刀盘扭矩和转速-管片环号变化曲线  
Fig. 13 Graph of cutter torque and cutter rotating speed-segment ring number before and after conditioning

5 结语

1) 针对富水砂层宜采用泡沫、膨润土泥浆混合改良。当发泡液质量分数 3% ,膨润土泥浆泥水比

为 1:8 时,泡沫的半衰期为 12.4 min,发泡倍率为 14.7 倍,膨润土泥浆黏度为 50 s,可见改良剂性能均满足需求。

2) 采用泡沫单独改良渣土,能有效改善渣土的流塑性,但其受含水率的影响较大。当渣土含水率较高时,砂层易出现析水、析泡现象,导致渣土的渗透系数不降反增。

3) 本文缺乏不同渣土含水率对泡沫、膨润土泥浆混合改良效果的影响分析,后续可对此展开深入研究。对渣土的变级配问题研究不深,渣土级配不同对其改良的影响亦是后续研究的重点。

## 参考文献

- [1] 晏启祥,郑代靖,何川,等. 富水砂卵石地层地铁盾构施工若干问题及对策[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(3):713.  
YAN Qixiang, ZHENG Daijing, HE Chuan, et al. Problems and countermeasures of metro shield construction in water-soaked sand and cobble stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 713.
- [2] HUANG S, WANG S Y, XU C J, et al. Effect of grain gradation on the permeability characteristics of coarse-grained soil conditioned with foam for EPB shield tunneling[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(11):4662.
- [3] VINAI R, OGGERI C, PEILA D. Soil conditioning of sand for EPB applications: Alaboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 308.

- [4] PSOMAS S. Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications[D]. Oxford: St Hugh's College, 2001:84.
- [5] 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 benatonite slurry on conditioning sand soil permeability[J]. Urban Mass Transit, 2022,25(3):26.
- [6] 陈先智,成勇,杨小龙,等. 富水圆砾地层盾构渣土改良技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(5):636.  
CHEN Xianzhi, CHENG Yong, YANG Xiaolong, et al. Experimental study on ground conditioning technology for EPB shield boring in water-rich gravel stratum[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(5): 636.
- [7] 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.

· 收稿日期:2022-04-17 修回日期:2022-05-26 出版日期:2024-03-10  
Received:2022-04-17 Revised:2022-05-26 Published:2024-03-10  
· 第一作者:郑选荣,副教授,506396899@qq.com  
通信作者:刘莹,研究生,3479689397@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

## (上接第 36 页)

- [29] 杨志全,卢杰,王渊,等. 考虑多孔介质迂回曲折效应的幂律流体柱形渗透注浆机制[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(2):410.  
YANG Zhiqian, LU Jie, WANG Yuan, et al. Column penetration grouting mechanism for power-law fluids considering tortuosity effect of porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 410.
- [30] 秦鹏飞. 砂砾石土渗透注浆浆液扩散规律及扩散半径影响因素试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015,13(5):368.

QIN Pengfei. Test research on cement slurry diffusion feature of penetration grouting and its influence factors in sand and gravel layer[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5): 368.

· 收稿日期:2022-05-04 修回日期:2023-07-08 出版日期:2024-03-10  
Received:2022-05-04 Revised:2023-07-08 Published:2024-03-10  
· 通信作者:秦鹏飞,副教授,929163723@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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com