

文章编号:1673-9469(2020)02-0024-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.02.005

复合地层土压平衡盾构压力舱渣土改良研究

钟小春¹,张洋^{1*},张露露¹,槐荣国²

(1. 河海大学土木与交通学院,江苏南京 210000;2. 中铁五局,广东广州 518000)

摘要:为降低土压平衡盾构在复合地层中掘进时进行渣土改良的工程成本,以广州地铁21号线朱村至象岭区间为工程依托,通过对粉质黏土和砾砂不同比例组合的渣土进行颗粒分析,计算得到复合地层的粒径分布曲线,并结合室内试验和现场测试研究混合渣土的流动状态和渗透性。结果表明:当复合地层中含有粉质黏土层时,粗粒土层渣土流动状态和渗透性有较大的改善,添加少量的气泡或者膨润土泥浆,渣土状态即可满足盾构掘进的要求。粉质黏土层的含量在30%~70%之间时,渣土能够达到良好的塑性流动状态。粉质黏土层的含量超过70%时,存在结泥饼的风险。

关键词:土压平衡盾构;渣土改良;复合地层;颗粒分析

中图分类号:U455.7

文献标识码:A

Study on Improvement of Residual Soil in Pressure Chamber of EPB Shield in Composite Stratum

ZHONG Xiaochun¹, ZHANG Yang^{1*}, ZHANG Lulu¹, HUAI Rongguo²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The Fifth Bureau Corporation of China Railway, Guangzhou, Guangdong 518000, China)

Abstract: In order to reduce the engineering cost of muck improvement during the process of the excavation of Earth Pressure Balance (EPB) shield in composite stratum, based on the project of Guangzhou metro line 21 from Zhucun to Xiangling, the particle size distribution curve of composite stratum was calculated by particle analysis of different proportion combination residual soil of silty clay and gravel sand in this paper. Besides, combined with laboratory test and field test, the flow state and permeability of mixed residue soil were studied. The results show that when there is silty clay layer in the composite stratum, the flow state and permeability of the coarse-grained soil muck are greatly improved. Adding a small amount of bubbles or bentonite slurry, the muck state can meet the requirements of shield tunneling. When the content of silty clay is between 30% and 70%, the slag can reach a good plastic flow state. When the content of silty clay exceeds 70%, there is a risk of mud cake.

Key words: EPB shield; muck improvement; composite stratum; particle size analysis

近年来,由于施工速度快、对周围环境影响小、自动化程度高等优点,土压平衡盾构越来越广泛地应用于城市地铁区间隧道施工^[1]。渣土的流动状态、渗透性等性质对盾构机能否顺利掘进具有重大的影响。当渣土黏聚力过大时,容易在刀盘上结成泥饼;当渣土渗透系数过大时,会导致螺旋排土器喷涌。因此有必要对压力舱内的渣土进行改良,使渣土具有较好的流塑性以及较低的渗

透性。

目前,国内外学者主要通过添加泡沫、膨润土泥浆等改良剂对渣土进行改良。魏康林等^[2]基于微观试验分析了外加剂和土体相互作用的内在机理,并给出了不同地质情况下外加剂选择的依据。胡长明等^[3]为确保土压平衡盾构顺利穿越砂层,研究了不同配比的膨润土泥浆对渣土的改良效果,发现采用浓度为1:10膨润土泥浆改良能有效

收稿日期:2020-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678217,51378176);浙江省自然科学基金资助项目(LQ18E080004)

作者简介:钟小春(1976-),男,江西萍乡人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事盾构隧道施工技术研究。

*通讯作者:张洋(1995-),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事盾构隧道施工技术研究。

提高渣土的塑性及流动性。张润来等^[4]以成都砂卵石地层盾构施工为背景,分别采用泡沫、膨润土以及聚合物对渣土进行改良,并开展室内试验确定了各种改良剂的最佳掺入量。张宏伟等^[5]通过试验发现在风化花岗岩地层条件下采用分散性泡沫剂和水进行渣土改良可有效提高渣土的流动性,同时指出在卵石土和风化花岗岩复合地层中需采用膨润土、分散性泡沫剂和水相结合的渣土改良方案。Stephane Quebaud^[6]研究了泡沫剂的稳定性、可压缩性、发泡率等指标,并通过搅拌试验、坍落度、渗透试验等研究改良土的性质,得出改良土体的渗透性与泡沫的添加量有直接关系,而对刀盘的剪切抵抗则受孔隙率的影响的结论。Rory P. A. Ball 等^[7]针对缺少细小颗粒、易引起堵塞的两类土体进行系统分析,研究在该类地层中土压平衡盾构施工可能产生渣土改良问题,并通过试验对比研究了不同添加剂的改良效果。郭付军等^[8]采用聚合物为改良剂,研究了聚合物种类和浓度对纯砂地层的渗透性和流动性的改良效果。刘辉等^[9]针对土压平衡盾构在高黏性与上软下硬地层中掘进施工容易出现的问题,依托长株潭城际铁路湘江隧道工程,对土压平衡盾构在浅埋高黏性上软下硬地层掘进施工技术进行了研究探讨。宋上明等^[10]结合现场测试和室内试验,发现水和泡沫改良剂对昆明地区砾砂复合地层改良效果显著。

上述研究对土压平衡盾构渣土的状态进行了描述和规定,从渣土改良的对象到改良剂的选择和改良剂的用量都有细致的研究,但是上述研究的地层对象大多是单一地层,对于盾构穿越复合地层的渣土改良研究还比较少见。目前针对复合地层的渣土改良方案一般根据复合地层中最不利的地层进行设计,往往会导致经济成本过高。因此,为减少改良剂掺入量、降低工程经济成本,本文通过对不同的地层进行颗粒分析,考虑多种地层混合之后的级配曲线以及试验性质参数,提出了一种较为经济的复合地层渣土改良方法。

1 渣土塑性流动状态分析

土压平衡盾构在施工过程中,刀盘切削下来的渣土首先充满在压力舱中,通过对渣土施加压力来平衡开挖面上的水土压力,同时开挖下来的渣土通过螺旋排土器排出,这两个作用的实现需要压力舱中的渣土具备“塑性流动状态”。渣土的理想状态如图1和图2所示。



图1 实验室渣土状态

Fig.1 Laboratory residue state



图2 现场渣土状态

Fig.2 Site residue state

渣土的物理力学指标应符合以下几点要求:

(1)渗透系数 k : 渗透系数是衡量渣土抗渗能力的重要指标,若渣土的渗透系数过大,在较高的水压作用下,水体穿越压力舱和螺旋排土器形成集中渗流,渗流水在输送至出口的一瞬间,由于前方是临空的隧道内部,处于无压状态,渗流水便在忽然增大的压力下带动正常输送的渣土喷涌而出^[11]。一般认为要避免喷涌的发生,压力舱内渣土的渗透系数至少要小于 $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 。

(2)坍落度 T : 螺旋排土器的排土顺畅情况决定于压力舱内渣土的流动性。压力舱内渣土的流动性可以用坍落度来衡量,当渣土的坍落度在 150~200 mm 的范围内,坍落后土体形状规则,无明显的倾斜,轻拍不崩塌,认为渣土状态满足塑性流动状态的要求^[12]。

(3)内摩擦角 φ 和内聚力 c : 当压力舱内渣土具有较大的内摩擦角,渣土在压力舱的侧壁容易发生粘附现象。随着粘附渣土的增加容易形成闭塞,影响正常排土^[13]。同时内摩擦角也是影响刀盘扭矩的重要参数。根据国内外的施工经验,渣土的不排水强度小于 25 kPa 时,强度性质能够达到塑性流动状态的要求。

(4)压缩系数 a : 根据盾构机“结饼”受力模型和发生机理分析,可以得知压缩系数是盾构机“结饼”问题防治的关键参数,一般来说压力舱内渣土的压缩系数越大则盾构施工时越有利于避免“结

饼”发生。对于砂性土,压力在 100~200 kPa 时,土体的压缩系数大于 0.1 MPa⁻¹可以达到要求^[14]。

2 复合地层渣土改良分析

2.1 土压盾构地层适应性关系

根据 S. Jancsecz 等^[15]人对土压平衡盾构渣土改良室内外试验成果的总结,盾构与地层适应性的粒径分布曲线如图 3 所示。区域③为土压平衡盾构较为适合掘进的地层,区域②为粘粒含量较多的区域,容易粘附刀盘,导致盾构机结泥饼故障。区域④为粗颗粒含量较多的区域,需要进行渣土改良,当土颗粒进一步增大到了粗砾砂层时,则不适合采用土压平衡盾构施工。以上的土压平衡盾构与地层相适应的分类主要是根据土颗粒的颗分试验曲线来确定。

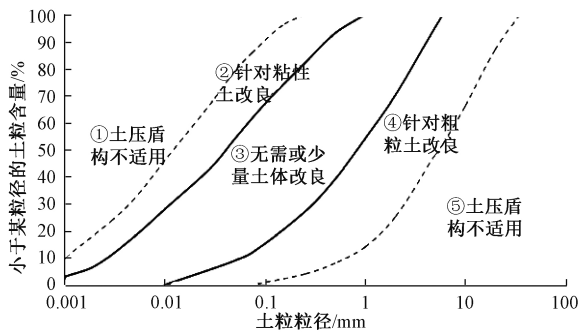


图 3 盾构与地层适应性的粒径分布曲线
Fig.3 Particle-size distributions curve of applicable strata for shield tunnel

对于某些地层,比如级配良好的粉砂层,渣土不需要经过改良就能够满足塑性流动的要求。但是在另外一些含有较大颗粒的地层中,则必须要对渣土进行改良才能保证施工的顺利。当盾构的掘进遇到多种地层复合的情况,其中某种地层原本需要渣土改良,但是在与其它地层的混合作用下,该地层的性能得到改善,压力舱的渣土仅靠自身的流塑性和渗透性就能满足要求。

在砂性地层和黏性地层的复合地层中,两种地层切削下来的渣土于压力舱内经过搅拌作用后混合均匀,黏性地层的细颗粒能够填充砂性地层大颗粒间的孔隙,渣土的级配得以改善,混合后的渣土能达到比较合适的状态,既能克服黏性地层结泥饼的问题,又能防止因渣土渗透系数过高而发生喷涌现象发生^[16]。

2.2 复合地层各粒组土粒含量计算分析

通过筛分试验可以得出复合地层中各粒组的

土粒含量。根据地质勘查报告可以得出各地层在掘进断面所占的面积比例。假设复合地层中分别含有 A 地层、B 地层、...、M 地层,根据实际工程地质情况及工程经验将各地层在压力舱内经过搅拌后混合均匀,各地层按照比例混合后渣土各粒组土粒含量的计算公式为:

$$Z_1 = x_A A_1 + x_B B_1 + \dots + x_M M_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = x_A A_2 + x_B B_2 + \dots + x_M M_2 \quad (2)$$

$$Z_n = x_A A_n + x_B B_n + \dots + x_M M_n \quad (3)$$

式中: A_1, A_2, \dots, A_n —A 地层中粒组 1、粒组 2、...、粒组 n 的土粒含量(%); B_1, B_2, \dots, B_n —B 地层中粒组 1、粒组 2、...、粒组 n 的土粒含量(%); M_1, M_2, \dots, M_n —M 地层中粒组 1、粒组 2、...、粒组 n 的土粒含量(%); Z_1, Z_2, \dots, Z_n —复合地层中粒组 1、粒组 2、...、粒组 n 的土粒含量(%); x_A, x_B, \dots, x_M —A 地层、B 地层、...、M 地层在掘进断面所占的面积比例(%)。

以下讨论粉质黏土与砾砂的复合地层渣土改良情况。取粉质黏土和砾砂土样,通过筛分试验得出各粒组的土粒含量,通过工程实际地质情况及工程经验,按照不同比例将这两种土样混合均匀,选取有代表性的 7 种土样,通过计算可以得出混合之后土样的粒组成分,分别测定各组土样的渗透系数,土样的性质参数见表 2,分别绘制各组土样的粒径分布曲线,如图 4 所示。

表 1 复合地层粒组土粒含量计算
Tab.1 The calculation of group particle content in the composite stratum

	地层比 例/%	粒组 1 /mm	粒组 2 /mm	...	粒组 n /mm
A 地层某粒组的土粒含量/%	x_A	A_1	A_2	...	A_n
B 地层某粒组的土粒含量/%	x_B	B_1	B_2	...	B_n
...
M 地层某粒组的土粒含量/%	x_M	M_1	M_2	...	M_n
复合地层某粒组的土粒含量/%	100	Z_1	Z_2	...	Z_n

从图 4 中可以看出,粉质黏土和砾砂各自处在土压平衡盾构适用范围的两个边缘。当盾构掘进遇到全断面的粉质黏地层或砾砂层时均为不利情况。粉质黏土的黏聚力过大,容易固结在刀盘上形成泥饼。砾砂的渗透系数高达 $2.8 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,抗渗能力和流动性达不到要求,极易发生螺旋排土器喷涌的现象。从砾砂地层的粒径分布曲线可以看出,砾砂地层缺少 0.075~0.1 mm 粒组的颗粒,在曲线相应的位置表现出不连续的特性。对砾砂地层的改良应该针对缺少的这部分粒组,需要在砾砂渣土补充 0.075~0.1 mm 粒组的颗粒,使

为强透水层。

(5)粉质黏土层:主要由黏粒、粉粒组成,局部含有细砂、中砂、有机质,土质较不均一。渗透系数选取 1.15×10^{-5} cm/s,为弱透水层。

3.2 复合地层级配分析

对各地层取的土样烘干后进行筛分试验,得出各粒组的颗粒含量,分别绘制各地层的粒组频率曲线和粒径分布曲线。从粒组频率曲线可以发现,各地层都缺少 0.075 mm 以下的颗粒;除粉细砂地层以外,其它四种地层都缺少 0.2~0.3 mm 这个粒组的颗粒。从粒径分布曲线中可以发现,砾砂和圆砾的曲线已经超出了土压平衡盾构无需或只需少量土体改良的范围,在该类地层中必须要对渣土进行改良。由于各地层的粒径分布曲线在横坐标为 0.075 mm 处发生突变,小于 0.075 mm 的颗粒明显减少,改良应该针对这部分缺少的颗粒。

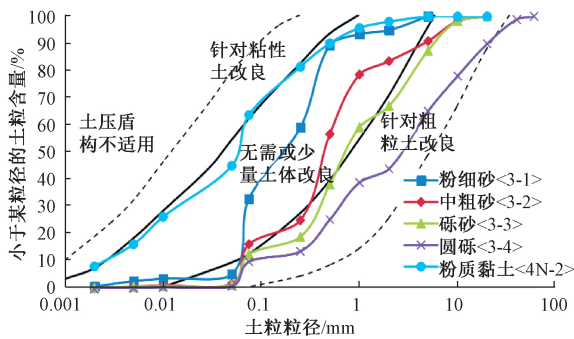


图6 各地层的粒径分布曲线

Fig.6 The particle-size distribution curve of each soil

右线第 25 环掘进遇到的地层为粉质黏土层 <4 N-2>、粉细砂层 <3-1>和砾砂层 <3-3>的复合地层。根据地质勘察报告,在盾构掘进断面粉质黏土层厚度为 2.67 m,占整环渣土总体积的 40.6%;粉细砂厚度 2.49 m,占整环渣土总体积的 47.4%;砾砂层厚度 1.02 m,占整环渣土总体积的 12.0%。右线第 25 环地层分布情况如图 7 所示。

右线第 301 环掘进遇到的地层为粉质黏土层 <4 N-2>、中粗砂层 <3-1>和圆砾层 <3-3>的复合地层。根据地质勘察报告,在盾构掘进断面粉质黏土层厚度为 1.23 m,占整环渣土总体积的 12.2%;中粗砂厚度 3.89 m,占整环渣土总体积的 76.6%;圆砾层厚度 1.16 m,占整环渣土总体积的 11.2%。右线第 301 环地层分布情况如图 8 所示。

分别计算右线第 25 环和 301 环的各粒组土粒含量,绘制粒径分布曲线。如果单独考虑复合地

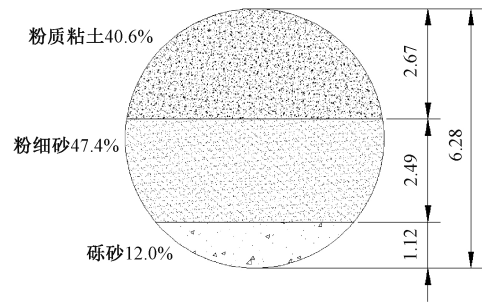


图7 右线第 25 环盾构掘进断面地层分布情况(单位:m)

Fig.7 Soil distributions of right line ring 25th shield tunneling section

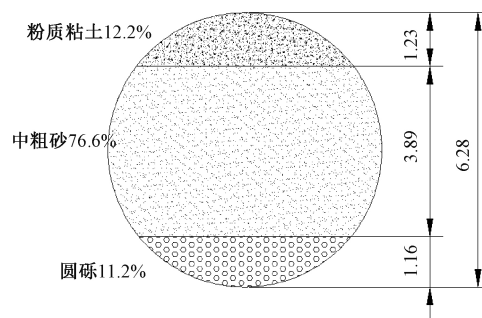


图8 右线第 301 环盾构掘进断面地层分布情况(单位:m)

Fig.8 Soil distributions of right line ring 301th shield tunneling section

层中最不利的地层的话,第 25 环为砾砂地层,第 301 环为圆砾地层,砾砂地层和圆砾地层已经处在必须进行土体改良的范围。分别测量这两环的渣土渗透系数和坍落度,第 301 环渣土的渗透系数为 1.5×10^{-4} cm/s,坍落度为 210 mm。渣土含水率偏高,状态偏稀,出渣不易控制。从图 9 可以发现,第 301 环渣土缺少 0.075~0.1 mm 粒组的颗粒,由于级配不良导致渣土渗透系数过高,经过掺入少量的气泡,改善了渣土的性能,从而达到流塑状态,出渣顺畅,达到渣土改良的效果。而第 25 环渣土中含有 40.6%的粉质黏土,在与粉质黏土的混合作用下,整体渣土的性能得到明显改善,曲线基本处于无需或只需少量土体改良的区域,测得第 25 环渣土的渗透系数为 6.8×10^{-5} cm/s,坍落度为 183 mm。从现场出渣的情况来看,螺旋排土器出渣顺畅,渣土流塑性较好,达到渣土的理想状态。

4 结论

1) 复合地层施工时应考虑渣土中的细颗粒会填充到粗颗粒之间的孔隙中,可使盾构掘进断面进入压力舱内的渣土颗粒级配良好,并使其具有较低的渗透性。因此,在盾构掘进前,可根据复合

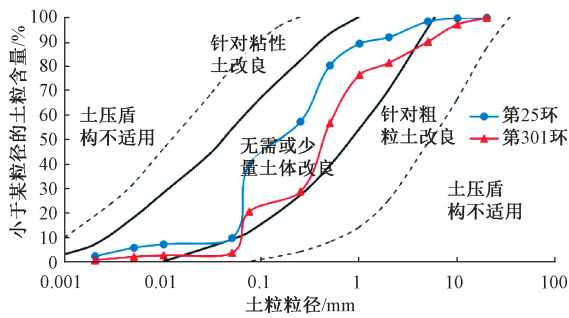


图9 右线第25、301环渣土粒径分布曲线

Fig.9 The particle-size distribution curve of soil in right line ring 25 and 301

地层断面粗细地层颗粒级配曲线和各自所占据的面积,合理确定渣土改良方案和准备改良掺入的材料,从而达到降低施工成本的目的。

2) 当复合地层中含有粉质黏土层时有利于盾构的掘进,粉质黏土层的含量超过30%时,切削下来的混合渣土本身具有较低的渗透性,经过掺入气泡或者少量的膨润土即可达到良好的流塑性,满足盾构施工的要求。当粉质黏土层的含量超过70%时,存在结泥饼的风险。

参考文献:

- [1] 杨志勇,乐贵平,江玉生,等.北京地区典型地层土压平衡盾构渣土改良技术[J].施工技术,2017,46(1):58-60.
- [2] 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(1):73-77.
- [3] 胡长明,崔耀,王雪艳,等.土压平衡盾构施工穿越砂层渣土改良试验研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2013,45(6):761-766.
- [4] 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):673-680.
- [5] 张宏伟,金平,刘朋飞,等.深圳风化花岗岩地层盾构防泥饼渣土改良技术[J].施工技术,2019,48(17):62-66.
- [6] 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 & Underground Space Technology, 1998,13(2):173-180.
- [7] BEZUIJEN A, SCHAMINEE P, KLEINJAN J A. Additive Testing for Earth Pressure Balance Shields: 12t Eur. Conference on Soil Mechanical and Geotechnical Engineering [C]//1999. 12t Eur. Conference on Soil Mechanical and Geotechnical Engineering.
- [8] 郭付军,赵振威,张杰,等.使用聚合物对纯砂层进行渣土改良的试验研究[J].隧道建设,2017,37(S1):53-58.
- [9] 刘辉,杨海林.长株潭城际铁路浅埋高黏性土软下硬不良地层土压平衡盾构施工技术研究[J].隧道建设,2016,36(2):221-227.
- [10] 宋上明,李志军,陈先智,等.昆明地区砾砂复合地层土压平衡盾构渣土改良技术[J].施工技术,2019,48(10):112-116.
- [11] 朱伟,秦建设,魏康林.土压平衡盾构喷涌发生机理研究[J].岩土工程学报,2004(5):589-593.
- [12] 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):284-292.
- [13] 贾璐,温法庆,黄欣,等.土压平衡盾构刀盘泥饼防治综合技术研究及应用[J].施工技术,2015,44(S1):243-246.
- [14] 汪国锋.北京砂卵石地层土压平衡盾构土体改良技术试验研究[D].北京:中国地质大学,2011.
- [15] JANCSEK S, KRAUSE R, LANGMAACK L. Advantages of Soil Conditioning in Shield Tunneling: Experiences of LRIS Izmir [J]. Proceeding of the World Tribology Congress, 1999,32:145-153.
- [16] 朱沪生,郑世兴,易宏.复合式土压平衡盾构机穿越闽江强透水砂层技术研究[J].城市轨道交通研究,2017,20(1):31-36.

(责任编辑 周雪梅)