

基于压力传递特性的富水砂层土压平衡盾构渣土改良试验研究^{*}

蒋亚龙¹ 黄玉龙¹ 余金² 黄展军³ 朱碧堂¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌; 2. 江西水利职业学院建筑工程系, 330013, 南昌;
3. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌)

摘要 [目的] 富水砂层由于渗透性强、含水率高等特点, 在盾构掘进过程中易因渣土改良不善而导致螺旋输送机出现喷涌以及刀盘结泥饼等事故, 从而影响盾构施工效率, 因此需对富水砂层土压平衡盾构渣土改良试验进行研究。[方法] 依托南昌地铁4号线七里站—民园路西站区间典型富水砂层工况, 开展室内渣土改良试验。采用自制盾构土舱模型装置对不同改良渣土进行土舱模型试验, 基于渣土压力传递特性建立不同改良渣土的坍落度、渗透系数及土压传递系数 K_0 之间的相关关系, 研究不同 K_0 下的渣土改良效果。[结果及结论] 单独采用泡沫对渣土改良时, 渣土的 K_0 与坍落度呈正相关, 而与渣土的渗透系数呈负相关, 而当渣土的坍落度超过 200 mm 时, K_0 会逐步减小。为达到富水砂层土压平衡盾构中理想的渣土改良要求, 改良剂配合比建议为: 泡沫注入率为 25%, 或添加的膨润土泥浆注入率为 10%。室内试验和土舱模型试验表明: K_0 越大, 渣土改良效果越好; 实际工程中单独采用泡沫进行渣土改良后改良渣土的理想的 K_0 为 0.60~0.65; 而泡沫与膨润土泥浆相结合对渣土改良时, 改良渣土理想的 K_0 约为 0.85。

关键词 富水砂层; 土压平衡盾构; 渣土改良试验; 压力传递特性

中图分类号 TU411.2; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.039

Muck Improvement Experiment of Earth Pressure Balance Shield Tunnel in Water-rich Sand Layer Based on Pressure Transfer Characteristic

JIANG Yalong¹, HUANG Yulong¹, YU Jin², HUANG Zhanjun³, ZHU Bitang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China; 2. Department of Architectural Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, 330013, Nanchang, China; 3. Nanchang Urban Rail Group Co., Ltd., 330038, Nanchang, China)

Abstract [Objective] Due to the characteristics of strong permeability and high water content in water-rich sand layer, the poor muck improvement can easily cause accidents such as spout spilling of screw conveyor and mud cake formation on the cutter plate during shield tunneling, thus affecting shield construction efficiency. So it is necessary to study the muck improvement of earth pressure balance shield tunnel in water-rich sand layer. [Method] Based on the typical water-rich sand layer working conditions in Qili Station - Minyuan Road West Station interval on Nanchang Metro Line 4, an indoor muck improvement experiment is carried out. The self-made shield soil chamber model device is used to implement soil chamber model experiments on different improved mucks. Based on muck pressure transfer characteristics, the correlations among slump, permeability coefficient and earth pressure transfer coefficient K_0 of different improved mucks are established, and the improvement effect of muck under different K_0 is studied. [Result & Conclusion] When foam is used alone to improve the muck, the transfer coefficient K_0 of muck is positively correlated with slump, but negatively correlated with permeability coefficient of the muck. When the slump of the muck exceeds 200 mm, K_0 decreases gradually. In order to achieve the ideal requirements of muck improvement for earth pressure balance shield in water-rich sand layer, the matched ratio of conditioners is suggested as follows: 25% of foam injection, or 10% injection rate of added bentonite mud. Laboratory and soil chamber model experiments show that the greater K_0 is, the better the improvement effect of muck will be. In actual projects, the ideal K_0 value of improved muck by using foam alone is 0.60-0.65. While foam and bentonite slurry are combined to improve the muck, the ideal K_0 of improved muck is about 0.85.

Key words water-rich sand layer; earth pressure balance shield tunnel; muck improvement experiment; pressure transfer

^{*} 国家自然科学基金项目(42377169, 42267022); 江西省教育厅基金项目(GJJ2200678)

characteristics

土压平衡盾构(以下简称“盾构”)由于占地面积小、适用地层较广、经济效益高等优点被广泛应用于城市的地下空间开发中^[1]。为保证盾构的顺利掘进,渣土须具有良好的流动性、合适的塑性、较低的抗剪强度和黏附强度,以及一定的压缩性^[2],以持续稳定平衡掌子面的水压力和土压力,即盾构施加的支撑土压力(土舱壁压力)通过土舱内的渣土均匀、持续地传递到掌子面以平衡土层中的水平土压力和水压力。同时,流塑性渣土的力学性能可以影响盾构掘进过程中的地层变形^[3,4]。由此可见,盾构土舱内渣土改良的优劣对盾构能否高效掘进至关重要^[5]。

目前,评价渣土改良效果的试验方法主要是岩土工程和混凝土的试验方法^[6-7],如坍落度试验、渗透试验等。盾构掘进过程中,坍落度试验是常用的试验方法,可以评价改良渣土的流动性。文献[8-10]利用室内和现场试验总结得到的最佳坍落度范围,受掘进模式、地层条件等因素的影响,尚未达到统一共识。针对渣土的渗透性评价:文献[11]考虑到盾构拼装管片时间以及其他因素的影响,认为改良后砂土的渗透系数需保持在 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以下至少 90 min;文献[12]发现渗透系数与非渗透指数之间具有最佳相关性,工程上可以利用这种相关性判断改良渣土的合理的渗透性范围。

分析上述文献发现,近年来国内外学者开展了大量的室内渣土改良效果评价试验研究,提出了许多改良渣土特性的评价方法,但上述试验研究大多在室内开展,无法真实反映渣土在舱内受压状态下的压力变化规律,故学者们开始依据模型试验探究土舱内受压渣土的传递模式。文献[13]研究了排

土过程中的压力变化规律,发现土压力沿螺旋输送机输送方向呈线性递减,且其尾部的土压力随输送机的开口大小而变化;文献[14]通过螺旋排土器将土舱内的加压渣土排出以模拟盾构施工过程,并实时监测开挖过程中土舱与螺旋排土器内的渣土压力。上述研究均是针对改良渣土进入螺旋排土器或土舱内时的压力变化规律,并未考虑土舱壁压力与开挖面支护力之间的关系。文献[15]利用直径为 1.8 m 的盾构掘进模拟试验获得了土舱内外的土压力差变化曲线,但忽略了不同改良渣土配合比与土舱内土压力变化的关系。

为探究盾构掘进过程中富水砂土在不同改良剂作用下的土舱内外土压力差变化状态,从而间接判断改良渣土的优劣,本文以南昌地铁 4 号线七里站—民园路西站区间(以下简称“七民区间”)典型富水砂层为例,通过坍落度试验和常水头渗透试验,记录不同改良工况下的渣土坍落度和渗透系数,得出最佳的改良剂配合比。并依据自制盾构土舱模型试验重点研究上述工况下的土压传递系数,建立渣土坍落度、渗透系数及土压传递系数三者之间的联系,进而得出理想的土压传递系数范围。研究成果可为现场渣土改良剂配合比的选取提供合理依据,从而提高盾构掘进的高效性和安全性。

1 工程概况

七民区间盾构隧道区段全长约 2 km,隧道埋深约 10~26 m。该区间施工过程中需穿越全断面富水砂层、全断面泥质粉砂岩及富水砂层-泥质粉砂岩复合地层。根据施工记录报告,第 1 环—第 310 环以及第 1 270 环—第 1 650 环区段为富水砂层,其区段长度分别为 372 m、456 m,地下水埋深约为 4~6 m。七民区间盾构隧道区段地层纵剖面图如图 1 所示。

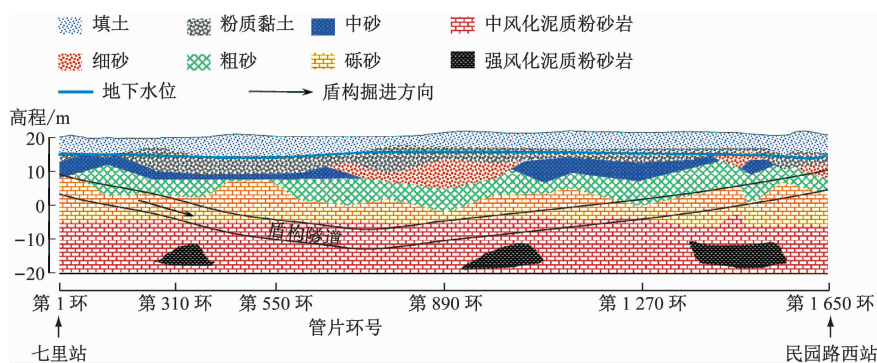


图 1 七民区间盾构隧道区段地层纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal stratigraphical profile diagram of Qili Station - Minyuan Road West Station Interval shield tunnel

七民区间盾构掘进过程中穿越的富水砂层主要是粗砂和砾砂,其物理力学参数如表1所示。其中:粗砂与砾砂构成的富水砂层含水量较大,约为21%~35%,渗透系数为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ m/s,易发生喷涌、掌子面失稳等问题。

表1 土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

名称	含水率/%	渗透系数/(m/s)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
砾砂	21~35	9.3×10^{-4}	1	33
粗砂	21~28	1.2×10^{-3}	1	35

2 渣土改良试验装置

2.1 室内试验装置

对于砂性土而言,渗透系数较大,黏聚力较小,自稳性较差,未改良时无法完全止水。为研究南昌富水砂土在不同改良工况下的流塑性和抗渗性,采用坍落度筒、钢尺,以及渗透装置初步评价改良渣土的性能。渣土坍落度试验与常水头试验装置如图2所示。

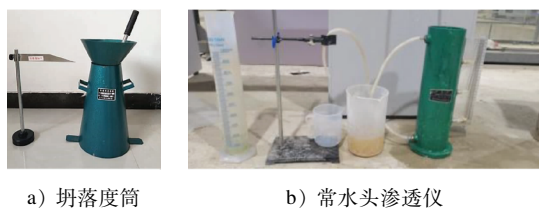


图2 渣土坍落度试验与常水头试验装置

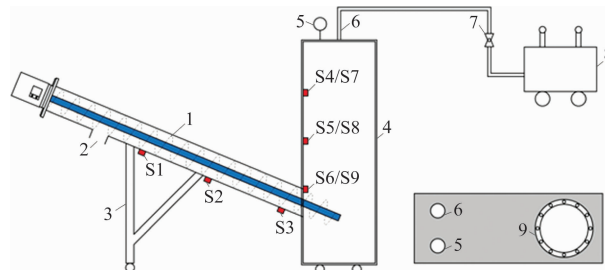
Fig.2 Muck slump test and normal water head test device

2.2 盾构土舱模型试验装置

自行研制的盾构土舱模型装置主要由土舱系统、螺旋排土器系统、气动增压系统及数据采集系统组成。其中:螺旋排土器系统由螺旋排土器、电机及调速器等组成;气压增压系统包括空气压缩机、调压阀及气压表,该系统可调压范围为0~800 kPa;数据采集系统包括YS-VT1008数据采集器、数据采集软件及相应的土压传感器。试验过程中实时监测土舱、螺旋排土器内土压力,通过土压力动态变化规律综合评价改良渣土特性,以及反映土舱内渣土压力传递规律。盾构土舱模型试验图和实物图如图3和图4所示。

3 室内试验及土舱模型试验

为了研究改良后渣土的传递特性,本文试验土



注:1—螺旋排土器;2—出渣口;3—螺旋排土器支架;4—土舱;5—气压表;6—加压进气口;7—调压阀;8—空气压缩机;9—土舱加渣口;S1—S3—螺旋排土器土压传感器;S4—S9—土舱壁土压传感器。

图3 盾构土舱模型试验图

Fig.3 Test diagram of shield soil chamber model

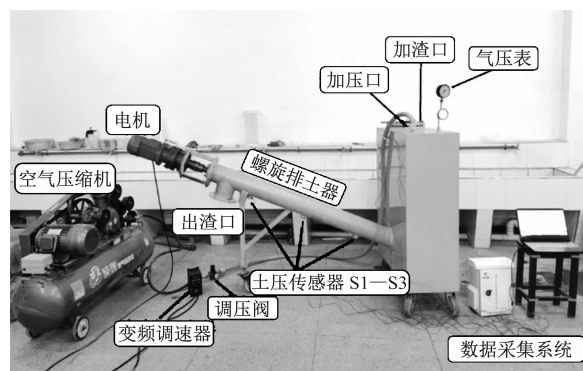


图4 土舱模型实物图

Fig.4 Photo of soil chamber model

样取自七民区间盾构施工现场,并在实验室测定砂土的颗粒级配。砂土的颗粒级配曲线图见图5。

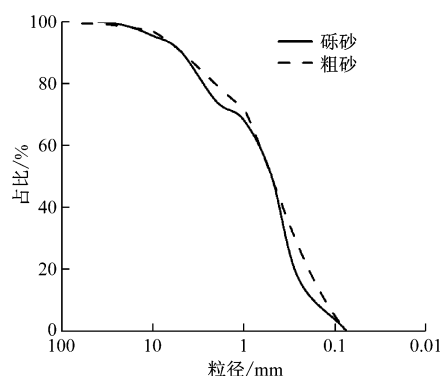


图5 砂土颗粒级配曲线图

Fig.5 Diagram of sand soil particle size distribution curve

测定了该试验砂土的基本物理力学参数取值,如表2所示。

3.1 渣土改良坍落度试验及常水头渗透试验

基于七民区间富水砂层的颗粒级配分析,进行渣土改良试验,并测定改良后渣土的坍落度和渗透系数。根据文献[16-17],选取的改良剂主要有泡沫

表 2 试验砂土的物理力学参数取值

Tab.2 Physical and mechanical parameters of the tested sand soil

参数	密度/(g/cm ³)	相对体积质量	含水率/%	最大孔隙率
取值	2.00	2.63	21 ~ 35	0.78

(发泡剂质量分数为 3%, 半衰期约为 15 min) 和膨润土泥浆(膨润土与水的配合比为 1:8), 该配合比下的改良剂改良土体效果较好。进行坍落度试验和常水头渗透试验时, 根据 FIR(泡沫注入率)以及 BIR(膨润土泥浆注入率)的不同, 共设置 5 组试验砂土改良工况, 分别为工况一(FIR = 10%)、工况二(FIR = 20%)、工况三(FIR = 25%)、工况四(FIR = 30%)及工况五(FIR = 25%, BIR = 10%)。对每种工况的试验结果进行详细的数据记录, 并对其状态进行说明。针对南昌富水砂层, 依据文献[18-19]的试验成果, 经综合判断后渣土的最佳坍落度为 150 ~ 200 mm, 而对于渣土的渗透系数, 一般将其控制在 10^{-5} m/s 以内^[20-21]。不同工况下砂土改良试验方案及试验结果如表 3 所示。

表 3 不同工况下砂土改良试验方案及试验结果

Tab.3 Sand soil improvement test solutions and results under different working conditions

工况	FIR/ %	BIR/ %	坍落度/ mm	渗透系数/ (m/s)	土体状态
一	10	0	115	5.83×10^{-5}	流塑性差, 抗渗性差
二	20	0	163	1.78×10^{-5}	流塑性差, 抗渗性差
三	25	0	185	5.34×10^{-6}	流塑性较好
四	30	0	215	8.74×10^{-7}	流动性好, 抗渗性差
五	25	10	175	4.08×10^{-6}	流塑性好, 抗渗性好

在富水地层中使用泡沫改良剂, 可以显著降低渣土的渗透性, 提高渣土的流塑性, 使盾构排土顺畅^[2]。单独采用泡沫对砂土进行改良试验时, 探究泡沫对富水砂土流塑性的影响。不同 FIR 下渣土的流动性与抗渗性如图 6 所示。由图 6 可见: 单独采用泡沫对渣土进行改良的情况下, 当 FIR 为 10% 时, 渣土坍落度较小, 整体呈现较干的状态, 流动性较差; 当 FIR 为 20% ~ 30% 时, 坍落度在 150 ~ 200 mm 范围内, 改良效果较为理想, 改良后的渣土具有较好的流动性和一定的黏聚性, 如 FIR 为 25% 时, 渣土的流动性与抗渗性均满足掘进要求。而随着 FIR 的继续增大, 渣土流动性会更大, 但由于渣土塑性较差, 难以黏聚在一起, 使得渣土易出现喷涌

现象。

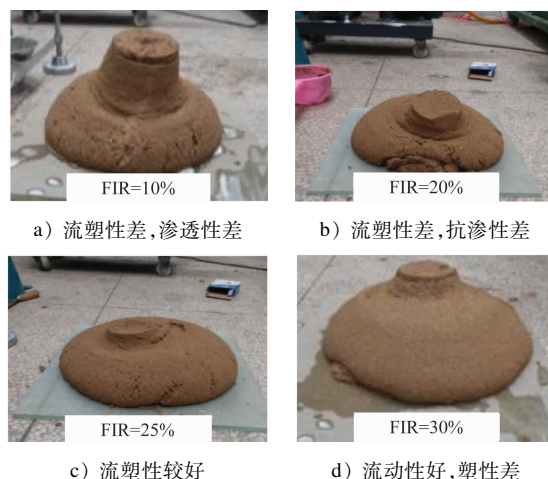


图 6 不同 FIR 下渣土的流动性与抗渗性

Fig. 6 Fluidity and anti-permeability of muck under different FIR

针对单独采用泡沫对上述砾砂改良导致塑性较差的问题, 可添加经 18 ~ 24 h 膨化过后的膨润土泥浆。由于膨润土泥浆具有一定的黏性, 将其混合在渣土内会产生一定的黏聚力, 能够进一步提升渣土的流塑性, 便于渣土的排出。工况五下的改良渣土状态如图 7 所示。当 FIR 为 25%, BIR 为 10% 时, 坍落度为 175 mm, 改良后的渣土具有良好的流塑性与抗渗性。



图 7 工况五下的改良渣土状态

Fig. 7 Status of improved muck under working condition 5

综上, 单独采用泡沫改良富水砂土时, 渣土的流动性改善较为理想, 符合盾构掘进要求, 但对渣土的塑性和渗透性作用效果有限。而采用泡沫与膨润土泥浆相结合的渣土改良方法能够进一步提高渣土的抗渗性与流塑性要求, 当 FIR = 25%, BIR = 10% 时, 改良渣土相较于其他工况流塑性和抗渗性表现得更好。

3.2 土舱壁压力测试

将第 3.1 节中五种工况下的渣土依次装进土舱

中,封闭出渣口,旋转调频旋钮使螺旋排土器转速控制在 0~20 r/min 范围内,而后调试数据采集系统,并对土舱壁上的土压传感器进行相应编号。由于实际盾构土舱壁土压力一般为 100~350 kPa,故试验中施加平均值为 200 kPa 的土舱气压,以模拟盾构掘进过程中有压环境下的土舱,并对土舱壁土压传感器的土压力进行分析,观察排渣口的渣土状况。不同渣土改良方案下的土压传递系数 K_0 为:

$$K_0 = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0}$$

式中:

σ_0 ——土舱施加气压, σ_0 取 200 kPa;

$\bar{\sigma}$ ——土舱壁压力传感器所测土压力平均值。

表 4 为五种工况下盾构土舱模型试验所测土压力平均值和土压力传递系数表。

表 4 不同工况下盾构土舱模型试验

Tab. 4 Shield soil chamber model tests under different working conditions

工况	FIR/%	BIR/%	$\bar{\sigma}$ /kPa	K_0
一	10	0	82	0.41
二	20	0	110	0.55
三	25	0	128	0.64
四	30	0	119	0.59
五	25	10	170	0.85

由图 8 可见:随着 FIR 的逐渐增大,改良渣土的土舱壁平均土压力逐渐增大,渣土的 K_0 也逐渐增大。其中工况四相比工况三,土舱的 K_0 开始减小,这是因为工况四下的 FIR 比工况三下的增大 5%,

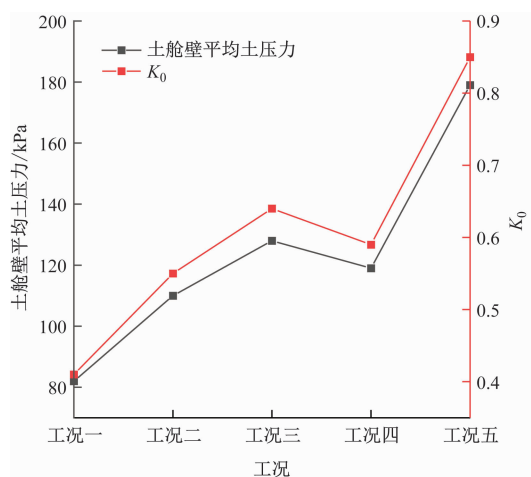


图 8 不同工况下的土舱壁平均土压力与 K_0

Fig. 8 Average soil pressure of soil chamber bulkhead and K_0 under different working conditions

改良后的渣土坍塌度超过限值 200 mm,渣土流动性更大,无法形成较好的整体传递至掌子面的压力,使得渣土改良效果达不到施工要求。工况五下渣土在加入 10% 的膨润土泥浆达到理想状态后,其 K_0 为 0.85,此时渣土不仅具有较好的流塑性和较低的渗透性,同时还具备较好的压力传递效果,使得排渣畅通。随着渣土改良效果的提升,渣土的 K_0 也相继增加, K_0 越接近 1,改良渣土传递压力效果越好,从而满足维持掌子面平衡的要求,保障盾构安全高效掘进。

3.3 理想 K_0 范围

通过对五种工况下的试验数据分析,建立 K_0 同渣土坍塌度和渗透系数之间的关系,如图 9 所示。工况一在采用单独泡沫对渣土改良时,随着渣土坍塌度上升,渣土的 K_0 也相应增加,这是因为泡沫改良能提高渣土的流塑性,从而有效建立土舱壁压力以平衡盾构开挖面,维持盾构刀盘与土舱壁压力的平衡。但渗透系数与 K_0 呈负相关,即渗透系数越小, K_0 越大,主要是因为泡沫能够填充土体之间的孔隙,从而提高改良渣土的抗渗性。工况五在采用泡沫改良的同时,注入 10% 膨润土泥浆后,相较于工况三,渣土的坍塌度开始下降,渗透系数略微增大,这是因为膨润土泥浆具有一定的黏性,能够与渣土混合,增加了渣土内部细粒的质量分数,该工况在提升渣土抗渗性的同时,能够使流动性过大的渣土具有更好的整体性,从而在一定程度上避免渣土坍塌度过大的问题。由室内试验可知,该工况下的渣土流塑性与抗渗性均达到要求,渣土改良效果达到理想状态。理想状态下的土样,能够确保盾构开挖面前方土体的稳定性,渣土的 K_0 较工况三更大。

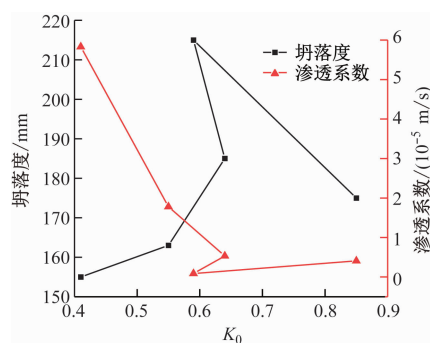


图 9 K_0 同渣土坍塌度和渗透系数的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve K_0 with muck slump and permeability coefficient

由图9可见:砂土改良后的 K_0 为0.41~0.85,对应的坍塌度为115~215 mm。经室内改良和模型试验研究,当土舱内渣土的 K_0 越大时,渣土的改良效果越好。

由上述五种工况可知:单独采用泡沫改良时,当坍塌度与渗透系数处于合理区间时,所对应的 K_0 为0.60~0.65;而当加入膨润土泥浆后,渣土改良效果较好,渣土的 K_0 稳定在0.85附近。在盾构实际掘进过程中,可根据土舱壁所测压力得出改良渣土的 K_0 ,从而快速判断盾构所提供的支撑力是否能够维持掌子面平衡,以保障盾构安全、高效掘进。

4 结语

1) 单独采用泡沫对富水砂土进行改良时,砂土的 K_0 与渣土坍塌度呈明显的正相关,而与渗透系数呈负相关。但随着渣土坍塌度超过200 mm时, K_0 逐步减小。

2) 针对南昌富水砂层盾构渣土改良,通过泡沫和膨润土泥浆改善富水砂土的流塑性,其中改良剂的配合比为:FIR为25%或添加的BIR为10%,渣土改良较为理想,能够满足压力传递要求。

3) K_0 越大表明渣土改良效果越好。在实际工程中,单独采用泡沫对渣土进行改良时,表征渣土改良效果的理想 K_0 为0.60~0.65;采用泡沫与膨润土泥浆对渣土进行改良时,理想的 K_0 为0.85。由此可见, K_0 所处的两个范围所对应的渣土坍塌度和渗透系数均已达到掘进要求,由此可快速判断盾构土舱内渣土的改良情况,从而进一步做出相应的调整。

参考文献

- [1] 何川,封坤,方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97.
HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97.
- [2] 王树英,刘朋飞,胡钦鑫,等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 8.
WANG Shuying, LIU Pengfei, HU Qinxin, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunnelling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 8.
- [3] PEILA D, OGGERI C, VINAI R. Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1622.
- [4] MERRITT A S, MAIR R J. Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: a theoretical model[J]. Géotechnique, 2008, 58(2): 79.
- [5] BARTAK J, HRDINA I, ROMANCOV G, et al. Integral studies on mechanical functions of mudding agents and the properties of muddified soils in the EPB shield tunneling technology[C]//Underground Space—the 4th Dimension of Metropolises. Cleveland: CRC Press, 2007: 2064.
- [6] PSOMAS S. Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications[D]. Oxford: University of Oxford, 2001.
- [7] NIKOL K. The effects of soil conditioning agents on fine and coarse-grained soils with applications in earth pressure balance machine tunneling[D]. Toronto: University of Toronto, 2007.
- [8] QUEBAUD S, SIBAI M, HENRY J P. Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(2): 173.
- [9] VINAI R, OGGERI C, PEILA D. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 308.
- [10] 刘飞,杨小龙,冉江陵,等. 基于盾构掘进效果的富水砾砂地层渣土改良试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(10): 1426.
LIU Fei, YANG Xiaolong, RAN Jiangling, et al. Research on soil conditioning of water-rich sandy gravel strata based on shield tunneling effect[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(10): 1426.
- [11] BUDACH C, THEWES M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 296.
- [12] BORIO L, PEILA D. Study of the permeability of foam conditioned soils with laboratory tests[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2010, 6(4): 365.
- [13] BEZUIJEN A, SCHAMINÉE P E L. Simulation of the EPB-shield TBM in model tests with foam as additive[M]//ADACHI T, TATEYAMA H, HIMURA M. Modern Tunneling Science and Technology. 1st ed. Cleveland: CRC Press, 2020: 935-940.
- [14] 姜厚停,龚秋明,杜修力. 卵石地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 284.
JIANG Houting, GONG Qiuming, DU Xiuli. Experimental study on soil conditioning in cobble layer by use of earth pressure balanced machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 284.
- [15] 李向红,傅德明. 土压平衡模型盾构掘进试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1101.
LI Xianghong, FU Deming. Experimental study on excavation behaviour using model EPB shield with a diameter of 1.8 m[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1101.

- 1101.
- [16] 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.
- [17] 朱碧堂, 余金, 王凌, 等. 富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土改良试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 29.
- ZHU Bitang, YU Jin, WANG Ling, et al. Experimental study on soil conditioning with water bearing gravelly sand-argillaceous silt-stone composite stratum[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 29.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] PEILA D, MARTINELLI D, TODARO C, et al. Soil conditioning in EPB shield tunnelling—an overview of laboratory tests[J]. Geomechanics and Tunnelling, 2019, 12(5): 491.
- [21] WANG S, HU Q, WANG H, et al. Permeability characteristics of poorly graded sand conditioned with foam in different conditioning states[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2021, 49(5): 3620.
- 收稿日期:2023-10-08 修回日期:2024-02-20 出版日期:2024-08-10
Received:2023-10-08 Revised:2024-02-20 Published:2024-08-10
· 第一作者: 蒋亚龙, 副教授, yalongjiang@whu.edu.cn
通信作者: 黄展军, 正高级工程师, 1038344178@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 226 页)

效果不明显,因此应采取合理的分坑长度,从而有效控制基坑变形。

3) 分坑长度为 30 m 时,基坑围护结构水平位移和高速铁路路基竖向位移满足 DG/TJ 08-61—2018 的要求,但路基水平位移超出限值,究其原因第 2 道混凝土支撑强度的形成需要时间,在此期间基坑变形迅速增大。这说明基坑分坑开挖能控制基坑变形,但周边环境控制仍需额外增加防护措施以防止邻近路基变形超限。

参考文献

- [1] 杨玉江, 邵亚萍. 分坑技术在饱和软黏土深大基坑变形控制中的应用[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(6): 321.
- YANG Yujiang, SHAO Yaping. Application of pit dividing technology in deformation control of deep and soft clay saturated foundation pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2020, 34(6): 321.
- [2] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08-61—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018: 352.
- Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. Technical code for excavation engineering: DG/TJ 08-61—2018[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018: 352.
- [3] 刘建航, 刘国彬, 范益群. 软土基坑工程中时空效应理论与
- 实践(上)[J]. 地下工程与隧道, 1999(3): 7.
- LIU Jianhang, LIU Guobin, FAN Yiqun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 7.
- [4] 宋德鑫, 陶铸, 范钦建. 分坑施工在控制基坑长边效应中的应用[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(2): 84.
- SONG Dexin, TAO Zhu, FAN Qinjian. Construction technology of separate pit applied to control long side effect of foundation pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015, 29(2): 84.
- [5] 梁浩毅, 项瑞聪, 狄宏规, 等. 基坑开挖引起邻近桩板路基的变形及分区[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(6): 18.
- LIANG Haoyi, XIANG Ruicong, DI Honggui, et al. Deformation and partition of pile foundation caused by excavation of foundation pit adjacent to pile-plank subgrade[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(6): 18.
- [6] OU C Y, CHIOU D C, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337.
- 收稿日期:2022-03-30 修回日期:2022-05-19 出版日期:2024-08-10
Received:2022-03-30 Revised:2022-05-19 Published:2024-08-10
· 通信作者: 李晓龙, 高级工程师, 514704364.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