

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1103

富水砂层盾构法联络通道渣土改良技术研究

姜 鹏

(中铁十九局集团轨道交通工程有限公司, 北京 101300)

摘要: 土压平衡盾构在富水砂层推进过程中常发生喷涌、土舱堆积土体、刀盘损坏等工程问题, 对富水砂层渣土添加膨润土泥浆进行改良是解决该类问题最有效的方法。以宁波地铁盾构法联络通道工程为背景, 在明确最优膨润土泥浆(质量比 1:11、膨胀时间 18 h)基础之上, 通过改良渣土土性对比研究得到最佳泥浆注入比为 20%。然后将试验结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, 且渣土出土顺利, 现场施工状态良好。研究结果可供类似富水砂层盾构掘进渣土改良参考。

关键词: 渣土改良; 富水砂层; 室内试验; 现场试验; 土压平衡盾构

中图分类号: TU753.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0079-07

土压平衡盾构法联络通道施工技术具有机械化程度高、施工周期短、安全、地表沉降量小等特点, 在国内外工程建设中具有广阔的应用前景^[1-5]。该技术在逐步推广过程中发现, 富水砂层渣土改良是一个重要的课题。盾构施工中依靠土压平衡原理, 通过密闭土仓内的渣土来平衡开挖面, 渣土达到适宜的流动性、低摩擦角等理想状态才能顺利出土^[6-10]。土压平衡盾构法联络通道穿越富水砂层施工时, 容易造成喷涌现象和大量超挖现象, 使得盾构机姿态控制困难, 主机无法推进。因此, 对富水砂层渣土进行改良使其满足掘进要求, 是盾构法联络通道施工过程中必不可少的措施。

目前, 相关学者已对地铁主隧道工程土压平衡盾构掘进渣土改良进行了一系列研究^[11-20]。例如, 肖超等^[15]研究了渣土改良对土舱土压力传递性、掌子面稳定性的影响, 结合三轴试验和数值模拟分析了改良渣土对地层响应的影响。邱龔等^[16]在富水砂层盾构掘进中注入泡沫、膨润土与聚合物等改良剂, 对比分析了渗透率、压缩性及微观结构的变化。潘振兴等^[17]考虑到富水砾砂层摩擦性高、抗渗能力差的特点, 分析了不同含水率与不同改良剂质量比的砾砂渣土坍塌度变化规律。Avunduk 等^[18]

利用空心圆柱扭转剪切试验分析了砂质渣土改良效果指标, 确定了渣土改良添加剂的最优配比。蒋亚龙等^[19]对南昌地铁 4 号线区间富水砂层工况采用自制土舱模型装置进行改良渣土室内试验, 依压力传递特性建立坍塌度、渗透系数与土压传递系数关系, 研究不同土压传递系数改良效果。张昭等^[20]通过膨润土泥浆优化试验、坍塌度试验、渗透试验研究了膨润土泥浆对不同种类富水砂土的改良作用。以上研究取得了一定成果, 但缺乏对盾构法联络通道工程渣土改良的相关研究, 针对滨海地区富水砂层的渣土改良技术研究也较少。

笔者针对滨海地区富水砂层盾构法联络通道工程, 首先确定最佳膨润土泥浆, 再通过室内试验研究渣土改良前后的物理力学性质, 得出最优泥浆注入比; 随后将其应用到实际工程, 通过对比渣土改良段与未改良段盾构施工参数, 确定渣土改良实际效果, 以期类似工程提供参考。

1 渣土改良试验

1.1 试验方案

为使盾构法联络通道顺利穿越富水砂层, 需要对开挖土体进行改良。目前盾构工程中常用渣土

收稿日期: 2024-11-06

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心开放基金(XT2021012)

作者简介: 姜 鹏, 高级工程师, 主要研究方向: 隧道建设。E-mail: 1301690900@qq.com

改良剂主要有 3 种, 分别是水、泡沫溶液、膨润土泥浆。对富水砂层渣土采用钠基膨润土泥浆, 钠基膨润土具有良好的吸水性和膨胀性, 可减小盾构机外壳与富水砂层土体之间的摩擦力, 作为渣土改良剂可以很好地适用于富水地层。但渣土土样含水率不同, 改良剂的注入量也不同。对此, 设计试验方案如下:

(1) 依据盾构隧道穿越地层的特点, 对富水粉砂进行颗粒级配分析, 得到颗粒含量, 并确定渣土改良方案。

(2) 渣土改良采用钠基膨润土。首先配制不同质量比的膨润土泥浆, 膨润土与水的质量比分别为 1:7、1:9、1:11、1:13、1:15。通过测试不同质量比的膨润土泥浆黏度随时间的变化, 选取最佳膨润土泥浆。

(3) 利用(2)确定的最佳膨润土泥浆, 分别以 0%、10%、20%、25%、30% 的泥浆注入比(膨润土泥浆与渣土的体积比)制作试验土样, 然后通过测定渣土改良前后的流动性、抗剪强度、渗透系数、压缩性来选取适合富水砂层渣土改良的最优泥浆注入比。

1.2 试验土样

试验土样取自宁波地铁 5 号线联络通道工程, 土体颗粒级配曲线如图 1 所示, 粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量分数超过 50%。

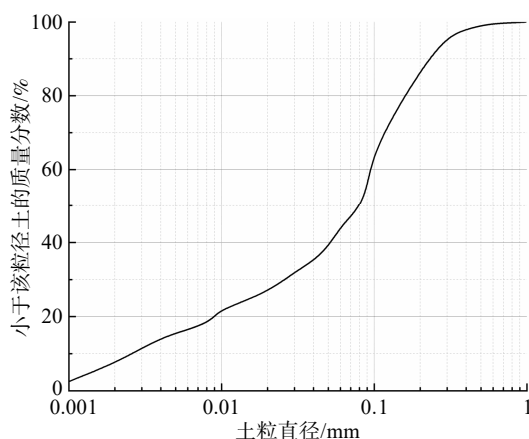


图 1 渣土颗粒级配曲线

1.3 泥浆性能试验

试验设备选用两套独立的膨润土泥浆搅拌膨胀储蓄箱, 膨润土泥浆黏度随时间的变化如图 2 所示。当膨润土泥浆质量比低于 1:11 时, 泥浆黏度小

且随时间增长变化不显著; 膨润土泥浆质量比高于 1:11 时, 泥浆黏度有部分提升; 不同质量比泥浆黏度总体随时间增长而增大, 在膨胀 12 h 以后黏度变化稳定, 在膨胀 18~24 h 内黏度达到最大值。综合考虑, 富水砂层渣土改良试验选用配置质量比 1:11、膨胀时间 18 h 的膨润土泥浆, 能够满足黏度要求并降低施工成本, 为最佳膨润土泥浆。

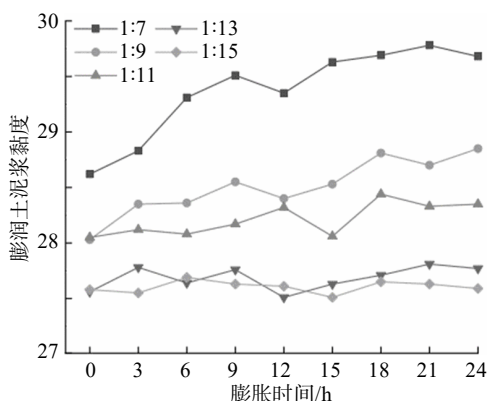


图 2 膨润土泥浆黏度随时间的变化

1.4 力学性能试验

1.4.1 流动性

土舱渣土的流动性直接决定盾构施工螺旋出土的畅通程度, 渣土流动性一般使用坍落度来衡量。渣土土样与不同注入比改良剂混合, 经盾构自带的搅拌棒搅拌均匀, 通过螺旋出土机获取土样, 将混合土样按试验规范分次装入试验筒内, 其间充分均匀插捣, 装填完毕后抹平筒口, 保持垂直提起坍落度筒, 测量出坍落高度。当试验混合土样未发生析水现象时, 坍落高度越大, 其和易性越好, 按照工程经验分析, 100~150 mm 坍落度最佳。图 3 所示为不同工况下改良渣土的坍落度试验。由图可以看出随着泥浆注入比的提高, 渣土坍落度逐渐增大; 当泥浆注入比为 30% 时, 改良渣土形状明显改变。



(a) 泥浆注入比 0%

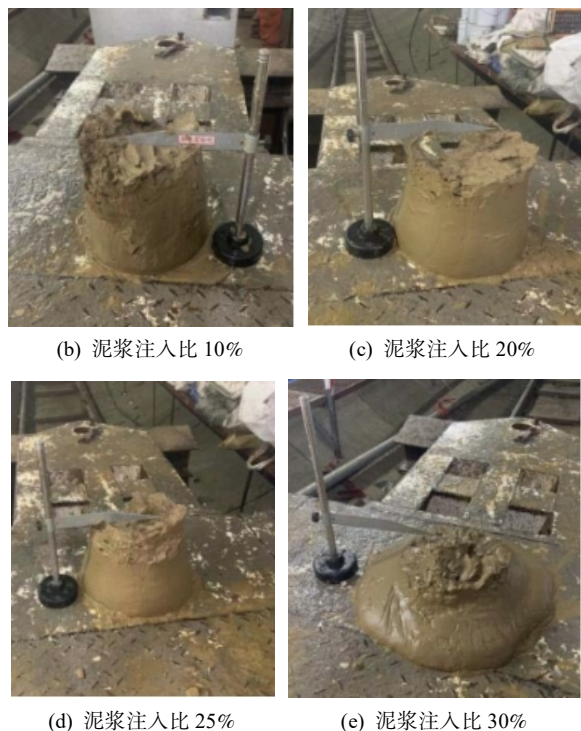


图3 不同注入比坍塌度试验

图4为坍塌度随泥浆注入比的变化。由图可知:随着膨润土泥浆注入比增大,渣土的坍塌度明显增大,说明膨润土泥浆对富水砂层渣土改良效果显著;未改良渣土的坍塌度为55 mm,土体流动性较差,不符合渣土坍塌度理想状态;当膨润土泥浆注入比为20%时,改良渣土的坍塌度已升至117 mm;当泥浆注入比为20%、25%时,改良渣土坍塌度已符合施工要求,土体流动性良好;当泥浆注入比超过30%时,改良渣土坍塌度急剧增大,达到了189 mm,超过最佳坍塌度要求。从改良效果考虑,改良渣土在膨润土泥浆注入比为20%~25%时效果最佳;另外从经济效益考虑,选取泥浆注入比20%。

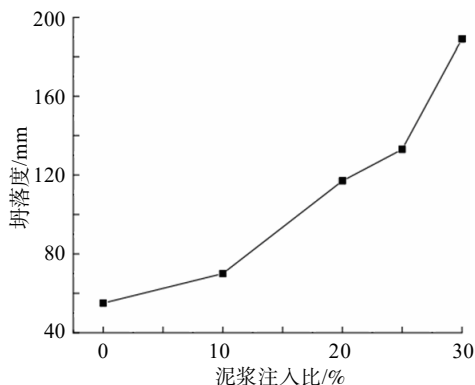


图4 坍塌度随泥浆注入比的变化

1.4.2 抗剪强度

盾构穿越土层的强度对掘进施工具有重要影响^[21-22]。对此,通过直剪试验测定改良前后渣土的抗剪强度,得到内摩擦角与黏聚力。图5为不同含水率渣土抗剪强度随泥浆注入比的变化。由图可知:含水率为20%、25%、30%下的未改良渣土土样抗剪强度分别为185.6、170.8、163.1 kPa,较高的抗剪强度使盾构开挖过程扭矩增大,增加施工难度;随着泥浆注入比的增加,改良渣土的抗剪强度逐渐减小;泥浆注入比30%时其抗剪强度下降了约10%。

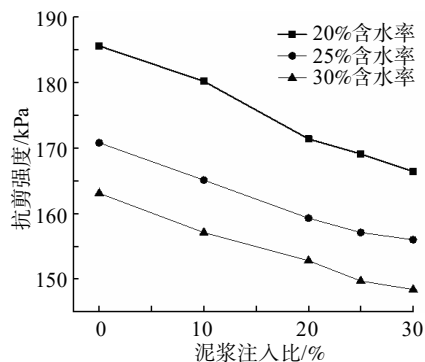


图5 抗剪强度随泥浆注入比的变化

黏聚力与内摩擦角随泥浆注入比的变化如图6所示。

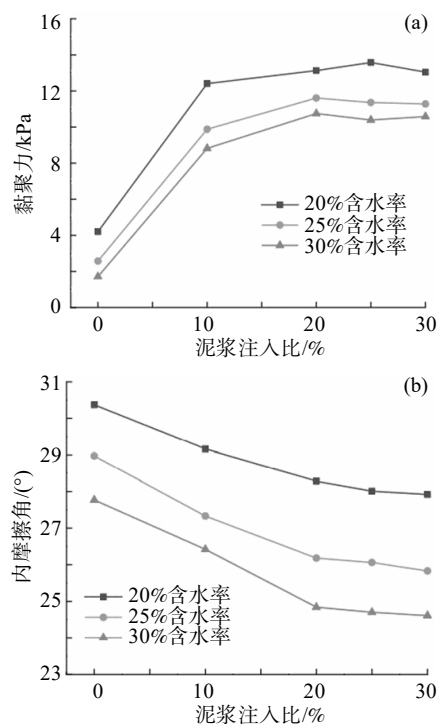


图6 黏聚力与内摩擦角随泥浆注入比的变化

由图 6(a)可知,黏聚力随着膨润土泥浆的注入得到一定程度提升。当泥浆注入比大于 20%时,3 种含水率的粉砂渣土黏聚力都较大,20%含水率的渣土在泥浆注入比 25%时稍有增大,但增大趋势不明显。由图 6(b)可知,不同含水率渣土注入膨润土泥浆后,内摩擦角产生了明显的下降。相比膨润土泥浆注入比 20%,注入比 25%与 30%渣土土样内摩擦角下降趋势减缓。因此,直剪试验表明选取泥浆注入比 20%符合抗剪强度改良的要求,且渣土改良能明显降低土体的内摩擦角,提高黏聚力,从而降低螺旋机排土与刀盘转动的扭矩,有利于盾构施工效率的提升。

1.4.3 渗透系数

富水砂层中粉砂的渗透性能较强,试验土样改良前的渗透系数在 $10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,在这种条件下对渣土进行开挖出土时,螺旋出土口容易出现喷涌^[23]。通过变水头渗透仪对富水砂层改良渣土进行渗透试验。不同含水率粉砂渗透系数随膨润土泥浆注入比变化的试验数据见表 1。渣土的渗透系数随含水率增加而增大,含水率 30%比含水率 20%、25%渗透系数高 10 倍左右;随着膨润土泥浆的注入,渗透系数下降,渣土抗渗性能显著提高;当泥浆注入比为 20%时,含水率 20%、25%土样渗透系数小于 $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而含水率 30%土样达到了 $6.65 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,大于最大临界值,不满足土压平衡盾构机工作状态的渗透系数要求;30%含水率土样达到渗透要求所需注入比较高,耗费较多,增加工程成本。由此,从渣土渗透系数方面综合考虑,最佳注入比为 20%~25%。

表 1 不同参数下的粉砂渗透系数 单位: $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

土样含水率/%	泥浆注入比/%				
	0	10	20	25	30
20	19.6	4.13	0.212	0.194	0.168
25	33.2	6.14	0.536	0.517	0.489
30	479.0	66.30	6.650	1.260	0.964

1.4.4 压缩性

为探究膨润土泥浆对渣土压缩性的影响,利用压缩试验来测定土体的压缩性。图 7 为压缩系数随泥浆注入比的变化。富水砂层渣土的压缩系数随膨润土泥浆注入比的增加而增大,当泥浆注入比

达到 30%时,压缩系数从未进行改良时的 0.14 MPa^{-1} 变化至 0.21 MPa^{-1} ,增大了 50%。因此,膨润土泥浆的注入对渣土压缩性产生有利影响。

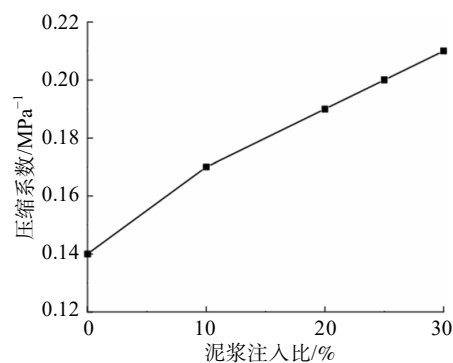


图 7 压缩系数随泥浆注入比的变化

根据室内试验对渣土流动性、抗剪强度、渗透系数、压缩性等一系列性能研究,综合考虑试验效果、现场需求、经济、绿色施工等方面,确定最佳膨润土注入比为 20%。

2 现场应用

2.1 工程概况

宁波市处于长江三角洲冲积平原,属海相沉积平原类型,在轨道交通修建过程中存在着多处富水粉砂地层。宁波轨道交通 5 号线某联络通道下穿三官堂大桥、甬江河道,河岸边有管道分布,地表环境如图 8(a)所示。联络通道中心埋深 23.53 m,线间距 15.39 m。联络通道主要穿越粉砂地层以及少部分淤泥质粉质黏土层,是典型的富水粉砂地层,其纵断面地质剖面如图 8(b)所示。富水粉砂地层盾构掘进过程中,可能引起地表沉降超限,进一步可能会引发道路开裂、管道破坏、桥梁不均匀沉降等问题,对工程安全及周边施工环境造成严重的威胁。



(a) 地表环境

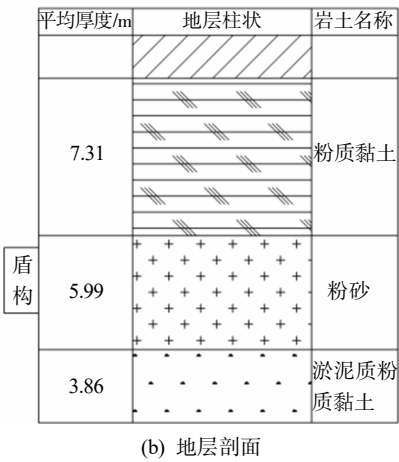


图 8 联络通道地表环境与穿越地层剖面

工程机为土压平衡盾构机 547, 其主机、刀盘等技术规格参数见表 2。

表 2 盾构机主要技术规格参数

部件	项目	规格参数
盾构主机	开挖直径/mm	3 290
	盾体长度/mm	4 316
推进系统	千斤顶推力/kN	700
	推进速度/(mm·min ⁻¹)	20
	总推力/kN	10 500
刀盘	刀盘形式	辐条式
	额定扭矩/(kN·m)	860
	刀盘转速/(r·min ⁻¹)	1.9
螺旋排土机	最大扭矩/(kN·m)	20
	排土能力/(m ³ ·h ⁻¹)	23
	最大排土尺寸/(mm×mm)	230×140
其他	渣土改良注入口/个	4

富水粉砂地层中土粒黏聚力小、内摩擦力高、渗透系数高, 盾构掘进施工中易发生喷涌, 因此提出以下建议:

- (1) 添加膨润土泥浆改良渣土。在盾构施工中加入膨润土泥浆进行渣土改良, 形成泥砂混合, 可以有效抑制喷涌现象的发生。
- (2) 配置合理的膨润土泥浆比例。设置多路膨润土注入管道, 依据土层掘进情况选择合理的膨润土泥浆注入口、泥浆注入量、相应配合比、膨胀时间。
- (3) 掘进速度均匀。富水砂层剧烈掘进施工易发生砂层液化现象, 施工过程中尽量避免对盾构附近的主隧道扰动土造成二次扰动, 减少盾构掘

进参数的波动。

(4) 控制螺旋出土机。出土时降低闸门高度可以控制土舱内渣土缓慢排出, 并通过螺旋的正反转, 在螺旋机中添加相应改良剂进行改良, 缓慢出土可保持土舱土压力稳定。同时, 注意螺旋出土机的旋转扭矩, 避免螺旋出土机堵塞、停转耽误施工进度。

(5) 严格控制出土量。做好掘进出土记录。由于膨润土泥浆的注入, 盾构掘进渣土出土量需要重新计算。超挖土体掘进会导致地面大面积沉降, 难以修复; 反之, 欠挖土体掘进会导致地面大面积隆起。

2.2 应用效果

为了验证室内试验得到的最佳膨润土泥浆及最优注入比, 将该方案应用到该联络通道的 20~30 环进行试验。试验段 20~24 环为优化前对比段, 25~30 环为优化后对比段。联络通道施工中盾构推进速度为 20 mm·min⁻¹, 土仓压力为 190 kPa, 每环出土约 7.6 m³, 螺旋机出口处放置小土斗, 通过小土斗将土运至 4 号台车后方渣土车。施工过程中保证顶进速度与出泥量匹配, 严格监控土压力变化。现场对渣土进行注浆改良时, 注浆压力在 20~50 kPa 之间。粉砂渣土经改良后, 有效提高了土体的保水性, 渣土未出现离析、沉淀板结等现象; 改良渣土具有较好的土压平衡效果, 开挖面得到稳定, 并有效控制了地表沉降。图 9 为现场施工图。



图 9 现场施工图

此外,收集改良前后盾构掘进参数,对刀盘扭矩、推进总推力进行采集分析。由于试验段内地质情况基本一致,故可认为施工过程中掘进参数变化均是由改良渣土引起。图10所示为渣土改良前后盾构推进阶段掘进参数变化。由图可知:盾构穿越富水砂层中,渣土改良前刀盘扭矩为270~339 kN·m,油缸推力为3 517~3 785 kN,相对偏大且数值波动较大。在25环处通过设备自带的膨润土注入口向土舱内以最优注入比注入膨润土泥浆进行渣土改良后,刀盘扭矩下降了约100 kN·m,油缸推力下降了约700 kN,且数值较为稳定,出土顺利,未发生喷涌现象。由此说明室内试验所得最佳膨润土泥浆(质量比1:11、膨胀时间18 h)、最优注入比(20%)对盾构穿越富水砂层有较好的改良效果,研究结果可为滨海地区富水砂层盾构法联络通道工程渣土改良提供参考。

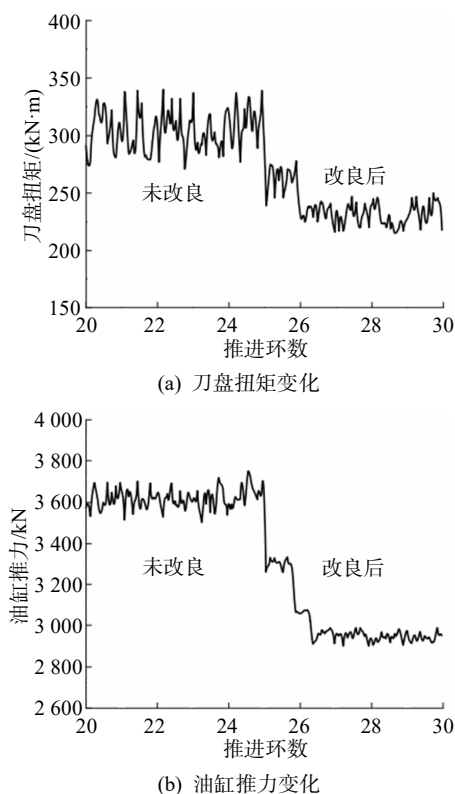


图10 试验段改良前后盾构掘进参数对比

由于现场试验具有一定局限性,20~24环与25~30环为优化前后对比段,地层信息相同,今后可开展对不同颗粒级配的细砂、中砂、粗砂地层下滨海地区富水砂层盾构法联络通道工程渣土的改良研究。

3 结论

(1) 针对滨海地区地铁隧道联络通道工程开展渣土改良试验,利用泥浆黏度试验确定了最优膨润土泥浆为质量比1:11、膨胀时间18 h。

(2) 研究了泥浆注入比对渣土改良前后物理力学性能的影响,发现富水粉砂地层渣土改良可以获得理想的土体流动性(改良渣土坍塌度为117 mm),渣土黏聚力提高,内摩擦角降低,抗渗性能提高(渗透系数小于 $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),压缩系数相比未改良时增加了50%。

(3) 综合考虑试验效果、现场需求、经济和绿色施工等方面,确定依托工程富水砂层盾构渣土改良最佳泥浆注入比为20%。

(4) 在实际工程中应用最优泥浆注入比改良粉砂渣土,有效提高了土体的保水性,渣土未出现离析、沉淀板结等现象;渣土改良降低了盾构刀盘扭矩,同时减小了油缸推力,渣土排出顺利;改良渣土具有较好的土压平衡效果,开挖面稳定,地表沉降较小。

参考文献:

- [1] 朱瑶宏,董子博,尹铁锋,等.地下空间联络通道微加固机械法T接技术探索[C]//中国土木工程学会2017年学术年会论文集.上海,2017:138-147.
- [2] 柳献,高一民,张蛟龙,等.机械法联络通道施工中主隧道的破洞响应分析[J].岩土工程学报,2020,42(5):951-960.
- [3] 朱瑶宏,高一民,董子博,等.盾构法T接隧道结构受力足尺试验研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):9-18.
- [4] 梅清俊,朱瑶宏,马永政,等.滨海软土地层机械法联络通道施工影响监测分析[J].宁波大学学报(理工版),2021,34(2):73-79.
- [5] 朱瑶宏,高一民,柳献.深埋机械法联络通道主隧道结构响应研究[J].现代隧道技术,2022,59(5):144-153.
- [6] 徐征杰,郭晓阳.基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化[J].岩土工程学报,2021,43(1):194-200.
- [7] 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):74-79.
- [8] 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):67-70.
- [9] 张国京,刘盈.土压平衡盾构施工中土的塑流化技术[J].市政技术,2005,23(5):293-296.

- [10] 李佳明, 陈学军, 黄翔, 等. 纳米膨润土改良红黏土力学特性机理分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(1):147-154.
- [11] 魏康林. 土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(1):73-77.
- [12] 孟庆军, 向纯双, 刘正日, 等. 下卧泥岩富水圆砾地层盾构渣土改良技术研究[J]. 公路, 2022, 67(2):293-299.
- [13] 蒯振东, 胡林浩, 张书香, 等. 富水砂卵石地层大直径盾构渣土改良试验研究: 以成都地铁 17 号线明九区间 2#风井—九江北站盾构工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1):37-43.
- [14] 赵兴, 许佳磊, 张志强. 上软下硬复合地层盾构渣土改良试验研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(10):150-158.
- [15] 肖超, 阳军生, 王树英, 等. 土压平衡盾构改良渣土力学行为及其地层响应特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7):2432-2440.
- [16] 邱龔, 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):1703-1708.
- [17] 潘振兴, 梁博, 杨更社, 等. 地铁盾构穿越富水砾砂地层渣土改良试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3):698-705.
- [18] 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.
- [19] 蒋亚龙, 黄玉龙, 余金, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8):227-233.
- [20] 张昭, 石挺其, 祁嘉辉, 等. 富水砂层土压平衡盾构渣土改良试验研究[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(8):175-178.
- [21] 黄志强, 冯东林. 生石灰膨润土泥浆土压盾构渣土改良试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1):128-133.
- [22] 李宏飞. 膨润土泥浆改良土压盾构粉细砂渣土流动性机制分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(2):253-259.
- [23] 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):177-181.

Improvement technology of slag soil in shield connection channel of water-rich sand layer

JIANG Peng

(China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Engineering problems such as gushing, accumulation of soil in soil chamber and damage of cutter head often occur during the advancement of Earth Pressure Balance (EPB) shield in water-rich sand layer. The most effective method to solve these problems is to add bentonite mud to the slag soil of water-rich sand layer. Based on the shield tunnel connecting channel project of Ningbo Metro, the optimal bentonite slurry (mass ratio 1:11, expansion time 18 h) is determined first, and the optimal slurry injection ratio is then obtained (20%) through a comparative study of improving the soil properties of muck. Subsequently, the test results are applied to the improvement of the muck in the construction site of the shield tunnel connecting channel. It is found that both the torque and the thrust of the shield cutter head are significantly reduced after the improvement of the soil layer, and the muck is unearthed smoothly and the construction is in good condition. The research results can be used as a reference for the improvement of muck in shield tunneling in similar water-rich sand layers.

Keywords: muck improvement; water-rich sand layer; laboratory test; field trials; EPB shield

(责任编辑 韩 超)