

砂-黏混合地层渣土改良及膨润土 泥浆掺入规律研究*

董敏琪¹ 陈志敏^{1,2} 黄峰³ 肖瑞传³ 张会东³ 彭洪秋³

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 730070, 兰州; 2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 730070, 兰州; 3. 广州地铁集团有限公司, 511430, 广州//第一作者, 硕士研究生)

摘要 通过试验对钙剂膨润土和钠基膨润土进行比选, 选择泥浆质量分数为 10%, 膨化时间为 24 h 的钠基膨润土作为渣土改良剂。以广州地铁 21 号线为例, 针对砂-黏混合地层的特点, 通过含砂率梯度及含水率梯度的土样集, 得到多种工况下的改良剂最优掺入比, 进一步总结了钠基膨润土泥浆掺入比随地层含砂率及含水率变化的掺入规律, 并拟合得到了三者的函数关系。

关键词 地铁; 渣土改良; 砂-黏混合地层; 膨润土泥浆掺入

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.023

Study on Mixing Law of Residue Improvement and Bentonite Incorporation in Sand-clay Mixed Formation Stratum

DONG Minqi, CHEN Zhimin, HUANG Feng, XIAO Ruichuan, ZHANG Huidong, PENG Hongqiu

Abstract Calcium bentonite and sodium bentonite are compared and selected through tests. The slurry mass fraction is chosen to be 10%, and the sodium bentonite of 24 h expansion time is chosen as residue modifier. Taking Guangzhou Metro Line 21 as an example, targeting the sand-clay mixed formation stratum characteristics, through the soil sample set of sand content gradient and water content gradient, the optimal proportion of residue modifier under various working conditions is obtained. The mixing law of sodium bentonite slurry ratio with the change of sand content and water content in the formation is further summarized, and the function is fit to obtain functional relationship of the three.

Key words metro; residue improvement; sand-clay mixed formation; bentonite slurry mixing

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

将渣土改良为流塑性的理想状态, 是土压平衡盾构顺利施工的关键^[1]。国内外学者对渣土改良的新材料及常用材料新配方做了诸多研究。改良地层包括富水砂层^[2]、砂卵石地层^[3]、黏性土层^[4]、风化花岗岩地层^[5]及其他特定土层^[6]。针对砂-黏混合地层盾构渣土改良鲜有研究。砂-黏混合地层兼具砂质地层与黏性土层双重特性: 当部分地层黏粒含量居多时, 会出现土舱结泥饼、土体易黏结刀盘等情况^[7]; 当地层砂粒含量居多时, 会出现刀盘磨损、土舱堵塞及喷涌等情况^[8]。通过室内试验得到的单一地层土的渣土改良配比方案无法将复杂地层的渣土改良达到理想状态。

广州地铁 21 号线(以下简为“21 号线”)工程地层为砂-黏混合地层, 其土压平衡盾构施工中遇到了上述难题。对此, 本文基于 21 号线的工程地质情况, 通过室内重塑土样, 根据含砂率梯度及含水率梯度形成砂-黏混合地层土样集, 对砂-黏混合地层的渣土改良进行研究, 分析了改良剂掺入比规律, 并拟合掺入比随地层含砂率及含水率变化的函数关系, 以期为土压平衡盾构施工的渣土改良提供理论参考。

1 渣土改良剂的选择

在改良材料方面, 国内外常用渣土改良材料有 4 大类, 各自代表性材料分别是膨润土、泡沫剂、环氧树脂、CMC(羧甲基纤维)。其中膨润土因不透水性强、浆液流动性大、适用性广等优点被工程实践广泛采纳。本次渣土改良试验研究也采用膨润土浆液。目前常用的膨润土有钙基膨润土和钠基膨润土。

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

1.1 膨润土的选择

本研究采用小型泥浆搅拌机进行泥浆配置。首先,分别配置质量分数为 1% ~ 18% 的钙基膨润土泥浆与钠基膨润土泥浆;然后,采用马氏漏斗黏度计,测出不同浓度下钙基膨润土泥浆和钠基膨润土泥浆的黏度,并绘制膨润土质量分数-泥浆黏度关系图,如图 1 所示。

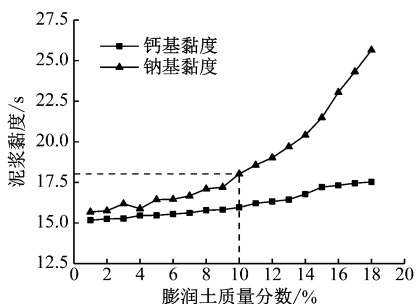


图1 膨润土质量分数-泥浆黏度关系曲线

Fig. 1 Bentonite mass fraction-slurry viscosity relationship curve

由图 1 可见,在质量分数相同的情况下,钠基膨润土的泥浆黏度更大。因此,钠基膨润土更加适合作为渣土改良剂。这与文献[9]的结论一致。

1.2 泥浆质量分数及膨化时间

21 号线的土压平衡盾构机采用胶管挤压泵泵送膨润土泥浆。接入尾盾的支路管径为 25 mm,相应有效内径 $\Phi_{\text{内}} \leq 20$ mm,且接入盾尾的支路管上设有三通、球形阀等设备零部件。可预见,如果有泥浆疙瘩,则将会堵塞泥浆泵送设备,降低盾构安全性及施工效率。

在保证膨润土泥浆泵送畅通情况下,应尽可能采用黏度较高的泥浆溶液,其中的膨润土颗粒用于填充砂黏土颗粒之间空隙以降低改良渣土渗透系数,可保障盾构掌子面稳定性^[10]。但试验也发现,当泥浆质量分数超过 10% 时,泥浆疙瘩增量明显,且泥浆疙瘩的直径增大。因此,配置泥浆的膨润土质量分数最优值为 10%。

在膨润土膨化试验中发现,在泥浆质量分数为 10%、搅拌机间隔搅拌 18 h 的膨润土泥浆中,仍存在微量直径约为 1 cm、未融于水的泥浆疙瘩,附着于筒壁。因此需进一步优化。

通过室内试验,得到泥浆黏度与膨化时间的关系,如图 2 所示。由图 2 可知,增加泥浆膨化时间至 24 h,不仅能有效减小泥浆疙瘩的直径和数量,还能增大膨润土泥浆黏度至靠近峰值,当超过 24 h 时,

泥浆状态基本不再变化。因此,满足砂-黏混合地层施工要求的最佳膨化时间为 24 h。

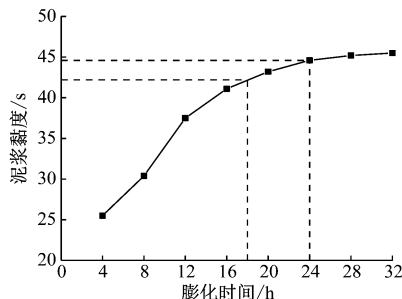


图2 膨化时间-泥浆黏度关系曲线

Fig. 2 Expansion time-slurry viscosity relationship curve

综合上述,本研究选取质量分数为 10%、膨化时间为 24 h 的钠基膨润土泥浆作为标准改良剂。

2 砂-黏混合地层膨润土的掺入规律

2.1 理想状态渣土的的坍塌度

参考工程实际和国内众多学者的研究成果,坍塌度试验被广泛用来对改良后的盾构渣土状态进行评价。在室内试验中,改良后理想状态的渣土如图 3 所示。试验结果表明,在不同含砂率及不同含水率的情况下,在坍塌度 H 为 150 ~ 200 mm 时,采用钠基膨润土改良后的盾构渣土均能保持良好的流塑性及保水性,达到理想状态。



a) 黏粒含量居多的渣土 b) 砂粒含量居多的渣土

图3 改良后理想状态的渣土坍塌度试验

Fig. 3 Slump test of ideal state residue after optimization

2.2 室内渣土改良试验方案

土压平衡盾构渣土改良试验研究采用重塑土样。根据 21 号线地质勘探资料,盾构施工地层主要为砂-黏混合地层,其含砂率 β 大致为 15% ~ 85%;相应的含水率 ω 为 8% ~ 22%。

室内试验方案如下:

1) 对室内重塑土样采用不同的 β 。对整个地层的 β 进行梯度分级,按砂的质量与砂-黏地层土总质量之比分别取 20%、40%、60%、80%,形成 β 梯度土样集。

2) 调查统计不同 β 地层的 ω , 确定 ω 范围。基于调研结果, 划分 ω 梯度, 形成砂-黏混合地层土样集如表 1 所示。

3) 利用标准改良剂, 对表 1 所示的土样集进行渣土改良研究。

表 1 砂-黏混合地层土样集		
Tab.1 Sand-clay mixed formation stratum soil sample set		
β 梯度/%	ω 范围/%	ω 梯度/%
20	13 ~ 21	15, 17, 19, 21
40	10 ~ 18	11, 13, 15, 17
60	9 ~ 15	9, 11, 13, 15
80	8 ~ 13	9, 11, 13

2.3 渣土改良结果

β 不同、 ω 不同的砂-黏混合地层土样塌落度随标准改良剂掺入比 f 的变化关系如图 4—图 7 所示。

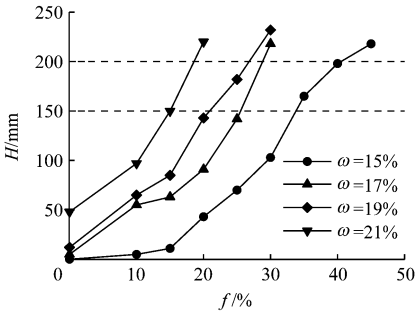


图 4 $\beta = 20\%$ 时的 f 与 H 关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of bentonite incorporation ratio and slump with 20% sand content

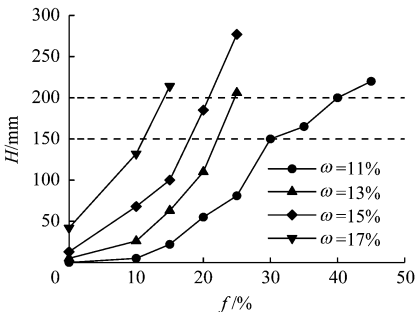


图 5 $\beta = 40\%$ 时的 f 与 H 关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of bentonite incorporation ratio and slump with 40% sand content

由图 4 ~ 图 7 可知, β 相同、 ω 不同时, 理想状态渣土的改良剂掺入方案完全不同。例如: 当 $\beta = 20\%$ 、 $\omega = 15\%$ 时, 渣土达到理想状态时 ($H = 150 \sim 200$ mm) 的掺入比 f 为 $34\% \sim 41\%$; 当 $\beta = 20\%$ 、 $\omega = 21\%$ 时, f 为 $15\% \sim 18\%$ 。由此可见, 在 β 一

样、 ω 不同的情况下, f 相差较多。同理, ω 相同、 β 不同时, f 也完全不同。

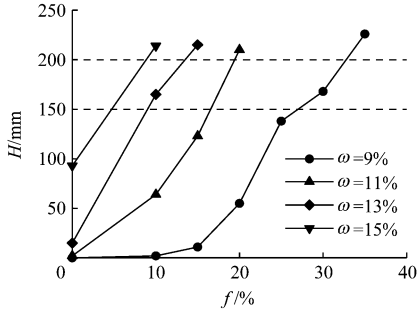


图 6 $\beta = 60\%$ 时的 f 与 H 关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of bentonite incorporation ratio and slump with 60% sand content

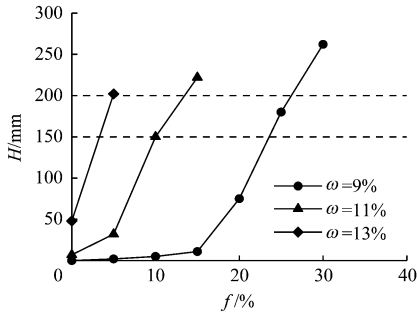


图 7 $\beta = 80\%$ 时的 f 与 H 关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of bentonite incorporation ratio and slump with 80% sand content

由不同 β 下的 f 与 H 关系, 可得到 β 相同时的 f 随 ω 变化的关系图 (见图 8), 以及 ω 相同时的 f 随 β 变化的关系图 (见图 9)。

由图 8 可知, 当 β 相同时, 随着 ω 的增加, f 呈递减趋势。究其原因, 渣土中所含水分会使渣土流塑性增大。

由图 9 可知, 当 ω 相同时, 随着土体 β 的增加, f 也呈递减趋势。从微观上看, 钠基膨润土泥浆填充在土颗粒的缝隙中, 形成一层低渗透性薄膜, 减小了渣土内摩擦角, 从而增大渣土流塑性。土体 β 越高, 黏粒含量越少, 其比表面积越小, 故包围土颗粒所需的膨润土泥浆量越少。由此, 在土压平衡盾构施工现场, 随着砂-黏混合地层 β 的变化, f 也应相应调整。

2.4 f 的取值

对 $H = 150$ mm 及 $H = 200$ mm 对应的 f 取平均值即为 f_{av} , 结果如表 2 所示。

对表 2 中的结果采用二次函数拟合, 得到在砂-黏混合地层中使用标准改良剂后, f 随 β 及 ω 变化的函数关系经验公式:

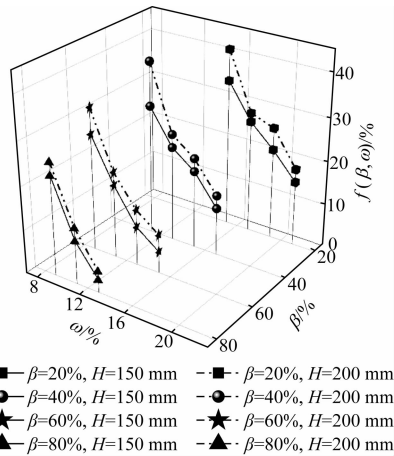


图8 f 随 ω 变化的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of mixing ratio of bentonite mud and water content

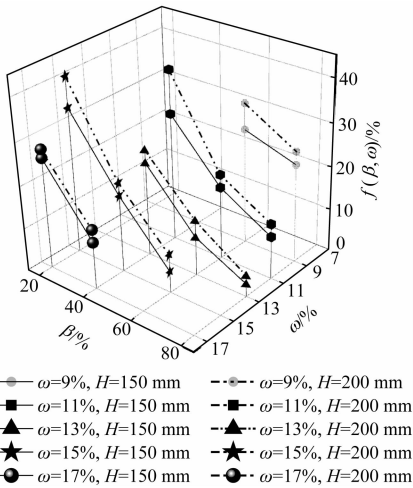


图9 f 随 β 变化的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of mixing ratio of bentonite mud and sand content

表2 不同 ω 及 β 对应的 f_{av}

Tab.2 Mixing ratio of bentonite in response to different water and sand content values

$\omega/\%$	$f_{av}/\%$			
	$\beta=20\%$	$\beta=40\%$	$\beta=60\%$	$\beta=80\%$
9			30.0	24.5
11		35.0	18.5	11.5
13		23.5	11.0	4.0
15	37.5	19.5	7.0	
17	27.0	12.5		
19	23.5			
21	16.5			

$$f(\beta, \omega) = 0.7197\beta^2 - 1.565\beta + 14.26\omega^2 - 8.473\omega + 1.447\beta\omega + 1.551 \quad (1)$$

该拟合公式的确定系数 $R^2 = 0.9724$, 说明拟合效果较优。

3 结论

- 1) 在相同质量比及施工条件下, 与钙基膨润土相比, 钠基膨润土的泥浆黏度更大。因此, 钠基膨润土更适合作为土压平衡盾构标准改良剂。
- 2) 根据泥浆泵送环境及泥浆状态, 钠基膨润土泥浆浓度最优应为 10%, 膨化时间宜为 24 h。此时, 既满足砂-黏混合地层土压平衡盾构施工要求, 也能保证盾构施工的安全性及高效性。
- 3) β 不同时的 f 完全不同。在 β 相同、 ω 不同的工况下, f 也完全不同。
- 4) 砂-黏混合地层土压平衡盾构现场施工时, 随着 ω 的增加, 应调低 f ; 随着 β 的增加, 也应调低 f 。应避免因过多添加膨润土泥浆而导致出现渣土离析现象及工程不经济情况, 也应避免膨润土泥浆添加不足而导致渣土达不到理想状态的情况。
- 5) 拟合出 f 随 β 及 ω 变化的函数关系, 且拟合效果较优。

参考文献

[1] 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(11): 1703. QIU Yan, YANG Xin'an, TANG Zhuohua, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in watered sandy stratum[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015(11): 1703.

[2] VINAI R, OGGERI C, PEILA D. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 308.

[3] 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.

[4] WANG S, LIU P, HU Q, et al. Effect of dispersant on the tangential adhesion strength between clay and metal for EPB shield tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103144.

[5] 汪辉武. 全风化花岗岩土压平衡盾构泡沫渣土改良技术试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. WANG Huiwu. Study on foam soil conditioning technology for EPB in fully weathered granite[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[6] 张淑朝, 贺少辉, 朱自鹏, 等. 兰州富水砂卵石层土压平衡盾构渣土改良研究[J]. 岩土力学, 2017(增刊2): 279.

(下转第 111 页)