

硬塑高黏度地层盾构施工土体改良试验研究

李培楠^{1,2}, 黄德中², 黄俊², 丁文其¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200127)

摘要: 以上海⑥号土中盾构施工为研究背景, 进行硬塑高黏度土体改良的室内试验。选择3种添加剂研究其对渣土性能的影响, 并综合分析其最优注入率范围。研究表明: 单独使用泡沫需在增加土样含水率到30.0%条件下, 控制泡沫注入率(质量比, 下同)为30.0%时较好; 高分子材料和减黏剂则需在同样含水率下使其注入率分别为6.0%、5.5%时最佳; 高分子材料和泡沫组合在泡沫注入率、泡沫注入率分别为3%、20%时, 减黏剂和泡沫组合在减黏剂注入率、泡沫注入率分别为3%、15%时效果更为合适。利用该配比方案进行现场掘进试验, 所得结果可为类似地层盾构施工土体改良提供参考。

关键词: 硬塑高黏度土; 土体改良; 室内试验; 注入率

中图分类号: TD822.3

文献标志码: A

Experimental Study on Soil Conditioning of Shield Construction in Hard-plastic High-viscosity Layer

LI Peinan^{1,2}, HUANG Dezhong², HUANG Jun², DING Wenqi¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract: A series of soil conditioning laboratory tests with three types of additives were performed to investigate and assess the conditioned effect of hard-plastic high-viscosity soil in Shanghai ⑥ layer, and analyze the optimal injection rate ranges synthetically. It is shown that the optimum foam injection ratio is 30.0% under 30.0% moisture content (MC). While the optimum injection ratios of polymer and detackifier are 6.0% and 5.5% respectively under the same MC. Moreover, the optimum injection ratios of combination materials with polymer and foam are 3% (polymer) and 20% (foam) respectively, and the optimum injection ratio of combination materials with detackifier and foam are 3% for detackifier and 15% for foam respectively. Succeeding field

tests show that the optimum injection ratios of additives significantly improve the performance of earth pressure balanced (EPB) excavation and can be used as guidelines under such soil conditions.

Key words: hard-plastic high-viscosity soil; soil conditioning; laboratory tests; injection ratio

开挖土体性能是盾构机顺利完成地层掘进、维持土舱压力、排土等一系列施工过程的关键因素, 作为盾构隧道开挖面支撑介质的土砂应具有良好的流动性能、优良的黏稠性能、较小的摩擦性及较低的渗透性等特征^[1-2]。但多数地层土体不能完全满足这些特性, 为此必须对开挖面土体进行改良以满足盾构工程的需求。向不良土层注入添加剂进行改良已成为土压平衡盾构施工过程中不可或缺的措施, 合理的土体改良技术不仅可以拓展盾构施工的土层范围, 还能显著降低综合成本、减小地表沉降、加快施工进度, 且使得土体具有不黏附于盾构机面板和土舱内壁等特点, 确保开挖面稳定。

目前, 很多国内外学者已对盾构施工土体改良做了大量研究, 通常的办法都是向待改良土体中加入膨润土泥浆、泡沫等添加剂来改善其性能^[3-5]。这些研究表明, 利用膨润土和泡沫等添加剂对土体性质的改良具有十分显著的效果, 但其主要针对位于粉土、淤泥质黏土以及含砂卵石地层中的盾构掘进工作, 而对于深层硬塑超固结黏性土体来说, 常规的土体改良技术难以满足盾构施工所需的土体性能要求。由于这类土体具有较高的密实度、黏聚力和抗剪强度, 且土体塑流性非常差, 因此需针对不同地层选择合适的添加剂, 并优化添加剂配比方案以保证土体改良效果, 提高盾构施工水平^[6]。

评价土体改良效果的室内试验方法主要有剪切试验、坍落度试验、搅拌试验、渗透试验、压缩试验及

收稿日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51378388); 上海市科委重点科研项目(14DZ1207900)

第一作者: 李培楠(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为地下空间建模、数值计算方法和盾构施工技术。E-mail: peinanli411@163.com

稠度试验等手段^[7]. Bezuijen 等^[8]对盾构推进时土舱内压力分布和剪切抗力进行试验研究,在测定了改良土体的诸多性能后,建立了渗透性与泡沫注入量之间的关系,并给出了抗剪力受孔隙率影响的曲线. 黄德中等^[9]利用坍落度、流动度、抗剪及搅拌试验对淤泥质黏土改良方案进行分析,确定了合理的土体改良参数. Miguel^[10]和 Raffaele 等^[11]通过坍落度试验来评价改良土体的流动性,建议最佳坍落度值位于 50~200 mm 之间. 上述试验方法和评价标准是针对特定土层而言,对硬塑性高黏度土体的改良试验还非常少,缺乏系统的改良手段及评价体系^[12]. 本文以上海⑥号土为研究对象,通过土体改良室内试验,在对比研究 3 种添加剂和组合材料改良效果基础上,确定改良材料的配比和施工参数,最后借助盾构掘进现场试验验证室内分析及其相应改良方式所产生的施工改善成效.

1 工程背景

当前上海地铁多处于④号和⑤号土层中,随着地铁系统的不断完善,在深层土中进行施工已成为上海地铁发展的一个重要趋势. 天然的上海⑥号土主要为粉质黏土,呈暗绿至草黄色,处于可塑至硬塑状态,属超固结土,土中黏粒成分较多,黏塑性较强;岩性以黏土为主,局部为粉质黏土,较硬,物理力学性质较好,埋藏适中,分布较稳定. 该类土体具有如下特点:密度较高,含水量低,土颗粒密度大,流动性差;压缩/变形模量高,自稳定性好;黏聚力大,抗剪变形能力强,压缩性低,强度高,属高黏性土. 通常其既不利于盾构正常掘削,也不满足“理想塑性流状态”下的搅拌和输送功能. ④、⑤号土层及⑥号土层的主要物理力学参数见表 1 所示.

表 1 上海地区④、⑤和⑥号土层主要物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of Shanghai soils

土层号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	孔隙比
④	10~13	11.5~23.5	1.96~4.31	0.92~1.45
⑤	4~21	12.3~30.5	3.31~7.23	0.88~1.13
⑥	43~53	15.5~20.9	5.50~10.50	0.63~0.83

地铁施工中,土压平衡盾构机在天然上海⑥号土层中掘进时遇到的主要问题有:

(1) 由于⑥号土层与其他地层土体的差异性较大,使得盾构开挖断面土层性状极不均匀,且掘进所受阻力有明显差异,进而易导致盾构体轴线的偏离. 另外这种差异性还将引起土压力产生较大的波动,

进而影响土压力控制,容易出现超挖.

(2) 在⑥号土层中较大的盾构推力易使得开挖面形成“泥饼”,在影响土压传感器数据准确性的同时,还将导致盾构推力与扭矩的大幅增加.

(3) ⑥号土层土质硬、黏度较高、自立性好,盾构机掘削和出土都非常困难,因此常导致螺旋机空转而不出土,推进阻力大,推进速度慢.

2 试验方案及评价标准

2.1 试验目的和原理

针对硬塑高黏度地层盾构施工环境的特殊性,必须找到一种合理的土体改良方案及其评价措施来保证盾构掘削和出土作业的顺利进行. 首先,地层的抗剪强度(摩擦性)和黏附性决定了盾构机掘削的难易程度. 通常为了保证盾构正常工作,应使开挖面土体的摩擦性和黏附性降到一定范围,改良土体的摩擦性、黏附性或抗掘削性能可以利用抗剪强度试验来评价;另一方面,土舱内土体的流动性和搅拌性直接决定了土舱内土体搅拌和螺旋排土器的工作状态. 如果土体的流动性好,搅拌和排土作业就容易控制,进而可以更好地保持开挖面稳定. 对于土体流动性,可用坍落度和流动度试验来衡量. 此外,在满足抗掘削和流动性要求条件下,还应考虑改良土体黏稠性是否符合输送要求,通常过高的流动度会导致土体在输送带上的外溢程度加大,因此必须平衡流动度和黏稠度 2 个指标取值,即还需借助稠度测定试验来控制改良土体的黏稠度.

综上所述,本研究采用抗剪强度试验、坍落度试验、流动度试验和稠度试验 4 项测试手段及其相应指标来进行土体改良试验,并对其改良性能进行综合评价. 由此,选出合适的添加剂种类及其合理的配比方案来指导硬塑高黏度土体的改良工作.

2.2 试验流程及步骤

根据盾构施工开挖土体的物性条件,本研究在比选了多种不同类型的添加剂后,初步选择泡沫、高分子材料和减黏剂作为土体改良试验的外加添加剂. 借助上述 4 种室内试验的抗剪强度、坍落度、流动度和稠度等指标来评价上海⑥号土的改良效果,并优化添加剂的配比方案. 试验流程见图 1 所示.

具体步骤如下:

(1) 盾构穿越地层的取样,对土样进行物理力学试验,如测量土样含水率、黏聚力和摩擦角等.

(2) 添加剂性能试验,主要针对泡沫添加剂进

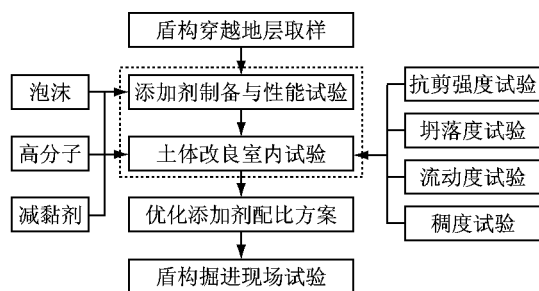


图1 土体改良试验流程图

Fig.1 Flow chart of soil conditioning tests

行性能试验. 通过测量发泡剂质量分数(指发泡剂与发泡剂加水混合溶液的质量之比)和发泡倍率(一定体积的发泡液所发出的主泡体积与发泡液体积之比)与泡沫稳定性(稳泡时间)之间的关系来评价泡沫性能,并给出其合适的溶液配置参数.

(3) 土体改良室内试验,包括抗剪强度试验、坍落度试验、稠度试验和流动度试验. 抗剪强度试验是利用直剪仪进行固结快剪试验来评价改良土体的抗掘削性能,坍落度试验则利用标准坍落度筒来评价改良土体的流动性. 当坍落度试验有一定困难时,可以借助标准水泥静浆流动度测定仪完成的流动度试验作为坍落度试验的补充. 最后,通过稠度试验来评价改良土体的黏稠性,其中稠度值可采用砂浆稠度仪通过圆锥体自由下沉试验来测定.

(4) 优化添加剂配比方案. 基于3种添加剂下改良土体室内试验的分析,以及对组合材料模式下改良土体的研究与评价,初步优化添加剂组合及其配比方案,并给出最为合理的添加剂注入率范围.

(5) 盾构掘进现场试验. 根据室内试验结果,把加水改良、泡沫剂改良和组合材料改良应用于盾构掘进现场试验来对比验证室内配比方案.

2.3 试验评价标准

添加剂性能评价指标主要为稳泡时间,其中稳泡时间也称半衰期,其指泡沫破灭到原来质量一半时所用的时间. 盾构施工时,泡沫被发泡装置发出到与开挖土混合和改良有一个间隔时间. 此外,开挖土体从被开挖进入土仓到被螺旋机排出也有一个时间过程. 因此根据实际情况,泡沫稳泡时间大于5 min (300 s)即可满足盾构施工的要求.

土体改良试验评价标准见表2. 其中抗剪强度以黏聚力值来反映. 坍落度则从坍落度值、坍落后土体形状和析水量来评价土体的流动性和黏聚性,通常坍落后土体需满足形状规则为无明显倾斜,轻拍不崩塌,土样中无泡沫与水析出或少量析出^[6]. 而流动度按照《水泥胶砂流动度测定方法》GB/T 2419—

2005^[13]中相关规定对拌制好的改良土体流动性进行衡量. 稠度以试锥沉入拌合物中的距离来表征改良土体和易性和均匀度,另还必须保证拌合物不会有水土离析、沉淀等现象发生.

表2 土体改良试验评价标准

Tab.2 Evaluation criterion in soil conditioning tests

黏聚力/kPa	坍落度/mm	流动度/mm	稠度/mm
10~15	50~100	13.0~14.5	4.5~6.5

3 土体改良室内试验

3.1 添加剂制备与性能试验

(1) 泡沫制备与性能测试

试验采用自制泡沫. 利用最新改良配方,通过添加高分子表面活性剂,使其适应性强,发泡倍率高,稳定性良好,并由常规的发泡装置制成.

发泡剂质量分数对稳泡时间的影响规律见图2,其中泡沫的发泡倍率分别取12和20. 当其他条件一定时,在较低质量分数范围内,稳泡时间随质量分数的提高迅速增大,而当质量分数大于3%后,泡沫稳泡时间曲线的斜率增长趋于平缓,其稳定性变化不大.

另一方面,为了考虑泡沫的发泡倍率对泡沫性能影响,基于不同的发泡倍率(9~30)对泡沫的稳定性进行性能试验,发泡倍率对稳泡时间的影响规律见图3,其中发泡剂质量分数为3%. 可以看出,泡沫的稳泡时间随发泡倍率的增加而延长,发泡倍率从9增长到20的过程中,稳定性变化明显,但当发泡倍

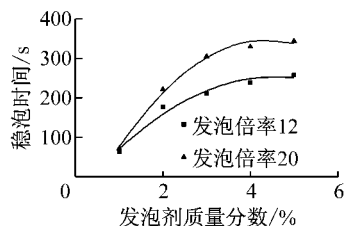


图2 泡沫性能试验

Fig.2 Foam performance tests

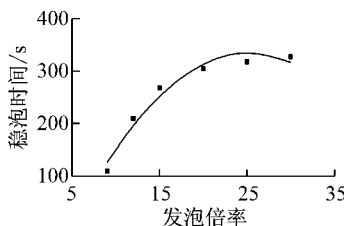


图3 发泡倍率性能试验

Fig.3 Foaming ratio performance tests

率超过 20 后,泡沫的稳定性基本不变。

由此可见,发泡剂质量分数及其发泡倍率并非越大越好,结合评价标准并从经济成本角度考虑,本试验发泡剂质量分数取 3%,发泡倍率取 20。

(2) 高分子材料和减黏剂的性能描述

本试验使用的另外 2 种土体改良添加剂本质上都是以水溶性高分子作为改良材料。一种是 ELCO 公司生产的型号为 STP 401 的水溶性高分子材料;另一种是自主研发的型号为 TFA6 的减黏剂。限于篇幅,高分子材料和减黏剂等添加剂溶液的制备与性能测试这里不再赘述,主要采用生产厂家所推荐的 3% 质量分数来进行这 2 种溶液的配置工作。

3.2 泡沫改良试验

(1) 抗剪强度试验

为了探究泡沫对土体的改良效果,并确定合适的注入率,对 3 种含水率(23.5%、30.0%、40.0%)土样进行不同泡沫注入率(质量比,分别为 10%、20%、30%、40%、50%、60%)的改良试验,借助直剪仪器(固结快剪)获得抗剪强度指标,如图 4 所示。

当含水率为 23.5%(天然含水率)、30.0%时,随着泡沫注入率的增加,土体黏聚力降低较快,在泡沫注入率达到 30%时,其黏聚力值分别为 14.87 kPa 和 14.39 kPa,总体降低了 50%左右,随着注入率进一步加大,黏聚力下降速率逐渐变缓。40.0%含水率土样具有和天然含水率土样非常相似的改良行为,且在 30%~40%注入率之间呈现平稳过渡状态,而超过 40%以后,黏聚力值仅降低了 10%,几乎未有减少,说明 30%左右泡沫注入率的改良效果最为明

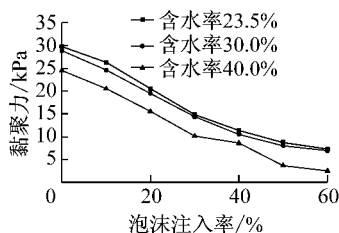


图4 泡沫改良土体抗剪强度试验

Fig.4 Shear strength tests on foam conditioned soils

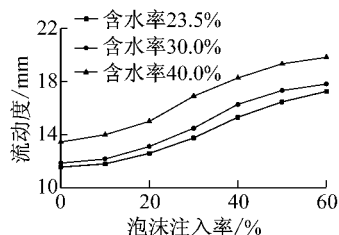


图6 泡沫改良土体流动度试验

Fig.6 Fluidity tests on foam conditioned soils

显。另一方面,当泡沫掺量相同时,含水率越大,黏聚力值越小,由此表明抗剪强度指标和含水率成反比。

(2) 坍落度试验

在坍落度试验之前将土样风干,添加水使土样含水率分别达到 23.5%、30.0%和 40.0%,然后进行混合泡沫后的改良土体坍落度试验,取 3 组平行试验的平均值作为最终坍落度值,结果如图 5 所示。

含水率为 23.5%和 30.0%土样的坍落度随泡沫注入率变化而增加的趋势相近,在注入率为 20%~30%之间时,改良土体坍落度已达评价标准范围(50~100 mm),其流动性良好。而当含水率为 40.0%时,土体较为稀薄,随着泡沫注入率加大,坍落度迅速升高到 150 mm,且析水量较大。因此考虑 30.0%含水率土样在泡沫注入率为 30%时改良效果最佳。

(3) 流动度试验

采用 3 种含水率土样进行流动度试验来进一步评价改良土体的流动性,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,泡沫注入率在超过 40%后改良土体流动性的增速已经不明显,由此建议泡沫注入率不宜超过 40%。

(4) 稠度试验

采用 3 种含水率土样进行稠度试验来测试并评价改良土体的黏稠性与泌水性,结果如图 7 所示。

图 7 表明,泡沫注入率在超过 40%后改良土体的稠度增长趋势基本不明显,建议注入率控制在 40%以内较好。

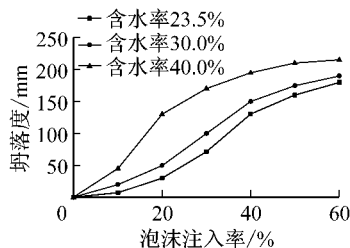


图5 泡沫改良土体坍落度试验

Fig.5 Slump tests on foam conditioned soils

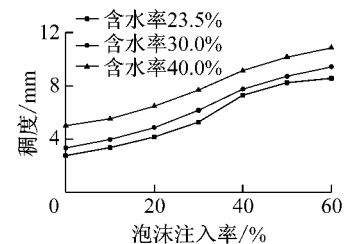


图7 泡沫改良土体稠度试验

Fig.7 Consistency tests on foam conditioned soils

综合以上4种试验结果和分析并依据评价标准,对不同含水率条件下泡沫最优注入率范围的综合评价见表3。基于抗剪强度试验和后3种试验结果范围的对比分析和“夹逼判断”,得出天然含水率条件下泡沫综合最优注入率为30.0%~35.0%,而30.0%含水率下综合最优注入率为28.7%~30.0%;另一方面,由于上述4种试验结果没有交集,40.0%含水率下则无综合最优注入率区间。最终考虑到在盾构掘进过程中的成本控制和工期要求,建议在土体含水率为30.0%时(即先加部分水进行初步改良),泡沫注入率定为30.0%更为合适。

表3 不同含水率下泡沫最优注入率范围

Tab.3 Optimal injection rate range of foam under different moisture contents %

含水率	最优注入率范围			
	抗剪强度试验	坍落度试验	流动度试验	稠度试验
23.5	30.0~44.5	24.0~35.0	24.0~35.0	23.8~36.0
30.0	28.7~41.0	20.0~30.0	19.0~30.0	17.4~32.0
40.0	21.0~30.0	11.0~16.5	0~15.0	0~20.0

3.3 高分子材料改良试验

依据泡沫改良土体的试验结果,本试验仅对2种含水率(23.5%和30.0%)下的土样,利用固结快剪获得在不同高分子材料注入率(5%、7%、10%和12%)条件下的抗剪强度指标,试验结果如图8所示。其变化规律与泡沫改良情况相似,随着高分子改良剂的不断注入,黏聚力降低较快,而当注入率超过5%~7%后,改良效果不明显。

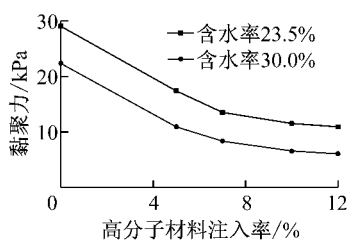


图8 高分子材料改良土体抗剪强度试验

Fig.8 Shear strength tests on polymer conditioned soils

利用流动度试验以及稠度试验作为坍落度试验的补充,结果如图9和10所示。表4为不同含水率下高分子材料最优注入率范围,基于3种试验结果得到天然含水率下对应的高分子材料综合最优注入率为10.0%~12.0%,30.0%含水率土样综合最优注入率为6.0%。因此,采用后1种工况下的最优注入率为最佳。

3.4 减黏剂改良试验

对2种含水率(23.5%和30.0%)条件下的土

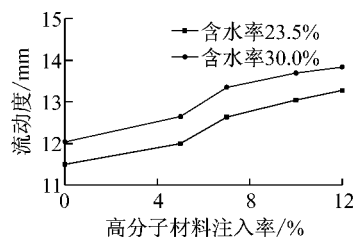


图9 高分子材料改良土体流动度试验

Fig.9 Fluidity tests on polymer conditioned soils

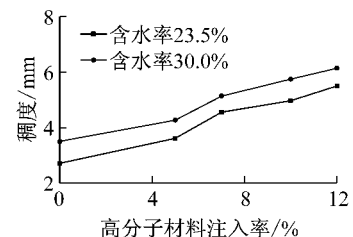


图10 高分子材料改良土体稠度试验

Fig.10 Consistency tests on polymer conditioned soils

表4 不同含水率下高分子材料最优注入率范围

Tab.4 Optimal injection rate range of polymer under different moisture contents %

含水率	最优注入率范围		
	抗剪强度试验	流动度试验	稠度试验
23.5	6.0~12.0	10.0~12.0	7.0~12.0
30.0	3.0~6.0	6.0~12.0	5.8~12.0

样,同样分别利用固结快剪仪、水泥静浆流动度测定仪和砂浆稠度仪,获得改良土体在不同减黏剂注入率(5%、7%、10%和12%)条件下抗剪强度指标、流动度和稠度,3种试验结果曲线分别如图11、12和13所示。

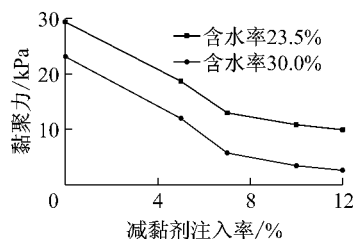


图11 减黏剂改良土体抗剪强度试验

Fig.11 Shear strength tests on detackifier conditioned soils

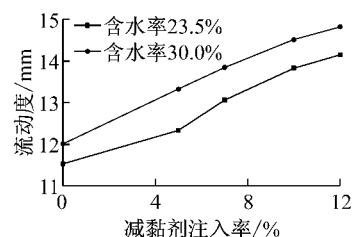


图12 减黏剂改良土体流动度试验

Fig.12 Fluidity tests on detackifier conditioned soils

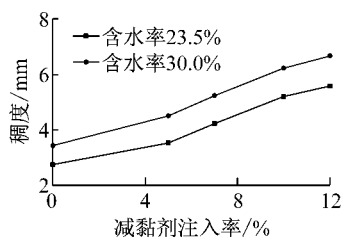


图13 减黏剂改良土体稠度试验

Fig.13 Consistency tests on detackifier conditioned soils

从图中可以看出,随减黏剂注入率的不断增加,改良土体的黏聚力呈逐渐减小的趋势,且在满足一定注入率条件后递减趋势归于平缓;而流动度和稠度则呈稳步递增的趋势,该增速在减黏剂注入率为12%以下时仍较为一致。由于仅从趋势上很难判断各注入率边界阈值,因此需要根据评价标准并集成3种合理的试验,来最终确定减黏剂的综合最优注入率范围(见表5)。通过对比发现,天然含水率下对应的减黏剂综合最优注入率为8.0%~11.5%,而30.0%含水率下综合最优注入率为5.0%~5.8%。由此考虑30.0%含水率下取减黏剂注入率为5.5%较好。

表5 不同含水率下减黏剂最优注入率范围

Tab.5 Optimal injection rate range of detackifier under different moisture contents %

含水率	最优注入率范围		
	抗剪强度试验	流动度试验	稠度试验
23.5	6.2~11.5	7.0~12.0	8.0~12.0
30.0	3.5~5.8	4.0~10.0	5.0~11.3

3.5 组合材料改良试验

在单独利用高分子材料和减黏剂作为土体改良材料时,发现坍落度试验基本无法成功完成,即改良后土样都牢牢吸附在桶壁四周,无法自然下落。通过观察借助专用器具摩擦取下的土样,发现其具有很强的黏附性,这是因为上述2种改良剂专有的高分子长链结构虽然可以有效地降低改良土体的黏聚力,使得黏土颗粒内部胶体被破坏,导致土体强度下降,但高分子的团聚效应却让胶体的黏附性依然存在,因此单独使用高分子材料和减黏剂作为土体改良添加剂有一定的局限性。另外,尽管在一定程度上可以通过加水方式来稀释并降低这部分黏附性,但过多的注水量常常会造成该类土体流动性和泌水率过大、黏稠性过低等现象,进而导致排土和输送的不便,并很难有效控制盾构开挖面的土压平衡。

综上所述,采用含有多种添加剂的组合材料进行多掺量室内试验和数据耦合分析是非常有必要

的。因此继单因素试验后,通过在高分子材料和减黏剂注入率分别为1%、3%、5%和7%的土样(30.0%含水率)中加入不同剂量的泡沫来改良土体,限于篇幅,仅给出组合材料坍落度试验结果,见图14和15。

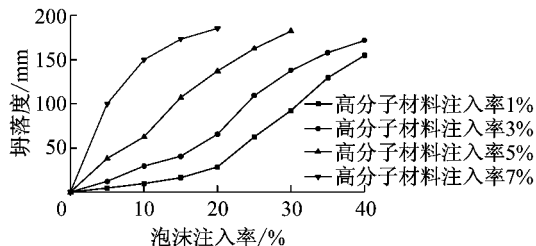


图14 加入高分子材料和泡沫的坍落度试验(30.0%含水率)

Fig.14 Slump tests of combination materials with polymer and foam (30.0% moisture content)

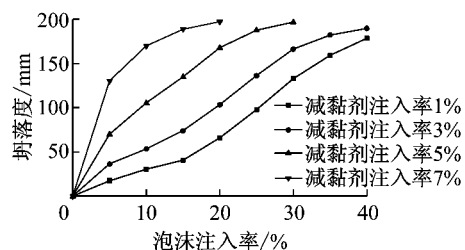


图15 加入减黏剂和泡沫的坍落度试验(30.0%含水率)

Fig.15 Slump tests of combination materials with detackifier and foam (30.0% moisture content)

当高分子材料或减黏剂注入率较小时,试验土样较为干燥,坍落度随泡沫注入率的增加而缓慢增长,直到泡沫注入率超过26%和18%后,土样的坍落度才达到或超过50 mm,流动性稍好。当高分子材料或减黏剂的注入率为7%时,试验土样较为稀薄,坍落度随泡沫注入率的提高而迅速增大,并很快超过100 mm,但其后期增速缓慢。当高分子材料或减黏剂注入率分别为3%、5%时,土样的总体塑流性较好,且分别控制泡沫注入率在10%~20%和5%~15%范围时,改良土体的流动性完全达到评价标准要求,其兼具优良的黏稠性能和较小的摩擦性。结合组合材料的抗剪强度室内试验结果,建议高分子材料和泡沫组成的组合材料在泡沫注入率、减黏剂注入率分别为3%、20%左右;减黏剂和泡沫组合在减黏剂注入率、泡沫注入率分别为3%、15%左右时,土体改良的综合效果最佳,且减黏剂和泡沫的组合在一定程度上要优于高分子材料和泡沫组成的组合材料。

4 盾构掘进现场试验

将室内试验得到的最佳添加剂配比方案应用到

上海⑥号土中的某地铁区间盾构施工中,对总计 120 环范围内恒定埋深(30 m 附近)的盾构掘进路线进行现场对比试验,其中每隔 30 环分别采用无添加剂改良、加水改良(该试验段前 15 环含水率为 30.0%,后 15 环含水率增加到 40.0%)、泡沫剂改良(30.0% 含水率、30% 泡沫注入率)以及组合材料改良(30.0% 含水率、3% 减黏剂注入率、15% 泡沫注入

率)等添加剂配比方案进行不同区段的土体改良施工。通过统计分析试验段内 3 个由盾构机内的数据实时采集系统获取到的盾构运行参数(推进速度、刀盘扭矩和总推力)来对比验证不同区段相应改良方式所产生的施工改善成效,同时对优化后的渣土进行现场坍落度试验来进一步反馈改良效果,不同改良方式对应施工参数变化规律如图 16 所示。

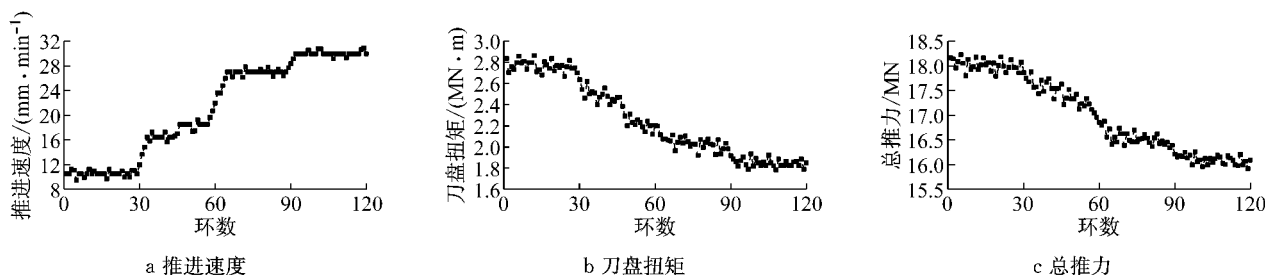


图 16 不同改良方式下的施工参数对比分析

Fig. 16 Comparative analysis of shield excavation parameters based on different soil conditioning means

图 16 表明,无添加剂改良区段的盾构推进速度较慢,刀盘扭矩较高,总推力过大,因而有必要进行土体改良。通常施工中会借助加水来进行初步土体改良工作,然而直接加水很难控制老黏土的改良效果,尽管刀盘扭矩有部分减少(刀盘在开挖面上打滑所致),但推进速度和总推力的改善效果并不明显,且容易造成出土口堵塞,见图 17a 所示。

扭矩进一步减小,同时总推力降低到 16.0 MN 左右,且土舱内的压力更趋于稳定。综上所述,在泡沫注入率为 30% 时的单独改良,或减黏剂注入率、泡沫注入率分别为 3%、15% 时的组合改良都能使土体满足盾构施工要求,如在成本和工期宽裕的情况下,以组合材料改良土体的综合效果最佳。

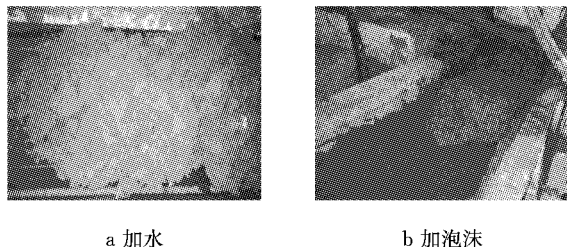


图 17 不同添加剂的改良排土情况

Fig. 17 Soil conditioning situation with different additives

对于外加化学添加剂的改良方案,考虑到单独添加高分子材料和减黏剂容易导致改良土体黏附性过高,因此主要选取单独注入泡沫剂进行现场试验,其结果能显著提高推进速度,并在推进的过程中能有效降低刀盘扭矩(2.0 MN·m, 小于额定扭矩的 50%),同时减小了总推力,现场坍落度试验中渣土的坍落度值集中在 100 mm 左右,排土情况见图 17b,证明其改良效果较好。而组合材料(减黏剂和泡沫组合更适应老黏土的改良工作)能更有效地改善盾构机的工作状态,使其推进速度超过无改良时的 2 倍(10 mm·min⁻¹ 变到 30 mm·min⁻¹ 左右),刀盘

5 结语

由室内土体改良试验可知,在硬塑高黏度土样中单独使用泡沫改良添加剂需增加土样含水率到 30.0% 条件下,控制泡沫注入率为 30.0% 效果较好;高分子材料和减黏剂则需在同样含水率下使得其注入率分别为 6.0%、5.5% 时效果最佳。由于高分子材料和减黏剂单独使用时会带来一定的黏附性,导致刀盘和土舱结“泥饼”、螺旋机出土口堵塞等现象的发生,因此有必要基于高分子材料、减黏剂分别与泡沫组成的组合材料对土体进行改良试验,结果表明高分子材料和泡沫组合在 3%、20% 左右,减黏剂和泡沫组合在 3%、15% 左右时改良效果更为合适。

在盾构掘进施工现场进行的土体改良试验和 120 环试验段中施工参数变化规律的对比分析表明,借助室内试验得到的最佳添加剂配比方案显著提高了盾构推进速度(2~3 倍左右),降低了刀盘扭矩(50% 以上),并减小了总推力(15% 左右)。在保持开挖面稳定的同时,使得推进更加匀速,出土更为流

畅,由此取得了良好的盾构施工效果。

参考文献:

- [1] 张凤祥,朱合华,傅德明.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004.
ZHANG Fengxiang, ZHU Hehua, FU Deming. Shield tunneling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 唐益群,宋永辉,周念清,等.土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):52.
TANG Yiqun, SONG Yonghui, ZHOU Nianqing, *et al.* Experimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 52.
- [3] 朱伟,郭涛,魏康林.盾构用气泡的性能及对开挖土体改良效果影响[J].地下空间与工程学报,2006,2(4):571.
ZHU Wei, GUO Tao, WEI Kanglin. The performance of foams in shield tunneling method and its effect on the soil conditioning [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4): 571.
- [4] 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.
WEI Kanglin. Micro-mechanism analysis for the soil improvement by foam and bentonite in EPB shield tunneling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(1): 73.
- [5] 闫鑫,龚秋明,姜厚停.土压平衡盾构施工中泡沫改良砂土的试验研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):449.
YAN Xin, GONG Qiuming, JIANG Houting. Soil conditioning for earth-pressure balanced shields excavation in sand layer [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 449.
- [6] 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.
JIANG Houting, GONG Qiuming, DU Xiuli. Experimental study on soil conditioning in cobble layer by use of earth pressure balanced machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 284.
- [7] 林键.土体改良降低土压平衡式盾构刀盘扭矩的机理研究[D].南京:河海大学,2006.
LIN Jian. Study on reduction of cutterhead torque in EPB shield with soil conditioning[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [8] Bezuijen A, Schamince P E L, Kleinjan J A. Additive testing for earth pressure balance shields [C]//Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Rotterdam: Balkema A A, 1999; 1991-1996.
- [9] 黄德中,周永习,黄俊.超大直径土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J].中国市政工程,2010,48(Suppl.):128.
HUANG Dezhong, ZHOU Yongxi, HUANG Jun. Experimental research on improvement of soil nature during supper large diameter earth pressure balance shield excavation[J]. China Municipal Engineering, 2010, 48(Suppl.): 128.
- [10] Miguel P. Soil conditioning for sand [J]. Tunnels and Tunnelling International, 2003, 35(7): 40.
- [11] Raffaele V, Ckadio O I, Daniele P. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 308.
- [12] 宋克志,汪波,孔恒,等.无水砂卵石地层土压平衡盾构施工泡沫技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(13):2327.
SONG Kezhi, WANG Bo, KONG Heng, *et al.* Study on foam technology during shield excavation in sandy cobble bed without water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2327.
- [13] 中国建筑材料科学研究院. GB/T 2419—2005 水泥胶砂流动度测定方法[S].北京:中国标准出版社,2005.
China Building Materials Academy. GB/T 2419 — 2005 Test method for fluidity of cement mortar [S]. Beijing: China Standards Press, 2005.