

文章编号: 1007-2993(2024)06-0718-07

软弱地层盾构渣土制备同步注浆浆液及工程应用

杨国华

(中铁电气化局集团有限公司, 北京 100043)

【摘要】 依托苏州市轨道交通 8 号线隧道工程, 采用软弱地层盾构渣土制备同步注浆浆液以减少渣土排放。基于室内试验, 测试了渣土浆液的强度、初凝时间、稠度、泌水率等指标, 并通过现场试验, 将渣土浆液用于盾构隧道壁后注浆。结果表明: 渣土浆液能够满足同步注浆浆液性能要求, 软土地层盾构渣土可以通过调节配比等方法改善其性能, 证明了利用软土地层中土压平衡盾构渣土制备同步注浆浆液的可行性。渣土浆液已用于苏州轨道 8 号线盾构掘进过程中同步注浆, 能较好地控制盾构沉降及管片上浮。盾构渣土制备同步注浆浆液可减少每公里盾构成本约 75 万元, 降低 10% 渣土排放量, 具有良好的经济和环保效益。

【关键词】 盾构渣土; 软土地层; 注浆材料; 配合比; 数值模拟

【中图分类号】 U455.43

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.012

Shield Muck Generated from Soft Soil Stratum for Preparation of Grouting Material and Its Engineering Applications

Yang Guohua

(China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100043, China)

【Abstract】 Based on the Suzhou Rail Transit Line 8 subway project, the synchronous grouting slurry was prepared using shield muck generated from soft clay stratum to reduce slag discharge. Based on lab testing, the strength, initial setting time, consistency, bleeding rate, etc. of the shield muck-produced grouting slurry were evaluated. Through engineering practice, the shield muck produced grouting slurry was used for grouting during shield excavation. The results show that the shield muck-produced grouting slurry met the performance requirements for synchronous grouting, and the performance of the muck-produced slurry could be improved by adjusting the mix ratio, demonstrating the feasibility of using soil pressure balance shield muck in soft soil strata to prepare synchronous grouting slurry. The slurry has been used for synchronous grouting during the excavation of the shield in the Suzhou Rail Transit Line 8 project, and the shield settlement and uplift value of lining segments are well controlled. Using shield muck for the preparation of grouting material can reduce the tunnel cost by approximately 750 thousand Yuan per kilometer and decrease the soil discharge by 10%, achieving considerable economic and environmental benefits.

【Key words】 shield muck; soft soil stratum; grouting material; mixing ratio; numerical model

0 引言

城市轨道交通是现代城市公共交通的骨干方式与核心基础设施, 是事关居民生活与城市经济发展的重大工程。盾构掘进凭借其安全、高效等优点, 已成为城市轨道交通区间隧道最常用的开挖方式。同时, 盾构施工过程中产生的盾构渣土总量也在逐年增多。据不完全统计, 我国在建的盾构隧道工程预计将产生 29600 万 m^3 的盾构渣土, 处理费用超 700 亿元^[1-3]。目前盾构渣土的处置以内陆填埋为主, 其运输过程易

发生倾洒泄露, 且渣土堆积会占用大量的土地资源, 对周边生态环境造成严重的影响。目前我国盾构渣土的资源化利用率不足 5%, 因此, 盾构渣土的资源化回收利用对城市化和工程可持续发展战略具有重要意义^[4-6]。

既有研究^[7-10]对水泥、粉煤灰、膨润土处理后盾构渣土的强度、流动度、泌水率等指标进行了大量试验, 证明了利用固化剂处理盾构渣土制备同步注浆浆液的性能可满足工程要求。依据相关规范^[11] 和研究^[12],

基金项目: 中铁电气化局集团有限公司委托课题(SZGCB-03)

作者简介: 杨国华, 男, 1982 年生, 侗族, 贵州天柱人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 隧道工程。E-mail: 15318820@qq.com

对渣土制备的注浆材料的工程性能要求通常为: 初凝时间为 10 ~ 24 h, 28 d 强度不少于 1 MPa; 浆液稠度要求为 100 ~ 130 mm; 泌水率小于 3.5%; 砂浆密度为 1.8 ~ 2.0 g/cm³。吴克雄等^[13] 使用水泥等固化材料固化盾构泥浆用于制备盾构注浆浆液, 很好地解决了同步注浆浆液泵送过程中的堵管问题, 其流动性也能满足注浆要求, 具有较好的经济效益。许福等^[14] 利用碱激发矿渣固化土压平衡盾构渣土, 指出盾构渣土固化后拥有较高的强度和抗侵蚀性能。受地层条件、施工方法和外加剂等因素的影响, 盾构渣土成分组成复杂, 工程性质通常呈现较大的差异性。因此需要分析渣土的矿物组成, 并进行相应调整, 使处理后的盾构渣土能达到盾构浆液性能要求^[15-19]。目前, 国内盾构渣土处理项目主要针对泥水平衡盾构渣土以及砂石率高的土压平衡盾构渣土, 而对于高含泥率的土压平衡盾构渣土, 通常使用电渗法结合真空预压等联合方法对其进行脱水处理^[20-21]。但由于技术水平与成本限制, 对于高含泥率的土压平衡盾构渣土处理案例极少。

综上所述, 对于软土地层土压平衡盾构渣土改

良的研究较少, 同时缺乏盾构渣土回收利用的工程运用案例。以苏州市轨道交通 8 号线和顺路站至唐庄站区间隧道盾构掘进渣土为研究对象, 采用不同配合比固化剂处理软土地层盾构渣土制备同步注浆材料。本文叙述了渣土在制浆过程中所需的基本设备和工艺流程, 并对渣土浆液的各项性能进行测试, 同时对注浆后沉降和管片上浮进行数值模型计算。本研究旨在为土压平衡盾构渣土资源化利用以及地铁盾构的绿色施工管理提供依据, 为减轻盾构渣土污染提供新的路径参考。

1 工程概况

苏州市轨道交通 8 号线和顺路站—唐庄站标段采用盾构法施工, 和顺路站—唐庄站右线盾构区间穿越的土层主要为: 5 粉质黏土层, 6 粉土夹粉砂层, 7 粉砂夹粉土层, 8 粉质黏土层, 以及 9 黏土层。盾构穿越各地层剖面图见图 1, 可以看出, 盾构穿越主要地层为粉质黏土地层和粉砂夹粉土地层, 这两段地层长度占总长度的 80% 以上。主要地层土体的基本物理力学参数如表 1 所示。

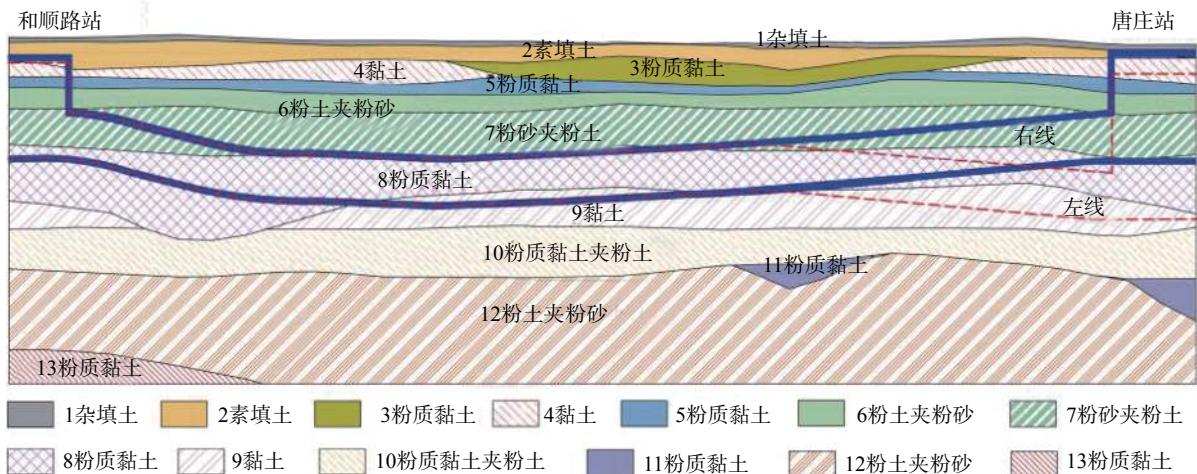


图 1 和唐区间地层剖面图

表 1 盾构区间岩土物理力学参数设计表

层序	土层名称	含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	直剪快剪		直剪固快		静止土压力系数
					φ /(°)	c/kPa	φ /(°)	c/kPa	
5	粉质黏土	29.5	1.92	0.833	13	24.4	15.8	19.5	0.51
6	黏质粉土夹粉砂	25.7	1.96	0.728	28.6	4.7	30	6.6	0.45
7	粉砂夹粉土	24.3	2.0	0.661	29.5	3.8	32.4	3.4	0.42
8	粉质黏土	31.3	1.92	0.862	11.2	21.9	14.8	23.7	0.55

2 盾构渣土制备同步注浆浆液与性能分析

2.1 试验材料

试验盾构渣土取自苏州轨道 8 号线和顺路至唐

庄站隧道建设项目, 盾构掘进段处于粉质黏土和粉质砂土层, 施工渣土主要成分为粉质黏土、粉土粉砂, 均可作为同步注浆浆液的原材料。盾构渣土制备同

步注浆浆液还需添加水泥和土体改良剂 ZDT 等浆液组分。试验所用水泥为 P.O 42.5 硅酸盐水泥,其主要技术性能见表 2,其相关性能符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)要求。土体改良剂 ZDT 主要由水性丙烯酸改性环氧树脂、水性硅烷低聚物、纳米硅溶胶等成分组成。本研究还制备了由砂、水泥、粉煤灰等材料制成的标准浆液,用于对比盾构渣土浆液性能。

表 2 水泥的主要技术性能

标准稠度/%	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	安定性	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d
27.6	351	合格	182	248	20.2	43.6

本次试验制备的新型同步注浆浆液参照单液浆的制备方法,采用原材料为盾构渣土、水泥和土体改良剂 ZDT,主要化学成分见表 3。其中,水泥的主要作用是与水反应生成水化产物,增加浆液的后期强度,调控浆液的凝结时间;土体改良剂 ZDT 能够改善浆液的和易性,控制注浆浆液的流动性和稠度,提高浆液的中期强度;盾构渣土在浆液中主要起骨料作用。

表 3 盾构渣土、水泥的主要矿物组成 %

原材料	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	其它
盾构渣土	7.6	63.5	2.5	15.3	6	0.6	3.3	1.2
水泥	63.7	20.1	2.2	5.8	3.4	3.2		1.6

本研究采用的盾构渣土和水泥的 X 射线衍射 XRD 图谱见图 2,由图可知,盾构渣土主要矿物成分是石英、钠长石、方解石和一部分蒙脱石。本研究所用水泥主要成分为硅酸二钙、硅酸三钙和铝酸钙等,可遇水反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝材料,具有较好的水化性能。

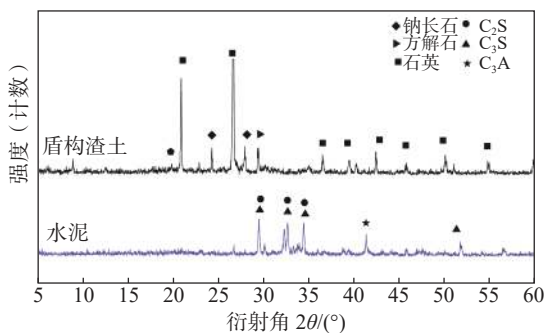


图 2 盾构渣土和水泥的 XRD 图谱

2.2 试验设计

根据软土地层盾构渣土基本性质,在前期试验的基础上,研究水泥、膨润土、砂掺量、含水率等因

素对同步注浆浆液的基本工程性能的影响。基于预试验结果,工程中所用盾构渣土制备同步注浆浆液的基本试验配合比见表 4。其中 T1 试样为传统浆液,采用水泥、砂、粉煤灰、膨润土和水混合而成。浆液试样 T2 和 T3 分别为盾构在 7 粉砂夹粉土和 8 粉质黏土地层掘进过程中产生的以砂土和黏土为主的盾构渣土。掘进产生的渣土初始含水率为约 30%~40%,取出后加水强制搅拌、筛分,留下粒径 2.36 mm 以下的小颗粒泥浆用于制备同步注浆浆液,加水搅拌后的渣土泥浆的含水率在 42% 左右。为确保同步注浆浆液满足强度、凝结时间、稠度等要求,分别于黏质渣土中掺入一定量的中砂充当骨料,调节稠度、流动性等指标。

表 4 每立方同步注浆材料配比

试样编号	配合比/kg					
	泥浆	水泥	砂	粉煤灰	膨润土	添加剂 水
T1 (标准浆液)		100	800	400	60	430
T2	1162	175			20	21 175
T3	1162	175	50~175			21 175

2.3 浆液性能

新型同步注浆浆液制备流程为:首先按表 4 的设计配比称取各组分材料,分别制备盾构渣土泥浆和水泥浆,再将渣土泥浆和水泥浆液混合,搅拌均匀后进行强度、泌水率、稠度(见图 3)、溶出度等性能指标测试。各实验组浆液泌水率均小于 3.5%,浆液稠度在 120 mm 左右,均满足设计和施工要求。



图 3 浆液稠度测试仪

如图 4 所示,盾构渣土同步注浆材料强度虽低于传统单液浆,但满足 28 d 强度不小于 1 MPa 的设计要求,且渣土浆液消耗的水泥量大幅减少,成本更低。水中溶蚀养护后,盾构渣土同步注浆材料强度损

失均小于 6%, 而传统单液浆高达 13%。同时, 模拟地层潮湿环境养护试块后, 强度满足设计要求。浸出试验表明, T1, T2, T3 三种浆液的 TDS 溶出物总量分别为 10260 mg/L, 4591 mg/L 和 5317 mg/L, pH 值分别为 10.67, 9.13 和 9.04。数据表明盾构渣土同步注浆材料 TDS 溶出物显著小于传统单液浆。

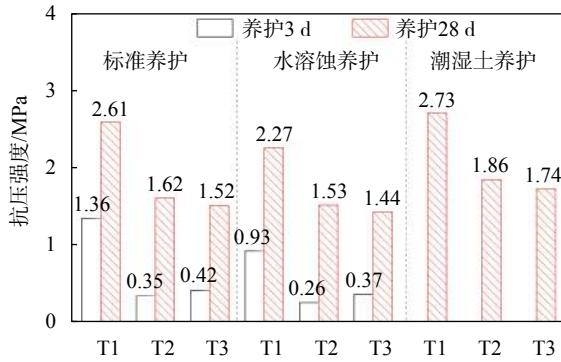


图 4 标准浆液与渣土浆液在不同养护条件下强度

3 渣土同步浆液效果数值分析

3.1 数值模型及参数

为验证渣土浆液的注浆效果, 本文采用三维数值模拟软件 ABAQUS 建立盾构隧道施工及同步注浆的三维数值模型, 模拟盾构隧道右线施工同步注浆的全过程, 并对地表变形、管片上浮进行监测, 然后导入 FLAC 3D 软件进行计算。本文依托工程盾构右线掘进时, 左线已完成施工。

为避免边界对计算产生影响, 数值模型选取的几何尺寸为 100 m×100 m×50 m, 数值模型隧道采用土压平衡式盾构掘进施工, 开挖直径为 6.83 m, 管片结构采用 35 cm 厚的 C50 混凝土, 管片环宽 1.2 m, 管片外径 6.6 m, 内径 5.9 m, 注浆量取地层与衬砌间空隙计算值的 140%。边界条件为约束数值模型四周的法向位移和底部的竖向位移, 顶部为自由面, 数值模拟计算模型见图 5。数值模型管片、注浆层及土体均采用实体单元模拟, 其中管片和注浆层均采用弹性本构; 土体区域则采用莫尔-库仑弹塑性本构。根据地质勘探资料(见表 1)和渣土浆液 3 d 至 28 d 的物理力学性质(见图 4), 并参考相关研究的数值模型取值^[22-23], 本文数值模型选取的计算参数见表 5。

3.2 计算结果分析

首先利用数值模型模拟注浆后地表沉降情况, 为确保数值计算结果的可靠性, 对盾构右线始发掘进区域的地面沉降实测值与数值计算值进行对比分析, 结果见图 6。随着盾构掘进, 通过土压调整, 使盾构机前方土体预隆起, 脱出盾尾后由于浆液收缩, 地面

会出现沉降, 但通过浆液填充, 沉降相对较小。数值模拟规律与监测数据较为吻合, 验证了数值模拟的准确性。同时, 数值模型模拟的长期沉降与工程实测值有一定差异, 是因为数值模型忽视了随着时间变化, 注浆浆液与地下水反应, 体积吸水膨胀, 进而减少沉降值。通过数值模型计算与工程实测数据对比, 验证了利用盾构渣土制备同步浆液进行注浆加固后, 地表沉降得到了有效控制, 达到了工程控制要求。

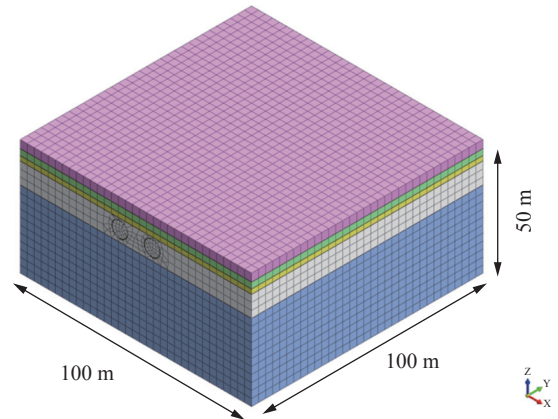


图 5 数值计算模型

表 5 土层及衬砌、渣土浆液参数

地层及工程材料	重度 (kN·m ⁻³)	弹性模量 (MPa)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	泊松比
2 素填土	19.1	18	15	12	0.31
5 粉质黏土	19.5	30	19.5	16.1	0.3
6 粉土夹粉砂	19.6	53	6.6	30	0.32
7 粉砂夹粉土	20	62	3.4	32.4	0.31
8 粉质黏土	19.2	25.2	23.7	14.8	0.30
管片	25.0	30000			0.25
渣土浆液	19.0	200			0.25

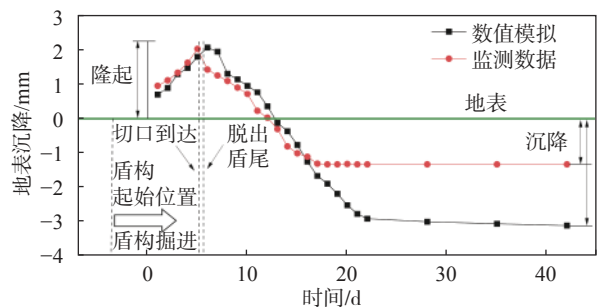


图 6 地面沉降计算值与实测值对比

同步注浆后, 在被浆液包裹的情况下, 隧道管片会上浮力的存在产生一定的上浮量。本节还对盾构渣土浆液同步注浆后的管片上浮情况进行了数值模拟。本线路全段均采用盾构渣土制拌同步浆液进行壁厚注浆, 注浆作业与盾构推进同步进行。施工中

盾尾注浆压力设定为 200 ~ 400 kPa。因此,数值模型分别取注浆压力 200, 300, 400 kPa 进行模拟计算。由图 7 可知,注浆压力大小对管片上浮的影响不大,管片上浮的实测值在数值模拟求得的上浮值附近上下波动。盾构掘进 5 ~ 18 m 范围处隧道管片上浮较小,盾构掘进 32 ~ 48 m 范围处隧道管片上浮较大。管片上浮量主要是由浆液的密度、初凝时间和盾构掘进速度等因素控制,项目右线始发段掘进速度较小,盾尾脱离时浆液已经凝固,因此管片上浮值较小;盾构掘进一定距离后掘进速度变快,同步注浆浆液来不及凝固,因此管片上浮值也相应较大。总体而言,注浆后盾构衬砌管片上浮量在 10 ~ 40 mm 波动,管片上浮得到了较好的控制,但仍需根据管片上浮值及时调整掘进速率。

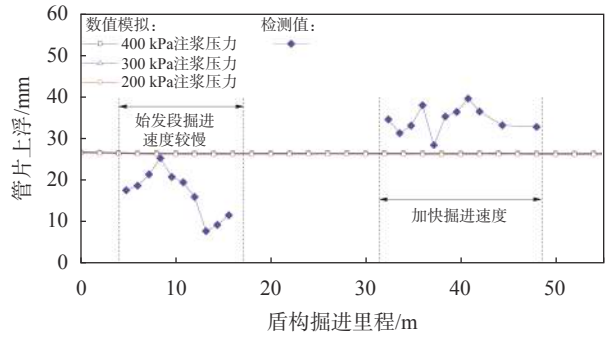


图 7 注浆后衬砌管片上浮计算值与实测值对比

4 渣土制备同步浆液工程实例

4.1 施工流程

本文从渣土收集到制备注浆材料全流程详细描述了利用盾构渣土制备同步注浆浆液工艺,其简要步骤见图 8。

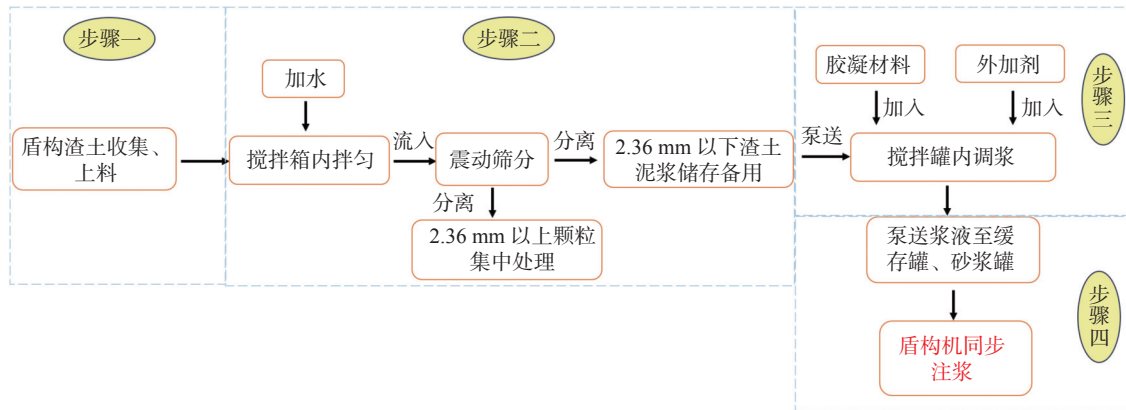


图 8 盾构渣土制备同步注浆浆液

实际工程应用中的具体工序流程为:

(1)渣土收集上料:使用专用转运挖机将废弃的盾构渣土卸载到预设的储渣池中。启动提升机提升渣土,将盾构渣土翻转提升至搅拌系统,同时启动振动装置,确保渣土上料的完整性。对于粉质黏土地层渣土,需掺入一定量细砂。

(2)渣土搅拌筛分:启动搅拌加水系统,对盾构渣土进行稀释混合搅拌,直至渣土泥浆混合均匀并满足相关要求。此后,启动振动筛分系统,开启搅拌系统下部的下料系统,分离稀释搅拌后的盾构渣土浆液。筛分后,粒径 2.36 mm 以下的目标盾构渣土浆液,进入收料机构进行储存,粒径大于 2.36 mm 的渣土颗粒收集在储渣机构内。

(3)置拌渣土浆液:开启储浆系统中的空压机,将晒分后的目标盾构渣土浆液排入储浆系统的储浆曝气池内持续曝气,防止渣土浆液分层。开启调浆动力系统,将目标盾构渣土浆液泵送至调浆系统的调浆罐

中;按照比例定量添加水泥浆液、土体改良剂等材料。

(4)渣土浆液泵送注浆:搅拌均匀渣土浆液、水泥浆、改良剂等材料,将调制好的渣土注浆液泵送至盾构现场的缓存罐内,按施工进度持续泵送至盾构系统砂浆罐中,用于盾构掘进同步注浆。

4.2 盾构渣土制浆工程应用

苏州轨道交通 8 号线和顺路站—唐庄站区间线路出和顺路站,下穿沪宁高速,与既有三号线呈叠交形式进入唐庄站。区间隧道线间距为 13 ~ 17.2 m。施工安全及风险管控要求高,且在软弱地层中盾构掘进对地表沉降及运营隧道变形控制要求更高。基于上节所述基本制浆工艺,苏州轨道交通 8 号线项目利用盾构渣土制备同步注浆浆液的施工设备与施工流程见图 9。

4.3 工程效益分析

利用盾构渣土制备同步浆液是城市轨道交通项

目减少废弃物排放, 节约砂石资源, 减少水泥用量的一个重要举措, 符合我国“碳达峰碳中和”战略。利用盾构渣土制备的同步浆液流动性强, 充填性好, 不易漏失到间隙以外区域; 注浆浆液的设计强度可根据要求通过调节配合比调控, 以满足工程要求。



(a) 盾构渣土取土与上料



(b) 盾构渣土加水搅拌与筛分



(c) 盾构渣土和水泥搅拌与泵送



(d) 同步注浆管路接入盾构系统

图9 盾构渣土制备同步注浆浆液设备与工艺流程

按照市场自拌砂浆成本分析, 考虑材料费用、砂浆站建设费用、设备摊销等费用, 采用盾构渣土制备同步注浆材料每方费用约 330 元, 比市面上的成品标准浆液节省约 10 元/方。同时, 每方渣土浆液可消耗 0.8 方渣土, 按照渣土外运价格 100 元/方计算可节省渣土外运费用 80 元, 共节省 90 元/方。

5 结论

(1) 利用苏州地区软土土层盾构渣土制备同步

注浆浆液, 通过调配水泥、添加剂、膨润土掺量等方法改良渣土浆液的稠度、强度等性能, 验证了渣土浆液能够满足施工要求。

(2) 通过对比数值模型和工程实测值, 验证了利用盾构渣土浆液进行同步注浆可以较好地控制隧道沉降及管片上浮, 确保工程安全。实际施工中, 应实时监控沉降和管片上浮值, 及时调整盾构掘进速率。

(3) 利用盾构渣土制备同步注浆浆液, 可以减少渣土外运总量 10% 左右, 且每立方米浆液可节约砂石材料约 800 kg。同时, 每公里盾构隧道能够减少施工成本约 75 万元, 经济 and 环境保护效益显著。

参 考 文 献

- [1] 陈蕊, 杨凯, 肖为, 等. 工程渣土的资源化处理处置分析 [J]. 环境工程, 2020, 38(3): 22-26.
- [2] 章邦超, 刘洪亮, 雷锋国, 等. 上软下硬地层大直径土压平衡盾构下穿民房建筑群沉降控制 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 172-181.
- [3] 方勇, 王凯, 陶力铭, 等. 黏性地层面板式土压平衡盾构刀盘泥饼堵塞试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1651-1658.
- [4] 郭卫社, 王百泉, 李沿宗, 等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40(8): 1101-1112.
- [5] 张军辉, 李海, 杨豪, 等. 盾构渣土资源化再利用技术研究综述 [J]. 中外公路, 2022, 42(6): 1-11.
- [6] 谢亦朋, 张聪, 阳军生, 等. 盾构隧道渣土资源化再利用技术研究及展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(2): 188-207.
- [7] 郝彤, 李鑫箫, 冷发光, 等. 郑州市地铁粉质黏土层中盾构渣土制备同步注浆材料特性 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2020, 40(3): 53-62.
- [8] 林文书, 王红喜, 彭碧辉, 等. 不同地层盾构泥砂对制备同步注浆材料性能影响研究 [J]. 隧道建设, 2013, 33(9): 715-719.
- [9] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 盾构隧道渣土与泥浆的分类与处理利用技术及主要问题 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41(S2): 1-13.
- [10] 李雪, 黄琦, 王培鑫, 等. 粉细砂地层泥水盾构渣土回收利用及性能优化 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 299-307.
- [11] T/CECS 563—2018 盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [12] 杨星, 张荣辉, 房宽达, 等. 盾构同步注浆浆液性能影响分析及其配比优化研究 [J]. 岩土工程技术, 2021, 35(5): 336-340.
- [13] 吴克雄, 李顺凯, 杨钊, 等. 废弃泥浆改性同步注浆材

- 料试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(20): 277-281.
- [14] 许福, 蒋川梓, 张书经, 等. 碱激发矿渣固化土压平衡盾构渣土的试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3): 849-859.
- [15] TANG S, ZHANG X, LIU Q. Prediction and analysis of replaceable scraper wear of slurry shield tbn in dense sandy ground: a case study of sutong gil yangtze river crossing cable tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103090.
- [16] BARZEGARI G B, UROMEIHY A U, ZHAO J Z. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in tbn tunneling projects[J]. *Tunnelling And Underground Space Technology*, 2015, 48: 43-57.
- [17] HUANG Z Q, WANG C, DONG J Y, et al. Conditioning experiment on sand and cobble soil for shield tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 87: 187-194.
- [18] WANG S Y, LIU P F, HU Q X, et al. Effect of dispersant on the tangential adhesion strength between clay and metal for EPB shield tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 95: 103144.
- [19] HEUSER M, SPAGNOLI G, LEROY P, et al. Electro-osmotic flow in clays and its potential for reducing clogging in mechanical tunnel driving[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(4): 721-733.
- [20] 张书经, 阳栋, 谭立新, 等. 盾构渣土的含水率特征及脱水技术研究 [J]. *中国水土保持*, 2019, 449(8): 37-42.
- [21] 鱼志鸿, 杨大勇, 章定文, 等. 深圳地铁 13 号线盾构渣土绿色循环利用技术 [J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2022, 4(4): 100-106.
- [22] 岳洪武, 苗苗. 浅埋暗挖软岩隧道管棚预注浆加固效果分析 [J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(2): 111-117,134.
- [23] 熊小华, 赵军云, 翁贤杰, 等. 隧道穿越软弱围岩大变形区段初支锁脚大管棚注浆加固效果数值分析 [J]. *公路*, 2023, 68(4): 392-400.

收稿日期: 2023-06-28