

粉质黏土层土压平衡盾构施工中的渣土改良技术^{*}

易鹏程¹ 陈志敏¹ 张常书²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 730070, 兰州;

2. 中铁十八局集团有限公司, 300222, 天津//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 以广州地铁土压盾构粉质黏土层为背景, 对盾构刀盘“结饼”、机具磨损严重等问题进行渣土改良研究, 并进行试验段施工参数验证, 确定合理的改良参数。主要结论: 泡沫改良剂最佳质量分数范围为 3%~4%; 渣土改良较佳效果的塌落度指标为 140~160 mm, 较为合适的泡沫掺入比范围为 20%~25%; 现场每环泡沫剂用量为 28.9~36.3 L; 改良后渣土塌落度、抗剪强度、渗透系数等物理力学参数降低明显; 改良段施工参数达到合理可控范围。

关键词 粉质黏土; 土压盾构; 渣土改良

中图分类号 U455.49

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.036

Residue Improvement Technology for EPB Shield Construction in Silty Clay Soil

YI Pengcheng, CHEN Zhimin, ZHANG Changshu

Abstract Taking the silty clay soil of Guangzhou Metro earth pressure shield construction as background, problems of "cake forming" of the cutter plate and severe wear of the machine are studied targeting residue improvement, and construction parameters are verified at test section to determine reasonable improvement parameters. Main conclusions are: the optimal mass concentration range of foam improver is 3%~4%; the collapse degree index with better residue improvement effect is 140 mm~160 mm; the appropriate foam incorporation ratio is 20%~25%; dosage of foam agent per ring on site is 28.9~36.3 L; the physical and mechanical parameters such as residue collapse degree, shear strength and permeability coefficient, are significantly reduced after the improvement; the construction parameters of the improved section has reached a reasonable and controllable range.

Key words silty clay; earth pressure shield; residue improvement

First-author's address School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

盾构机在不同地层中掘进时会遇到诸多问题, 其中渣土改良是一个重要难题。文献[1-8]对此进行了针对性研究, 做出了诸多贡献。然而这些研究针对粗颗粒砂类土与施工技术的改良研究较多, 对细颗粒软黏性土的改良研究较少, 而且渣土改良效果的评价指标较为单一。本文以广州地铁盾构粉质黏土地层为背景, 基于地层物理力学参数分析, 采用泡沫剂渣土改良方案, 结合坍落度、渗透系数、黏聚力及内摩擦角等多个指标来评价渣土的改良成果, 并通过现场试验段的施工参数验证, 得到了较准确、合理的改良参数, 为相似地质条件下的工程施工提供参考。

1 盾构穿越地层的土样物理力学特性

广州地铁 21 号线盾构施工段的主要穿越层为粉质黏土层。该地层受季节性降雨影响较大, 故在施工中的失水地面沉降、盾构刀盘“结饼”及螺旋输送机闭塞等问题尤为突出。

地层物理力学特性参数(液塑限、颗粒级配及渗透系数等)的有效分析是控制施工参数的依据, 也是渣土改良的关键。试验得到的粉质黏土层土样物理力学参数如图 1、表 1 及表 2 所示。

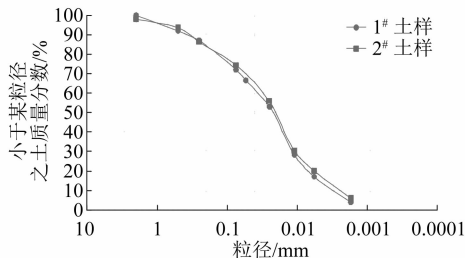


图 1 颗粒级配曲线图

Fig. 1 Particle gradation curve

^{*} 国家自然科学基金项目(11662007); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2018-33)

表 1 土样颗粒分析试验记录

项目	控制粒径 (d_{60})/mm	有效粒径 (d_{10})/mm	中间粒径 (d_{30})/mm	不均匀 系数(k_1)	曲率 系数(k_2)
1 [#] 土样	0.036	0.0025	0.013	14.40	1.88
2 [#] 土样	0.040	0.0031	0.013	12.90	1.36
平均值	0.038	0.0028	0.013	13.65	1.62

注: $k_1=d_{60}/d_{10}$; $k_2=d_{30}^2/(d_{60} d_{10})$ 。

表 2 土样物理力学特性参数

天然密度 (ρ)/(g/cm ³)	天然含水量 (w)/%	黏聚力 (c)/kPa	内摩擦 角(φ)/(°)	渗透系数 (k)/(cm/s)	液限 (W_L)/%	塑限 (W_{pL})/%	塑性指数 (I_p)	液性指数 (I_L)	状态
1.84	30.12	28.8	12.41	4.26×10^{-5}	40.11	25.09	15.02	0.33	可塑

2 粉质黏土渣土改良试验及效果评价

根据试样土体物理力学参数,结合改良剂的适用范围,选择泡沫剂作为渣土改良剂,根据改良剂自身评价来确定最优改良剂质量浓度,并进行不同掺入比的渣土改良试验。

2.1 改良剂的性能评价

泡沫改良剂的性能主要由发泡倍率和半衰期两个评价指标来衡量^[7]。评价指标与泡沫剂质量浓度的关系如图 2 及图 3 所示。

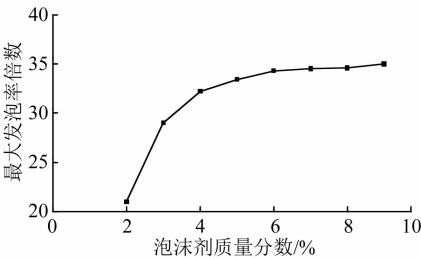


图 2 泡沫剂溶液的最大发泡倍率与质量浓度的关系曲线
Fig. 2 The relationship curve between the maximum foaming ratio and the concentration ratio of the foaming agent solution

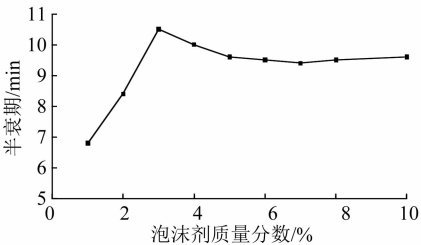


图 3 泡沫剂的半衰期试验曲线
Fig. 3 Half-life test curve of foam

通过分析地层土体参数得出:①土体细颗粒占总质量的 70% 以上,塑性指数为 15.02,是级配良好的粉质黏土;②土样中粉质黏土的平均液性指数为 0.33,在 0.25~0.75 范围内,呈可塑状态,但可塑性差;③渗透系数值为 4.26×10^{-5} cm/s,高于盾构施工要求的 10^{-5} 量级以下。因此,对开挖土舱内渣土进行改良,保证其良好流塑性,是施工中的重点。

分析图 2 可知:随着泡沫剂质量分数的增加,发泡倍率先迅速增加后慢慢稳定;当质量分数低于 4% 时,发泡率增大效果明显。由图 3 可知:随着泡沫剂质量分数的增加,半衰期先增加、后降低,最后趋于稳定;当质量分数为 3% 时,半衰期达临界点,最大半衰期为 10.5 min;当质量分数低于 3% 时,半衰期增长迅速;当质量分数高于 3% 时,半衰期逐渐降低;当质量分数高于 5% 时,半衰期稳定在 9.5 min 左右。由上述性能评价可知,当泡沫剂质量分数为 3% 时,其泡沫剂整体性能较佳。故本次改良试验的泡沫剂采用质量分数为 3% 的配比。

2.2 渣土改良试验结果分析

将泡沫剂与渣土按不同掺入比混合,可分析渣土的抗渗性能、抗剪强度特性及塌落度的变化,进而得到较佳渣土改良参数。

2.2.1 坍落度试验

文献[9]的研究结果表明,当渣土的坍落度为 150 mm 左右时,改良渣土具有良好的流塑性。泡沫剂掺入比 λ 不同时的坍落度试验结果如表 3 所示。

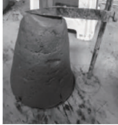


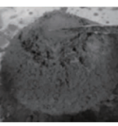

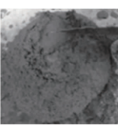
通过表 3 分析可知:当 $\lambda=20\%$ 时,坍落度为 145,渣土改良效果最佳。考虑到实际盾构施工情况,粉质黏土的最优坍落度范围为 140~160 mm,泡沫剂最佳掺入比为 20%~25%。

2.2.2 抗剪试验

开挖掌子面及土仓土体的抗剪强度是盾构顺利掘进的重要影响因素。本文通过室内直剪试验测定粉质黏土在不同 λ 下的渣土抗剪强度力学参数,如图 4~6 所示。

表 3 λ 不同时的渣土坍塌度试验结果

Tab.3 Slump experimental value and state evaluation at different foam injection

λ/%	粉质黏土渣土试样		
	坍塌度/mm	照片	渣土的改良状况评价
0	71		流塑性差, 不合适
15	101		流塑性差, 不适合
20	145		混合均匀, 流塑性良好, 土体性状良好, 适合
25	172		混合均匀, 流塑性良好, 土体性状良好, 适合
30	187		混合均匀, 流塑性较大, 适用性稍差
35	198		流塑性较大, 少许泡沫剂存于表面, 适用性一般

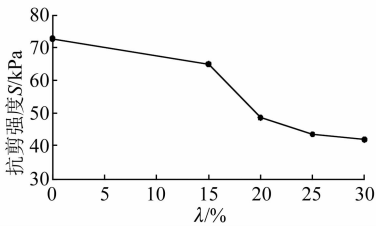


图 4 不同 λ 下的 S 值曲线

Fig. 4 Curves of shear strength values under different foam injection ratios

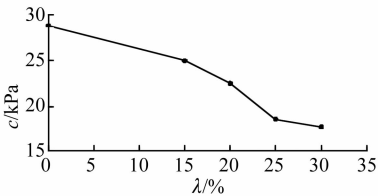


图 5 不同 λ 下的 c 变化曲线

Fig. 5 Variation curve of cohesive force of slag soil under different foam injection ratios

由图 4 可知:当 λ 为 15%~20%时,渣土抗剪强度 S 变化明显,改良作用效果显著;当 λ>25%时,S 变较稳定,变化较缓。由此可见 λ 为 20%~25%比

较合适。

由图 5 可知,c 变化趋势同抗剪强度曲线类似,最优为 20%~25%,改良后 c 可降低 30%左右。

由图 6 可得,当 λ<20%时,φ 随 λ 的增加降低明显;λ>20%时,φ 虽降低却趋于稳定。λ=20%为转折点,此时 φ 值较改良前 φ 低了近 40%。

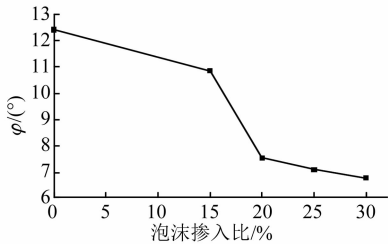


图 6 不同 λ 下的 φ 变化曲线

Fig. 6 The internal friction angle value of the slag soil under different foam injection ratios

通过抗剪强度相关参数对比分析发现,合理掺入泡沫剂能大幅降低渣土的抗剪力学性能,对防止刀盘结泥饼、改善渣土的流塑性具有很好的效果。

2.3.3 渗透试验

土仓渣土的渗透系数 k 是维持开挖面稳定的重要因素之一。当 k 低于 1×10^{-5} cm/s 量级时,开挖面能很好满足盾构施工要求。λ 不同时的改良渣土渗透试验 k 变化曲线如图 7 所示。

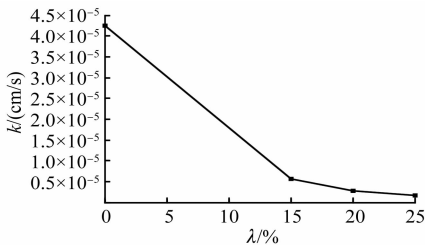


图 7 不同 λ 下的 k 变化曲线

Fig. 7 Variation curve of permeability coefficient under different foam injection ratios

结合图 7 得:λ=20%为改良效果的转折点;λ<20%时,k 增长明显,改良效果显著;λ>20%时,k 略有降低,改良状态已达到理想状态要求。

经分析,粉质黏土 λ 最优值为 20%左右。结合工程实际情况及试验改良效果对比结果,确定适合于粉质黏土的 λ 最优范围为 20%~25%。

3 渣土改良现场效果评价

3.1 施工现场泡沫剂应用参数

由于施工过程中的泡沫剂改良效果受到发泡

系统及土体松散性等因素的影响,故单一的室内试验结果不能直接应用到施工现场,需计算在施工现场每推进 1 环消耗的泡沫剂体积 V_g :

$$V_g = \frac{K}{N} \left[\frac{P_i}{P_a} \left(\frac{\pi D^2 L \xi \lambda}{4} - 1 \right) + 1 \right] \quad (1)$$

式中:

- P_a ——大气压;
- N ——施工时的泡沫剂溶液发泡率;
- P_i ——土仓压力;
- K ——泡沫剂溶液质量分数;
- D ——盾构开挖直径;
- L ——每环管片宽度;
- ξ ——土体的松散系数。

根据现场数据,取 $P_i = 0.14$ MPa, $D = 6$ m, $N = 15$, $L = 1.5$ m, $K = 3\%$, $\xi = 1.25$,将相关参数代入式(1),得到施工现场的 V_g ,如表 4 所示。

表 4 施工现场的 V_g

Tab. 4 Consumed volume of foaming agent on site		
土层	室内试验 $\lambda/\%$	$V_g/(L/环)$
粉质黏土	20~25	28.9~36.3

3.2 改良参数的现场合理性评价

为评价渣土改良参数的合理性,在相关地层盾构试验段,对比分析粉质黏土(含砂率<10%)地层改良前后施工参数(掘进速度、刀盘扭矩、出渣量等)的变化规律,如表 5 及图 8~12 所示。

表 5 现场泡沫改良剂用量

Tab. 5 Specific dosage of on-site foam mixing			
地层分类	$w/\%$	$\lambda/\%$	$V_g/(L/环)$
粉质黏土	29.8~32.4	18~30	25~40

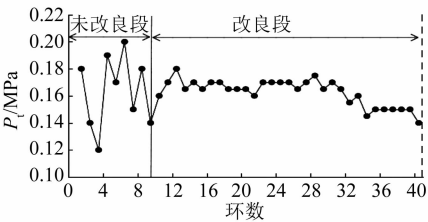


图 8 P_i 随掘进环数的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of soil silo pressure with changing number of excavation loops

结合表 5 分析可知:由于粉质黏土的含水率存在不均匀分布,故渣土改良 λ 最优值的现场值与理论计算值存在差异,但差异不大;如含水量高,则 λ 相对减小,反之则相反。

由图 8 可知:在未改良段 P_i 不稳定,其变化幅度达 ± 0.08 MPa;在改良段, P_i 基本稳定在 0.16 MPa 左右,变化范围缩小到 ± 0.03 MPa。

由图 9 可知:在未改良段,刀盘扭矩基本在 2.1 MNm 左右,最大值达 2.3 MNm,且刀盘磨损变形严重;在改良段,泡沫剂作用明显,刀盘扭矩逐渐减小后稳定为 1.5 MNm 左右,较未改良前减小约 0.6 MNm。

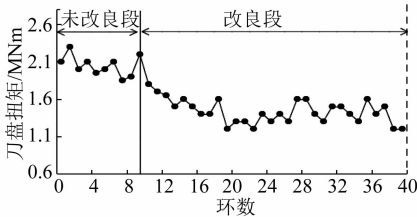


图 9 刀盘扭矩随掘进环数的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of cutter head torque with changing number of tunneling loops

由图 10 及 11 可知,在未改良段,掘进速度为 30 mm/min,出渣量为 3 m³/环;在改良段,掘进速度提升为 40 mm/min,出渣量稳定保持在 4 m³/环以上。可见,改良效果明显。

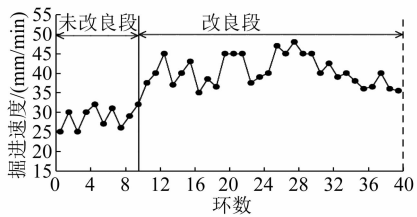


图 10 掘进速度随掘进环数的变化曲线

Fig. 10 The change curve of tunneling speed with the number of tunneling loops

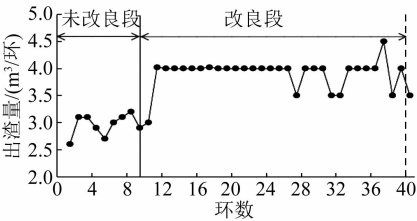


图 11 出渣量随掘进环数的变化曲线

Fig. 11 Variation curve of slag output with changing number of driving loops

由图 12 可以看出,总推力在未改良段和改良段变化明显:在未改良段,总推力基本在 1.7×10^4 kN 左右;在改良段,土仓压力能够合理地平稳掌子面应力,总推力基本稳定在 $1.2 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ kN,达到盾构施工要求的 1.4×10^4 kN 以下。

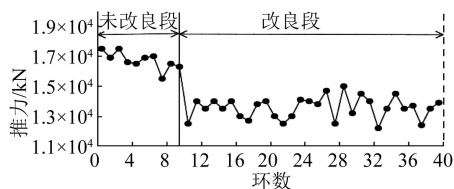


图12 总推力随掘进环数的变化曲线

Fig. 12 Variation curve of total thrust with changing number of driving loops

4 结语

本文依托广州地铁盾构下穿粉质黏土层项目,对粉质黏土进行渣土改良试验,得到泡沫剂最优质量浓度、最优掺入比范围及相关渣土性能参数,推导了施工现场泡沫剂应用参数,并通过现场试验验证了现场应用参数的合理性。主要结论如下:

1) 发泡剂的发泡倍率和半衰期性能指标随质量分数变化而变化,较佳质量分数为3%~4%。

2) 粉质黏土改良的 λ 最优值约为20%,最优坍塌落度为145 mm。结合实际施工情况,渣土改良的坍塌落度最优范围为140~160 mm, λ 最优范围为20%~25%。

3) 渣土物理力学性能受泡沫剂影响明显。改良渣土的 S 、 c 、 φ 及 K 随 λ 的增大呈降低趋势。 λ 超过最优值时,性能参数变化趋于稳定。

4) 现场试验段试验结果表明,采用泡沫剂改良后的渣土能较好地达到理想流塑状态。刀盘总推力有效降低,并稳定在 $1.2 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ kN;刀盘扭矩稳定保持在1.5 MNm左右;掘进速度稳定保持在40 mm/min左右,出渣量达4 m³/环以上;渣土改良后, P_t 稳定在0.16 MPa左右,变化范围缩小到 ± 0.03 MPa。

土压平衡盾构施工参数控制是一个动态平衡的过程。盾构在不同地层、埋深的地质条件下施工可能遇到的问题不尽相同,及时做好记录监测及渣土分析是渣土改良的有效途径。

参考文献

[1] 翟圣智,胡蒙达,叶明勇,等. 南昌上软下硬地层土压平衡盾构渣土改良技术研究[J]. 铁道建筑,2014(8):27.
ZHAI Shengzhi, HU Mengda, YE Mingyong, et al. Research on residue conditioning technology for shield tunneling in Nanchang upper-soft lower-hard stratum[J]. Railway Engineering, 2014(8):27.

[2] 崔振东,陈云峰,何勇飞. 南宁泥质粉砂岩地层中土压平衡盾构掘进渣土改良技术[J]. 建筑技术,2017(7):751.
CUI Zhendong, CHEN Yunfeng, HE Yongfei. Soil conditioning technology for EPB shield tunneling in argillaceous sandstone formation of Nanning[J]. Architecture Technology, 2017(7):751.

[3] 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(1):59.
LI Peinan, HUANG Dezhong, HUANG Jun, et al. Experimental study on soil conditioning of shield construction in hard-plastic high-viscosity stratum[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016(1):59.

[4] 刘彤,陈立生,姚青. 砂性地层土压平衡盾构渣土改良试验研究[J]. 隧道建设,2017(8):1018.
LIU Tong, CHEN Lisheng, YAO Qing. Experimental study of ground conditioning earth pressure balance (EPB) shield in sandy strata[J]. Tunnel Construction, 2017(8):1018.

[5] 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(1):153.
TANG Zhuohua, XU Qianwei, YANG Xin'an, et al. Residue conditioning technology for shield tunneling in water-rich sand layer[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016(1):153.

[6] 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(7):2432.
XIAO Chao, YANG Junsheng, WANG Shuying, et al. Conditioned soils mechanical behavior of earth pressure balance shield tunneling and its impact on formation response characteristics[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016(7):2432.

[7] 郭彩霞,孔恒,王梦恕. 无水大粒径漂卵砾石地层土压平衡盾构施工渣土改良分析[J]. 土木工程学报,2015(增刊1):201.
GUO Caixia, KONG Heng, WANG Mengshu. Study on muck improvement of EPB shield tunneling in waterless sandy-cobble-boulder stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(S1):201.

[8] 叶新宇,王树英,阳军生,等. 泥质粉砂岩地层土压平衡盾构渣土改良技术[J]. 铁道科学与工程学报,2017(9):1925.
YE Xinyu, WANG Shuying, YANG Junsheng, et al. Soil conditioning technology for EPB shield tunneling in argillaceous siltstone formation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017(9):1925.

[9] 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.

(收稿日期:2019-12-16)