

文章编号:1673-9469(2020)04-0040-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.04.007

压滤泥饼调制泥浆及其在砂层渣土改良中的应用研究

游智,钟小春*,张洋,孙金鑫

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210000)

摘要:为解决泥水平衡盾构施工中压滤泥饼废弃产生的环保问题,提出一种利用压滤泥饼调制泥浆改良砂层渣土的新方法。从泥浆的密度控制、稳定性控制和粘度控制三个方面,开展压滤泥饼调制泥浆试验,从流动性与渗透性角度,确定改良砂层渣土的适宜泥浆掺量。结果表明:压滤泥饼调制的泥浆密度宜在 $1.29\sim 1.34\text{ g/cm}^3$ 之间,掺入泥浆质量3%~5%的钠基膨润土,泥浆具有较高的稳定性和粘度。掺入渣土质量6%~10%的调制泥浆,便能达到与使用纯膨润土改良渣土相近的效果,泥浆用量大为减少。所以利用压滤泥饼调制泥浆并运用于砂层渣土改良是可行的,是一个节能环保的新思路。

关键词:盾构;压滤泥饼;泥浆;砂层;渣土改良

中图分类号:U455.43

文献标识码:A

Study on the Modulated Mud of Filter Press Mud Cake and Its Application in Soil Conditioning

YOU Zhi, ZHONG Xiaochun*, ZHANG Yang, SUN Jinxin

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: In order to solve the environmental protection problem caused by the waste of filter press mud cake in the construction of mud-water balance shield, a new method of using filter press mud cake to modulate mud to improve the sand layer and muck was proposed. From the three aspects of mud density control, stability control and viscosity control, the press mud cake preparation mud test was carried out to determine the appropriate mud content for the improved sand and muck from the perspective of fluidity and permeability. The results show that the density of the mud prepared by the filter press mud cake should be between 1.29 g/cm^3 to 1.34 g/cm^3 . Mixed with 3% to 5% sodium bentonite of the mud mass, the mud has high stability and viscosity. Mixed with the residue modulated mud with a mass of 6% to 10% can achieve a similar effect to the use of pure bentonite to improve the muck, and the amount of mud is greatly reduced. Therefore, it is feasible to use the filter press mud cake to modulate the mud and apply it to the improvement of the sand layer and muck, which is a new idea of energy saving and environmental protection.

Key words: shield; filter press mud cake; mud; sand layer; soil conditioning

二十一世纪以来,盾构法施工技术在我国隧道建设领域中得到了飞速发展,泥水平衡盾构法施工因其良好的地层适应性被广泛采用,目前大多数的越海越江大直径隧道都采用泥水平衡盾构法进行施工^[1]。随着社会对环保节能要求的不断提高,对泥水平衡盾构泥浆系统的弃浆处理提出

了更高的要求^[2-3]。压滤机和泥水系统相结合,利用压滤机处理盾构掘进产生的弃浆的方法近年来逐渐被推广利用^[4-5]。经压滤产生的大量泥饼,若采用丢弃的方式处理,不仅运输成本高,对环境也有很大污染。若能进一步处理,将其调制成泥浆,并能为邻近区间土压平衡盾构施工砂层渣土改良

收稿日期:2020-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678217)

作者简介:游智(1991-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事盾构隧道施工技术研究。

* 通讯作者: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。

所用,这样“变废为宝”,不仅保护环境,减少浪费,还能保障土压盾构顺利掘进,节约工程成本,具有较好的社会效益和经济效益。

对于土压平衡盾构的砂层渣土改良,国内外学者进行了大量研究。目前常用的砂层渣土改良剂有水、泡沫剂、膨润土泥浆等。Psomas等^[6]在试验中对盾构施工中砂层加入泡沫进行改良,发现加入泡沫后的混合砂抗剪强度和渗透系数大大减小。胡长明等^[7]发现采用浓度为1:10膨润土泥浆,控制泥浆体积掺入比为1:5进行掘进施工时,渣土呈比较理想的流塑态,螺旋机排土顺畅且推进速度有所提升,刀盘的磨损程度明显减小。

在利用工程废弃材料改良渣土方面,也有学者进行了尝试。王大永等^[8]在哈尔滨地铁3号线沿江车站区间盾构穿越富水砂层时,利用膨润土掺加暗挖区间开挖的黏土改良渣土,效果与利用纯膨润土泥浆改良相似。目前,关于如何利用压滤泥饼调制泥浆进而改良渣土的研究还是很少,工程实践中也鲜有尝试。本文通过一系列室内试验,从泥浆的性质及用其改良渣土的效果两方面,探究利用压滤泥饼调制满足砂层渣土改良需要的泥浆的可行性及方法。

1 压滤泥饼调制泥浆试验

土压平衡盾构施工中,用于渣土改良泥浆应具有合理范围内的密度和粘度以保证改良效果,同时也应具有较好的稳定性,使其便于拌制及运输。下面就泥浆的密度控制、粘度控制、稳定性控制三个方面,开展压滤泥饼调制泥浆的试验研究。

1.1 压滤泥饼调制泥浆的密度控制

根据之前有关渣土改良的研究,为了达到砂性土地层渣土改良的效果,其泥浆掺入量一般需要达到渣土质量的15%~25%^[9]。为了减少泥浆的掺入量,可以通过提高泥饼调制泥浆的密度来实现^[10]。压滤泥饼如图1,用其调制泥浆的试验结果如表1所示。

从表1中可看出,泥浆苏氏粘度与泥浆密度密切相关。当泥浆密度达到1.365 g/cm³以上时,泥浆流动性较低,不便于泥浆拌制和运输。因此,为满足渣土改良的要求,且考虑到减少泥浆的掺入量,压滤泥饼调制的泥浆密度宜控制在1.29~1.34 g/cm³。

现场进行压滤泥饼拌制泥浆时,泥饼与水的掺入质量比与拌制泥浆的密度、泥饼的含水率有很大的关系。为此需要进行泥浆的二相体分析,建立相关物理模型,通过计算分析得到泥饼与水



图1 压滤泥饼

Fig. 1 Filter cake

表1 压滤泥饼调制泥浆性能试验

Tab. 1 Performance test of mud prepared by filter cake

序号	泥浆密度/(g·cm ⁻³)	苏氏粘度/s	状态描述
1	1.20	22.3	—
2	1.29	50.5	—
3	1.34	142.5	—
4	1.365	>500	慢慢滴漏
5	1.39	>1 000	无法流动

的掺入质量比、拌制泥浆的密度、泥饼的含水率三者之间的关系如公式(1)。

$$m = \frac{\rho}{\rho - 1} \times \frac{G_s - 1}{(1 + w)G_s} - 1 \quad (1)$$

式中, m ——单位质量的泥饼所需掺入水的质量, ρ ——拌制泥浆的密度, w ——压滤泥饼的含水率, G_s ——泥浆颗粒比重。

依据上述物理模型的计算结果,可以得到泥饼与水的掺入质量比与拌制泥浆的密度、泥饼的含水率的关系曲线如图2所示。根据此理论计算结果,可以再结合现场实际情况,确定拌制泥浆时泥饼与水的质量掺入比。

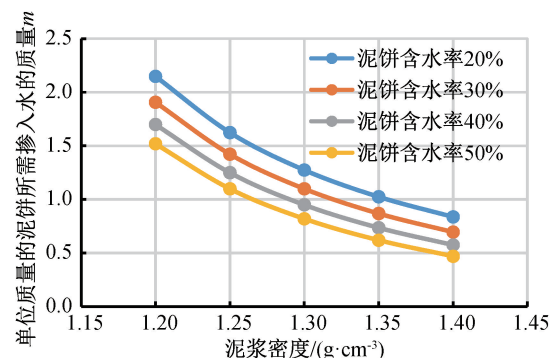


图2 压滤泥饼拌制泥浆时泥饼与水掺入比变化曲线
Fig. 2 Relationship between mixing ratio of mud cake and water when filter cake is mixed with mud

1.2 压滤泥饼调制泥浆的稳定性控制

在调制泥浆的过程中发现,采用纯泥饼调制的泥浆稳定性较差,长时间静置会出现明显的泌水和分层现象,因此需要对其进行进一步改良,并进行稳定性试验。

在密度分别为 1.29 g/cm^3 和 1.34 g/cm^3 的纯泥饼调制泥浆中,分别掺入钠基膨润土、钙基膨润土(混入碳酸钠分散剂)、CMC 溶液(质量含量 1%)对其进行改良,用激光粒度分析仪测得其不同粒径颗粒含量变化如图 3 所示。

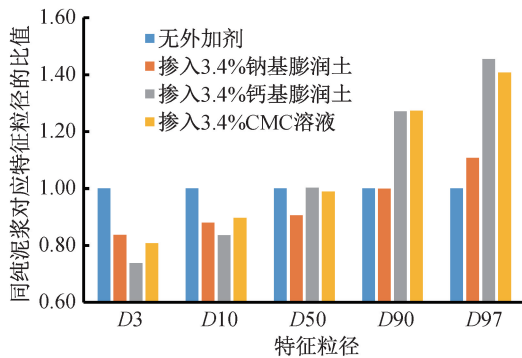


图3 掺入不同外加剂泥浆颗粒粒径变化情况
Fig. 3 Variation of particle size of mud mixed with different additives

从图 3 可以发现,掺入不同外加剂后泥浆的最小粒径(D3)均有不同程度减小;掺入钠基膨润土后,泥浆的平均粒径(D50)明显减小;掺入钙基膨润土和 CMC 溶液的泥浆平均粒径(D50)无明显变化,而最大粒径(D97)明显增大。将掺入不同外加剂的泥浆静置 12 h 后,观察其泌水率,结果见图 4、图 5、图 6。

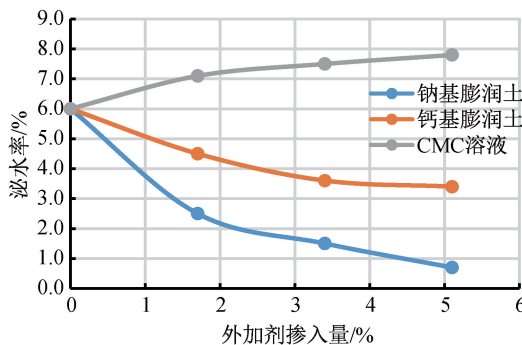


图4 密度 1.29 g/cm^3 泥浆掺入不同外加剂的稳定性试验
Fig. 4 Stability test of 1.29 g/cm^3 mud mixed with different additives

试验发现,掺入不同的外加剂对泥浆的稳定性有明显影响,掺入钠基膨润土的泥浆,其泌水率明显下降,当掺入量达到泥浆质量的 1.7% 时,泌

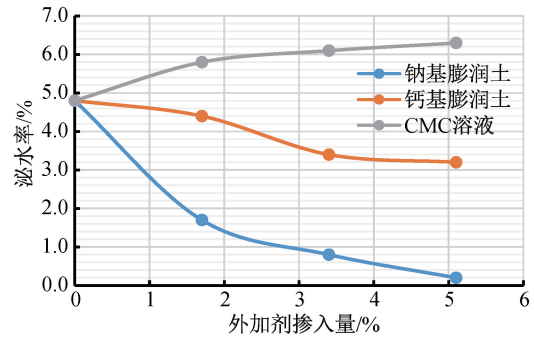


图5 密度 1.34 g/cm^3 泥浆掺入不同外加剂的稳定性试验
Fig. 5 Stability test of 1.34 g/cm^3 mud mixed with different additives



图6 掺入不同外加剂泥浆稳定性对比
Fig. 6 Stability comparison of mud mixed with different additives

水率降低至 2.5%,当掺入量达到泥浆质量的 3.4% 时,泌水率降低至 1% 以下,几乎看不到水层,泥浆表现出很好的稳定性;掺入钙基膨润土对泥浆稳定性的改良效果不明显;掺入 CMC 溶液甚至会使泥浆泌水率增大、稳定性变差。

根据试验结果,掺入钠基膨润土对泥浆稳定性的改良效果最好。针对掺入钠基膨润土的泥浆,为了达到渣土改良需要满足的粘度,需进一步进行泥浆的粘度性能控制试验。

1.3 压滤泥饼调制泥浆的粘度控制

在密度分别为 1.29 g/cm^3 和 1.34 g/cm^3 的泥浆中掺入泥浆质量的 1.7%、3.4%、5.1% 的钠基膨润土,充分搅拌 10 min,静置 24 h 后,其粘度性能数据见表 2。

从表 2 中可以看出,掺入钠基膨润土后泥浆改良后的粘度明显提高,由于苏氏漏斗粘度测试范围有限,进一步开展泥浆的塑性旋转粘度试验,试

表 2 掺入钠基膨润土改良后的泥浆粘度性能
Tab. 2 Viscosity properties of modified mud mixed with sodium bentonite

序号	泥饼拌制 泥浆密度 /(g·cm ⁻³)	纯泥饼拌 制泥浆粘 度/s	掺入钠基 膨润土与泥 浆质量比/%	改良后的 泥浆粘 度/s	状态 描述
1	1.29	50.5	1.7	70.4	流动性好
2	1.29	50.5	3.4	129	流动性较好
3	1.29	50.5	5.1	359	流动性一般
4	1.34	142.5	1.7	191	流动性较好
5	1.34	142.5	3.4	313	流动性一般
6	1.34	142.5	5.1	>500	泥浆呈现膏状

验仪器如图 7 所示。



图 7 NXS-11B 旋转粘度计

Fig. 7 NXS-11B rotational viscometer

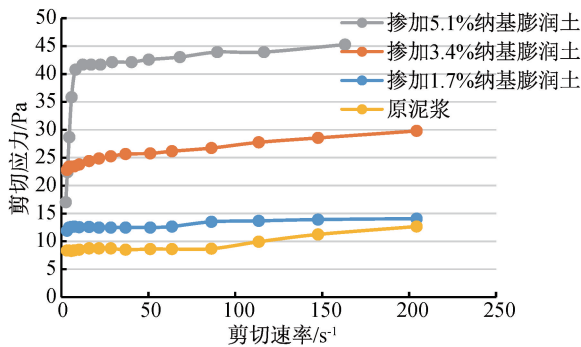


图 8 密度为 1.29 g/cm³ 纯泥饼拌制的
泥浆改良后塑性粘度曲线

Fig. 8 Plastic viscosity curve of mud mixed
with 1.29 g/cm³ pure mud cake

试验结果如图 8、图 9 所示,根据试验结果可以看出,密度为 1.29 g/cm³ 和 1.34 g/cm³ 的泥浆中掺入其质量 3.4% 以上的钠基膨润土,其泥浆粘度得到了大幅度提高,效果显著,可以满足砂层渣土改良的需要。考虑到现场施工中涉及大浆液流动性的问题,可以在本试验结果的基础上进一步开展

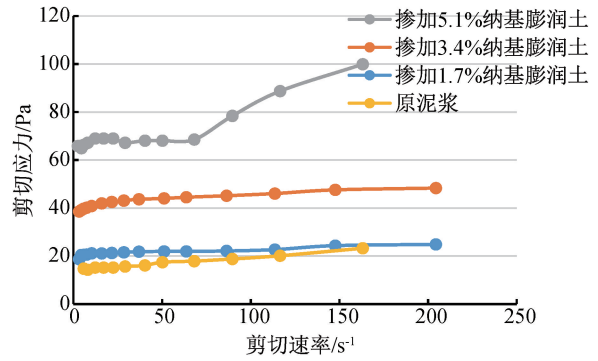


图 9 密度为 1.34 g/cm³ 纯泥饼拌制的
泥浆改良后塑性粘度曲线

Fig. 9 Plastic viscosity curve of mud mixed with
1.34 g/cm³ pure mud cake

试配试验,掺入钠基膨润土质量在 3%~5% 之间。

2 砂土改良试验

以广州地铁十八号线为例,其中 HP1 中间风井—HP2 盾构井区间为泥水平衡盾构,现场有大量的压滤泥饼,HP2 中间风井—HP3 盾构井区间为土压平衡盾构,穿越砂土地层段需要进行渣土改良。根据勘察报告中土压平衡盾构穿越的砂土地层的颗粒级配曲线,配制足量的砂样备用,其颗粒级配曲线如图 10 所示。根据压滤泥饼调制泥浆试验的结果,配制密度为 1.34 g/cm³ 并掺入 4% 质量的钠基膨润土的泥浆进行渣土改良试验^[11-12]。

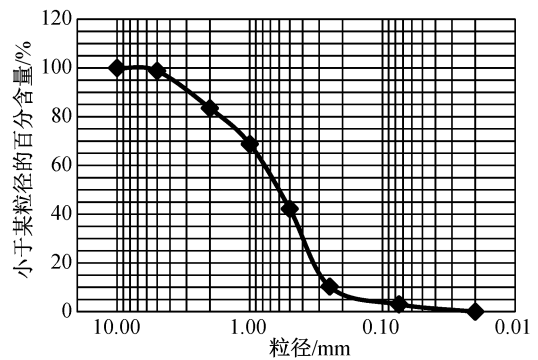


图 10 中粗砂样本颗粒级配曲线

Fig. 10 Grain size distribution curve of
medium coarse sand sample

2.1 流动性试验

在配制好的砂层土样中,分别掺入不同量的水和调制好的泥浆,研究分析其流动性随掺水量和掺泥浆量的变化情况。

本试验砂土和水及泥浆混合物的流动性通过塌落度和跳桌流动度来综合评价。试验方法依据

为 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》和 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》,试验仪器如图 11 所示,试验结果见图 12、图 13。



(a) 跳桌试验 (b) 塌落度试验

图 11 流动性试验
Fig. 11 Fluidity test

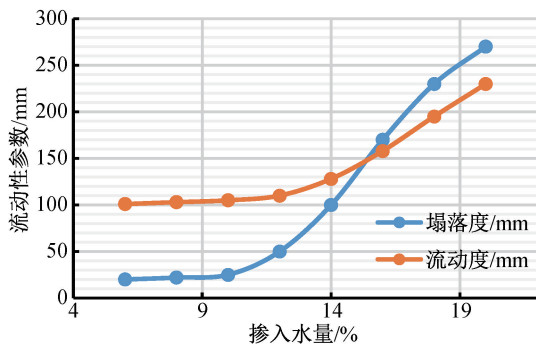


图 12 掺入不同水量渣土流动性变化情况
Fig. 12 Fluidity change of slag soil mixed with different amount of water

试验发现,随着掺入水量的增加,砂土流动性明显提高,当掺入渣土质量的 14% 以上的水时,水-砂土混合物塌落度和跳桌流动度均能达到

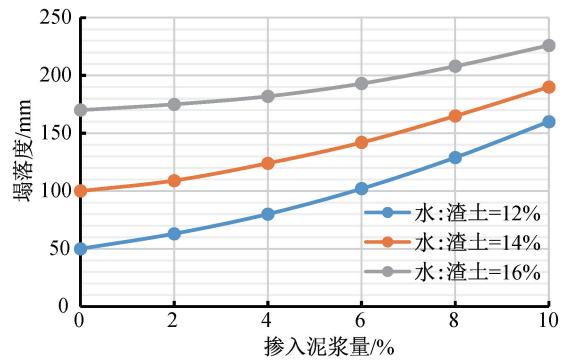


图 13 掺入不同泥浆量渣土塌落度变化情况
Fig. 13 Variation of slump of slag soil mixed with different amount of mud

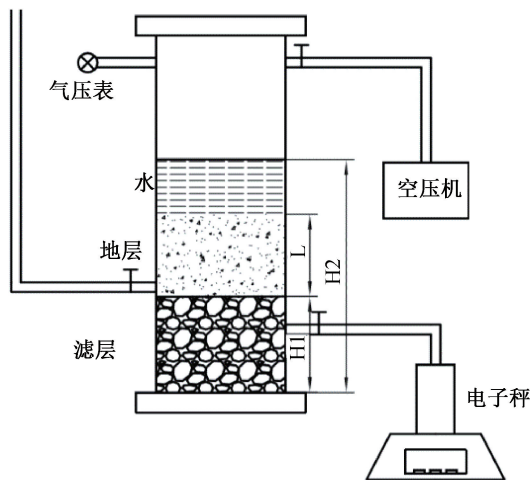
100 mm 以上,呈现较好的流动状态;掺入调制的泥浆后,水-砂土-泥浆混合物的流动性和整体性进一步提高;当掺入渣土质量的 6% 以上的泥浆时,改良后的渣土呈较好的流塑状态。

2.2 渗透试验

渗透试验的目的是分析砂土地层渣土改良前后的渗透系数变化情况,确保改良后的渣土能满足盾构施工要求^[13-14]。本试验利用的是空压机+可密闭渗透仪组成的带压渗透仪装置,装置及试验过程如图 14 所示。其中,空压机提供的气压可以换算成常水头渗透试验的水头高度,渗透系数按照式(2)计算。

$$k = \frac{VL}{A(H_2 + H_3 - H_1)t} \quad (2)$$

式中, k ——渗透系, m/s; V ——渗出水的体积, m^3 ; L ——渣土的高度, m; A ——渗流横截面积, m^2 ; H_1, H_2 ——水头高度, m; H_3 ——气压换算



(a) 渗透装置示意图



(b) 渗透试验

图 14 带压渗透试验

Fig. 14 Permeability test under pressure

表3 掺入不同量泥浆渣土的渗透系数(单位:cm/s)

Tab.3 Permeability coefficient of soil mixed with different amount of mud

泥浆掺入量	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
渗透系数	2.33×10^{-2}	6.79×10^{-4}	4.66×10^{-4}	2.54×10^{-4}	1.97×10^{-4}	1.59×10^{-4}	1.33×10^{-4}

水头高度, m; t —— 渗流时间, s。

掺入不同量泥浆渣土的渗透系数见表3。根据试验结果,未掺入泥浆的渣土渗透性较强,渗透系数达到 2.33×10^{-2} ,掺入调制的泥浆后,渗透系数明显下降,达到 10^{-4} 数量级,可以满足土压平衡盾构施工的要求^[15-17]。试验发现,当掺入泥浆量达到6%以上,随着泥浆掺入量的增加,渣土泥浆混合物的渗透性降低程度逐渐减缓。综合考虑改良效果和经济性,泥浆最优掺入量为渣土质量的6%~10%。

实际施工过程中,盾构机穿越全断面中粗砂地层时,单采用泡沫剂进行渣土改良时,盾构机推力达到40 000 kN左右,刀盘扭矩达到12 000 kN·m,刀具磨损较为严重,并且渣土易排水固结,引发在土舱及螺旋机内“结泥饼”现象,后果严重时会导致盾构机无法顺利排土,掘进困难^[18-21]。采用泡沫剂+调制泥浆进行渣土改良,盾构机推力和刀盘扭矩均能下降20%以上,螺旋机排土顺畅,推进速度也有所提高且稳定。因此,从实际施工的情况来看,利用泥水平衡盾构压滤泥饼调制泥浆,用于土压平衡盾构砂层渣土改良,能取得不错的效果,同时节约了工程成本,保护了环境。

3 结论

1) 利用泥水平衡盾构压滤泥饼调制泥浆用于土压平衡盾构渣土改良时,泥浆密度宜为 $1.29 \sim 1.34 \text{ g/cm}^3$ 。密度过小则泥浆掺入量过大,不经济;密度过大则泥浆粘度过大,流动性较差甚至无法流动,在施工中无法运输和使用。

2) 压滤泥饼调制泥浆,若不掺入外加剂,泥浆泌水率较大,稳定性较差,不便于施工。比较掺入钠基膨润土、钙基膨润土、CMC溶液(质量含量1%)三种外加剂效果,钠基膨润土对其稳定性提高作用明显,当掺入3%质量以上的钠基膨润土时,静置24 h以上,泌水率降到1%以下,浆体几乎没有水层,具有较好的稳定性。

3) 掺入钠基膨润土对调制泥浆粘度的提高有明显效果,掺入泥浆质量3.4%以上的钠基膨润土时,泥浆粘度大幅提高,效果显著。实际施工中,考虑到现场涉及大浆液流动性的问题,可以在钠基膨润土掺入量3%~5%范围内进一步开展试配

试验,以进一步明确钠基膨润土的掺入量。

4) 将利用压滤泥饼配制的密度为 1.34 g/cm^3 并掺入4%质量钠基膨润土的泥浆,运用到土压平衡盾构中粗砂地层渣土改良中,取得了不错的效果。泥浆掺入量仅需达到渣土质量的6%~10%,就可以接近纯膨润土泥浆的改良效果,渣土呈现较好的流动性和较低的渗透性,能满足施工要求。

5) 在使用压滤机处理泥水平衡盾构弃浆的基础上,进一步考虑如何利用压滤泥饼调制泥浆,并运用到临近区间土压平衡盾构施工中,是一个泥浆废弃物回收利用的节能环保新思路,有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴巧玲. 盾构构造及应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [2] 苏清贵,翟志国,邓亨义. 泥水盾构施工废弃泥浆的环保处理技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(S2): 222-226.
- [3] 刘豫东,王洪新. 泥水加压盾构泥水分离与处理方法及模式[J]. 现代隧道技术, 2007(02): 56-60.
- [4] 薄利. 泥水处理技术在泥水盾构隧道施工中的应用[J]. 隧道建设, 2007(06): 66-70.
- [5] 游永锋,唐高洪,唐纵雄. 越海盾构泥浆压滤处理施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2012, 32(S2): 227-232.
- [6] PSOMAS S. Properties of Foam/Sand Mixtures for Tunneling Applications[D]. Oxford: University of Oxford, 2001.
- [7] 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(06): 761-766.
- [8] 王大永,刘思国,谢丽霞. 膨润土及黏土用于地铁盾构渣土性能改良的分析与研究[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(10): 37-40.
- [9] 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, 37(08): 1018-1025.
- [10] 赵东杰. 新型土压平衡盾构用泥浆研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2012.
- [11] 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, 2018, 47(05): 673-680.
- [12] 张文萃. 土压平衡式盾构穿越含砂土层渣土改良试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- [13] 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(05): 589-593.
- [14] BEZUIJEN A, SCHAMINEE P E L, KLEINJAN J A. Additive Testing for Earth Pressure Balance Shields [C]//Twelfth European Conference on Soil Mechanics

- and Geotechnical Engineering (Proceedings) The Netherlands Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; Ministry of Transport, Public Works and Water Management; AP van den Berg Machinefabriek; Fugro NV; GeoDelft; Holland Railconsult. 1999 (Volume 3).
- [15] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [16] 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.
- [17] 曹利强, 张顶立, 孙振宇, 等. 盾构隧道穿越富水砂层开挖面稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2019, 059(003): 35-38.
- [18] 刘海宁, 张亚峰, 刘汉东, 等. 砂土地层中泥水盾构掌子面主动破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 038(003):572-581.
- [19] 宋克志, 王本福. 常见盾构刀盘型式及选用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007(06):44-46.
- [20] 王俊, 何川, 王闯, 等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(01):177-185.
- [21] 邓亨义, 徐雪莹, 陈明娟. 富水砂卵石地层盾构隧道施工泥浆的研究与应用[J]. 中国工程科学, 2010, 12(12):79-82.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第39页)

能力;此外,棕榈纤维可在土体中形成空间网状结构,限制土体颗粒位移以及土体破坏时的裂隙深部扩展。

参考文献:

- [1] 石磊. 击实黄土强度特性研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [2] ZOU W L, HAN Z, YE J B. Influence of External Stress and Initial Density on the Volumetric Behavior of an Expansive Clay During Wetting[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(10): 1-12.
- [3] 靳松洋, 王俊杰, 黄诗渊, 等. 压实黏土抗拉强度测试新方法研究[J]. 人民长江, 2020, 51(7):212-217.
- [4] 胡艳欣. 红黏土含水量和干密度与抗剪强度的相关性分析[J]. 人民长江, 2017(S1):249-252.
- [5] 刘宝生, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋土工程性质研究进展[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4):540-547.
- [6] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和粘性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10):1933-1940.
- [7] 王进. 加筋土边坡回填土改良试验及稳定性分析[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(04):618-621.
- [8] MOHAMED A E M K. Improvement of Swelling Clay Properties Using Hay Fibers[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38(JAN.): 242-247.
- [9] KHIEM Q T, TOMOAKI S, HIROSHI T. Improvement of Mechanical Behavior of Cemented Soil Reinforced with Waste Cornsilk Fibers[J]. Construction & Building Materials, 2018, 178: 204-210.
- [10] 卫杰, 张晓明, 丁树文, 等. 黄麻纤维加筋条件对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(06):59-63.
- [11] YIXIAN W, PANPAN G, SHENGBIAO S, et al. Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2016, 34(4): 1079-1088.
- [12] 李晓龙. 棕榈纤维的基本性能研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- [13] 璩继立, 俞汉宁, 江海洋, 等. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(05):1216-1220.
- [14] 唐皓, 李华华, 刘驰洋, 等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及细观结构[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7832-7837.
- [15] 孙中明, 璩继立. 棕榈加筋土抗剪强度的影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(005):203-207.
- [16] 马福全, 常源朝, 高建新, 等. 不同纤维掺量加筋土无侧限抗压强度分析[J]. 山西建筑, 2016, 42(13):64-66.
- [17] 包承纲, 丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. 土工基础, 2012, 26(1):80-83.
- [18] 璩继立, 赵冬雪, 李贝贝. 加筋条件对棕榈加筋土强度的影响[J]. 工业建筑, 2015, 45(3):115-119.
- [19] 王剑焯. 玄武岩与玉米秸秆纤维加筋土力学性能及其在边坡中的应用研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2016.
- [20] LIU J L, HOU T S, LUO Y S, et al. Experimental Study on Unconsolidated Undrained Shear Strength Characteristics of Synthetic Cotton Fiber Reinforced Soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 38(2): 1-11.
- [21] 奚灵智, 王龙威, 王颖, 等. 植被根系固土抗剪强度试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2019, 36(04):84-89.
- [22] 冯幻. 基于复合式加筋改良方法的软塑性黏土性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

(责任编辑 王利君)