

砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验

张润来, 宫全美, 周顺华, 钟毅

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要: 砂卵石地层土压平衡盾构施工时需进行渣土改良, 提高渣土的流塑性。针对成都砂卵石地层采用泡沫、膨润土和聚合物进行改良, 进行室内塌落度试验、搅拌试验和泥浆黏度试验来确定配比。研究表明, 钠基膨润土比钙基膨润土具有更好的膨化能力, 且不发生分层, 更适用于渣土改良。案例中膨润土单独改良的合理配比为泥浆质量分数 14.3%, 注入量体积比 20%。泡沫改良时注入率受渣土含水率影响较大, 土体含水率越大, 泡沫最佳注入率越小。泡沫加膨润土共同改良比两者单独改良效果要好, 选择泡剂质量分数为 3%、泥浆质量分数为 14.3%, 添加量在某个范围, 有多种组合都可以满足要求; 当泥浆注入量体积比为 12% 时, 泡沫最优注入量体积比为 15%~20%; 当泥浆注入量体积比为 6%, 泡沫最优注入量体积比为 30%~35%。当地下水丰富时, 需要添加聚合物; 正常情况下也可降低膨润土泥浆浓度, 添加聚合物, 来节省膨润土用量, 从而降低工程成本。

关键词: 砂卵石地层; 盾构; 渣土改良

中图分类号: U231

文献标志码: A

which is more suitable for soil conditioning. The reasonable ratio for bentonite alone is to have a concentration of 14.3% and an injection rate of 20%. The foam injection rate is influenced by soil moisture content with a negative correlation. Using foam and bentonite together for conditioning can have a better result than using foam or bentonite alone. The concentration is proposed to be 14.3% for bentonite and 3% for foam while the injection rate is a range. There are many assembles which can meet the demand. For instance, the optimum injection rate is about 15% to 20% for foam and 12% for bentonite, or 30% to 35% for foam and 6% for bentonite. Polymer is proposed under rich underwater environment. Besides, under normal circumstances, polymer also can be used for lowering bentonite concentration, which can save bentonite consumption to reduce project cost.

Key words: sandy cobble strata; shield; soil conditioning

Soil Conditioning Tests for Earth Pressure Balance Shield Applications in Sandy Cobble Strata

ZHANG Runlai, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, ZHONG Yi

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Soil conditioning is used to improve the plastic flow capacity of earth pressure balance (EPB) in sandy cobble strata. Conditioning tests were conducted for sandy cobble strata in Chengdu by using foam, bentonite, and polymer, including the slump test, the stirring test as well as the viscosity test. The results show that sodium bentonite has a better bulking capacity than Ca-bentonite and is not layered,

砂卵石地层中盾构施工时, 由于卵石含量高、强度大、无黏聚力等特点, 经常面临刀盘刀具磨损严重、渣土流动性较差、进渣困难、土仓压力难以保持、掌子面超挖、螺旋输送机喷涌等问题。为解决和预防上述问题, 除了对设备进行针对性改进和掘进参数优化外, 还需要对渣土进行改良, 使其具有良好的流塑性、较低的内摩擦力和较低的渗透性, 从而保证施工顺利进行。

目前, 国内外学者针对盾构施工中渣土改良问题进行的研究, 都是向土体中添加泡沫、膨润土等改良剂来改善其性能。传统上, 对于黏性土、粉土等较软的黏稠土层, 往往通过少量甚至不需要改良就可以满足盾构施工要求。对于砂性土, 大都是采用泡沫对其改良, Sotiris^[1]通过室内直剪及渗透试验, 得出泡沫改良后砂的抗剪强度和渗透性大幅度降低。Bezuijen 等^[2]研究了砂土与气泡混合土的渗透性、

收稿日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(41472247)

第一作者: 张润来(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为盾构隧道。E-mail: 1510061@tongji.edu.cn

通信作者: 宫全美(1967—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为铁道工程及线路动力学。E-mail: gongqm@tongji.edu.cn

压缩性. Jancsecz 等^[3]研究泡沫改良后土体合理塌落度范围在 200~250 mm 之间. 唐益群等^[4]探讨了添加剂作用下砂性土的流塑性、保水性以及开挖面动态土压平衡机理. 许恺等^[5]对比了泡沫和肥皂水对砂性土的改良效果以及对掘进参数的影响. 张旭东^[6]对淤泥质砂层探讨了气泡剂的掺入量与掘进机工作参数的关系. 许有俊等^[7]研究砂性土中多刀盘土压平衡矩形顶管隧道施工时膨润土和 PAM (polyacrylamide, 聚丙烯酰胺) 共同改良的配比. 当土层中含砂较多或全断面砂层, 甚至含有大量卵石以及漂石等情况时, 仅添加泡沫难以满足要求, 往往需要添加膨润土, 当含水量较大还需要添加聚合物. 邱龔等^[8]研究了富水砂层添加改良剂后渗透性和压缩性变化, 并通过扫描电镜观察渣土细观结构; 郭彩霞等^[9]研究了无水砂卵石地层膨润土和泡沫混合改良后推力、扭矩以及渣土温度变化. 江华等^[10]认为砂卵石地层泡沫加膨润土改良可行, 添加剂的注入时间、注入量宜根据推力及刀盘扭矩等参数及时调整. 姜厚婷等^[11]给出卵石地层改良剂配比且认为最佳塌落度范围为 150~200 mm. 贺少辉等^[12]探究了砂卵石地层高水压情况单掺钠基膨润土改良的抗渗性和喷涌控制的可靠性.

通过上述分析, 虽然针对砂卵石地层已有试验研究都提出采用膨润土加泡沫改良, 但配比方案范围没有达成共识, 除地层影响外还受到膨润土种类差异的影响, 对膨润土种类的选择以及膨润土泥浆的评价研究较少. 其次, 泡沫改良时注入比例和改良效果受土体含水率影响较大, 该方面研究报道较少; 对砂卵石地层中同时采用聚合物的配比研究报道较少. 最后, 多种改良剂组合改良时, 配比交互影响研究较少.

本文依托成都某砂卵石地层盾构区间进行大量试验, 对所采用的膨润土种类和泥浆性能进行测试, 分析聚合物、膨润土和泡沫多种改良组合方案的优缺点, 优化添加剂配比方案, 最终得出有益的结论为类似工程提供参考.

1 工程概况

成都地铁某盾构区间全长 860 m 左右, 区间平面曲线最小区间半径 300 m, 纵向最大坡度 28‰. 如图 1 所示, 隧道主要穿越的地层为 <2-9-3> 和 <3-8-3> 密实卵石土, 伴有漂石, 以中密、密实砂卵石为主, 卵石漂石形状以亚圆形为主, 少量圆形, 分选性相对较

差. 区间地下水主要为孔隙潜水, 赋存于砂、卵石土中, 地层渗透系数大, 含水量丰富, 含水层总厚度大于 30 m, 其补给源主要为大气降水, 区间水位埋深 5.6~8.0 m. 采用复合式盾构施工.

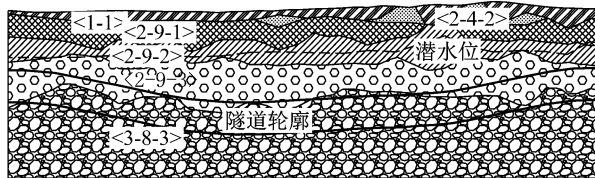


图 1 区间地质纵断面图

Fig. 1 Geological profile of shield zone

2 试验内容

2.1 试验土

试验主要针对现场盾构穿越的 <3-8-3> 密实卵石土, 为满足塌落度试验对土样颗粒粒径要求, 剔除粒径超过 30 mm 的颗粒得到的级配曲线如图 2 所示. 试验卵石土根据级配曲线进行室内配置如图 3 所示, 每次试验取土样 9 L.

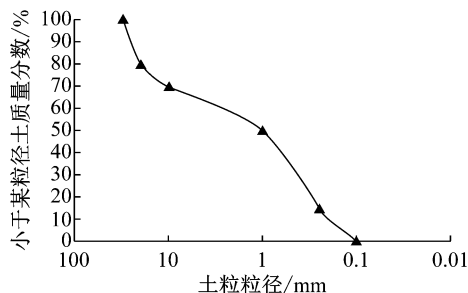


图 2 砂卵石土颗粒级配曲线

Fig. 2 Curve of sand-pebble soil grading

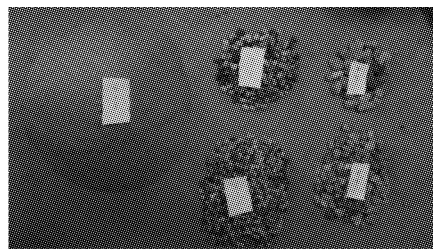


图 3 试验卵石土室内配置

Fig. 3 Indoors configuration of sand-pebble soil

2.2 改良剂选择

泡沫由实验室自制泡沫发生装置制得, 装置如图 4 所示. 评价泡沫的性能主要是发泡倍率和半衰期, 当其他条件一定时, 发泡液质量浓度较低时, 发泡倍率和泡沫半衰期随着发泡液的质量浓度的增大迅速增大, 但当发泡液质量浓度大于某一浓度时, 发

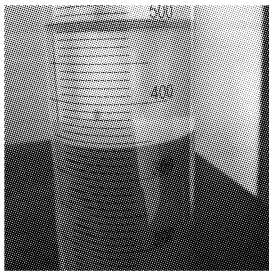
泡倍率和泡沫半衰期增加不明显,当发泡液质量分数为3%~4%时,较为理想.试验选用实际盾构区间所采取的巴斯夫发泡剂,质量分数为3%,发泡倍率为18,半衰期为8 min.



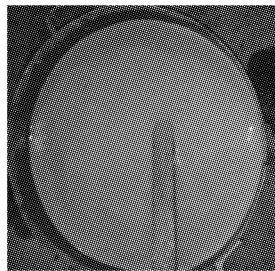
图4 实验室泡沫发生装置

Fig.4 Laboratory foam generator

膨润土是以蒙脱石为主要成分的非金属黏土类矿物,蒙脱石质量分数占到30%~80%.蒙脱石是含水的层状铝硅酸盐,其四面体中的硅可被铝随机置换,这种置换过程使蒙脱石晶层面有过剩的负电荷,在层间产生静电场,因此蒙脱石层间可吸附 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等阳离子极性分子.正是蒙脱石这种特有的吸附功能,使得膨润土具有很强的膨胀能力.工程中常用的膨润土主要为钙基和钠基两类,钙基膨润土自然界含量大,价格便宜,但静置较久时泥质颗粒沉淀与水容易发生分层(如图5a所示),在工程中容易发生堵管现象;而钠基膨润土膨胀效果更好,且不会发生水土分层现象(如图5b所示).



a 钙基膨润土



b 钠基膨润土

图5 钙基和钠基膨润土泥浆静置分层

Fig.5 Stratification of calcium bentonite and sodium bentonite

制备膨润土泥浆时,水土比不同,泥浆性能不同;使用不同产地的钠基膨润土时,由于蒙脱石含量不同,即便同样的水土比,泥浆性能也不同;这也是已有研究^[7~12]中最优膨润土泥浆配比各不相同的原因.采用膨化后的表观黏度指标来衡量泥浆性能.表1为A、B两种钠基膨润土在不同浓度情况下测得的表观黏度,A类水土质量比为1:10时制得的泥浆表观黏度仍然大于B类在1:5时的表观黏度.可以得知,A类钠基膨润土的膨化效果要明显优于B类.

结合膨润土溶液黏度指标,使用造浆率(如式(1)所示)概念对膨润土进行评价.造浆率是指配得表观黏度为15 MPa·s的泥浆时,每吨黏土造浆的立方数,它直接表示泥浆造浆效率的高低.造浆率大的膨润土价格往往较高,工程使用中应结合价格综合考虑后选用.本文选择A类钠基膨润土进行渣土改良试验,由于其造浆能力较强,在泥浆质量分数达16.7%(水土质量比1:6)时,表观黏度便达到30 MPa,过高的泥浆黏度会导致运送速度下降甚至运输管路堵塞,因此在采用A类钠基膨润土泥浆改良时,泥浆浓度不宜过大.

$$\alpha = \frac{V_w}{m_s} + \frac{1}{\rho_s} \quad (1)$$

式中: α 为造浆率; V_w 为水的体积; m_s 为膨润土质量; ρ_s 为膨润土溶液密度.

表1 不同浓度膨润土溶液表观黏度

Tab.1 Apparent viscosity for bentonite slurry at

different concentrations

MPa·s

水土质量比	A类钠基膨润土	B类钠基膨润土
1:5	40.0	13.8
1:6	30.0	12.7
1:7	21.0	11.2
1:8	18.5	10.1
1:9	15.5	8.7
1:10	11.5	7.4

聚合物具有很大的吸水性,溶于水形成黏稠性液体,主要起到增稠作用,由于卵石地层渗透性较大,当地下水丰富时土体颗粒中的自由水不能充分被泡沫置换出来,土体渗透性得不到较大程度改善.倘若用膨润土泥浆改良时,由于地下水丰富起到稀释作用,膨润土泥浆黏度下降,容易从渣土中析出.针对这种情况,最优的止水方式就是添加聚合物.此外,在正常情况下时,膨润土泥浆材料能够满足改良要求,但消耗较大.本文尝试在低浓度泥浆中添加聚合物,达到增稠作用,在满足改良要求的同时能够节省泥浆,降低工程成本.聚合物种类较多,本文选择聚丙烯酰胺(PAM)和羧甲基纤维素(CMC)两种聚合物进行改良试验.

2.3 试验装置

向试验土中添加改良剂后进行搅拌试验和塌落度试验.如表2所示,搅拌试验主要是模拟压力舱中土体的搅拌过程,通过测试搅拌机电流大小可以判断渣土的摩擦性能;坍落度试验用来判断改良土体的塑性流动状态.在膨润土泥浆配制后,需要进行黏度试验对泥浆进行性能评价.图6为试验所用装置.



a 搅拌机



b 塌落度筒



c 旋转黏度计

图 6 室内试验装置

Fig. 6 Laboratory test devices

表 2 渣土改良试验项目

Tab. 2 Soil conditioning test items

试验项目	目的	评价指标	试验设备
搅拌试验	反映渣土摩擦性	搅拌电流	搅拌机和电流计
坍落度试验	反映渣土塑性状态	坍落度	坍落度筒
黏度试验	对泥浆性能进行评价	表观黏度	六速旋转黏度计

2.4 试验方案

(1) 单独进行膨润土泥浆改良,取膨润土泥浆注入比(均为体积分数,下同)为 15%、20%、25%,泥浆浓度(均为质量分数,下同)为 10%、11%、12.5%、14.3%、16.7%,共 18 组进行搅拌试验和坍落度试验。

(2) 单独进行泡沫改良,土体含水率(均为质量分数,下同)分别选取 3.0%、5.0%、7.5%、10.0%,泡沫注入比从 10.0%开始,每次增加梯度为 5%,到渣土流动性满足要求为止。

(3) 泡沫和膨润土泥浆一起改良,泥浆浓度取 14.3%,注入比分别取 6%、9%和 12%,泡沫注入比从 10%开始,每次增加梯度为 5%,到渣土流动性满足要求为止。

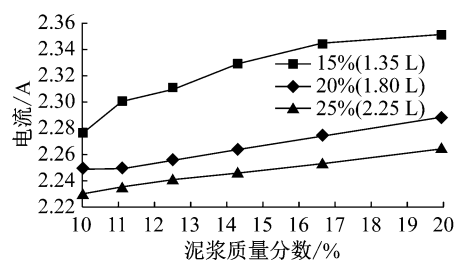
(4) 膨润土泥浆和聚合物一起改良,泥浆浓度分别取 10%、11%、12.5%、14.3%,注入比为 20%;当添加 PAM 时,添加浓度为 0.1%的 PAM 溶液,添加量分别取 0.2、0.3、0.4、0.5 L;当添加 CMC 时,分别添加 0.1、0.2、0.3、0.4 g。

3 试验结果分析

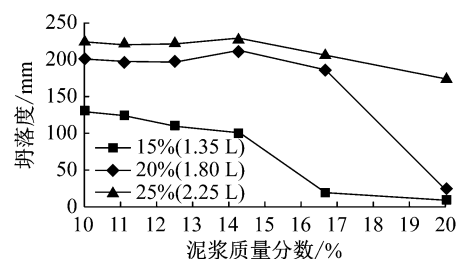
3.1 膨润土泥浆改良

图 7a 为搅拌电流随泥浆浓度的变化情况,很显然泥浆注入量越大,泥浆浓度越大,搅拌电流越小;注入率为 20%和 25%时搅拌电流相差较小。图 7b 为坍落度随泥浆浓度变化情况,注入率为 15%时不同泥浆浓度改良都不充分,坍落度均不满足要求;对于注入率为 20%和 25%时,泥浆浓度小于 15%时,坍落度随泥浆浓度增大缓慢增大,当浓度继续增大

时,坍落度迅速下降,这是因为泥浆黏性较大,改良后仍然太干无法流动。图 8 为泥浆改良后过干、合适和泥浆析出 3 种状态,泥浆浓度较高时无法流动;泥浆浓度较低、注入量较高时,渣土保水性差容易发生泥浆析出,虽然此时搅拌电流和坍落度均满足要求,但是较高注入量带来了大量工作且有一定浪费;只有在泥浆浓度和注入率匹配合适时渣土改良才更加理想。综合分析,选取泥浆浓度 14.3%、注入量 20%为单独添加膨润土泥浆改良的合理配比。



a 膨润土泥浆浓度与搅拌电流关系



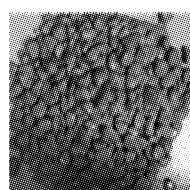
b 泥浆浓度与坍落度关系

图 7 泥浆浓度与搅拌电流、坍落度关系图(泥浆改良)

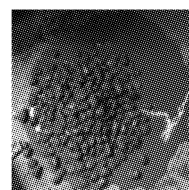
Fig. 7 Bentonite slurry concentration versus stirring current and slump(bentonite slurry)



a 太干



b 塑性性好



c 析浆

图 8 3 种膨润土泥浆改良的状态

Fig. 8 Three states of bentonite slurry conditioning

3.2 泡沫改良

图9为搅拌电流、塌落度与泡沫注入比(FIR)的关系。搅拌电流随着注入量增大而递减,并且趋势稍缓;塌落度随着泡沫注入量增加而增大,当注入量超过一定值后泡沫析出,塌落度不再增大,这说明泡沫改良可以有效降低土体摩擦性,增加流动性。其次,泡沫改良效果受到含水率影响很大,土体含水率越大,泡沫的最佳注入量越小;含水率3.0%时最佳FIR为30%~40%;含水率5.0%时最佳FIR为25%~30%;含水率7.5%时最佳FIR为15%~20%;含水率在10%及以上时,泡沫改良效果不明显,图中未给出,且渣土因含水率较大有自由水直接流出。

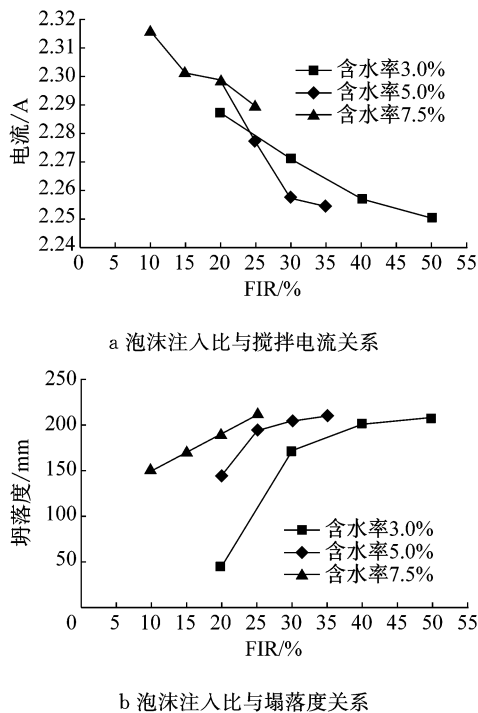
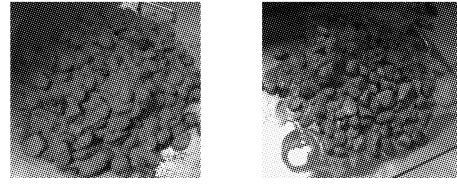


图9 泡沫注入率与搅拌电流、塌落度关系图(泡沫改良)

Fig.9 Foam injection rate versus stirring current and slump(foam)

通过分析得知,对于相对干燥的土体,具有较大的基质势,它与自由水接触时会自由水吸引到干土中来,使得泡沫脱水破灭,泡沫利用率降低,对泡沫需求量相对较多;而对于含水率较高的土体,泡沫出现注不进去情况,颗粒间隙中的自由水不能被泡沫置换出来,改良效果不明显,土体渗透性也得不到较大改善,即便多注入泡沫也伴随自由水流出。图10为含水率合适和较大时两种改良的渣土状态。泡沫虽然能够起到一定改良作用,但改良效果还需要加强。



a 含水率合适

b 含水率较大

图10 两种泡沫改良的状态

Fig.10 Two states of foam conditioning

3.3 泡沫加膨润土泥浆改良

通过向渣土中同时添加膨润土泥浆和泡沫进行改良,泡沫改良与含水率有关,采用的土样初始含水率为5%,根据3.1节的结果,此处泥浆浓度采用14.3%,通过调节泥浆注入比和泡沫注入比找到合适的改良效果。图11为3种泥浆浓度情况下搅拌电流和塌落度与泡沫注入量的关系。可以得知出泥浆与泡沫注入量是一个范围,有多种组合搭配都可以达到比较理想的改良效果。当泥浆注入量较大时,所需要的泡沫注入量较少,反之当泥浆注入量少时,泡沫的需求量就大。当泥浆注入量达到12%时,泡沫最优注入比为15%~20%;当泥浆注入量为6%时,泡沫最优注入比为30%~35%。图12为两种组合情况下渣土都达到理想的改良效果,相较于泡沫和泥浆单独改良时,渣土的流塑性更好。因此,推荐工程中采用泡沫加膨润土泥浆共同改良的方式。

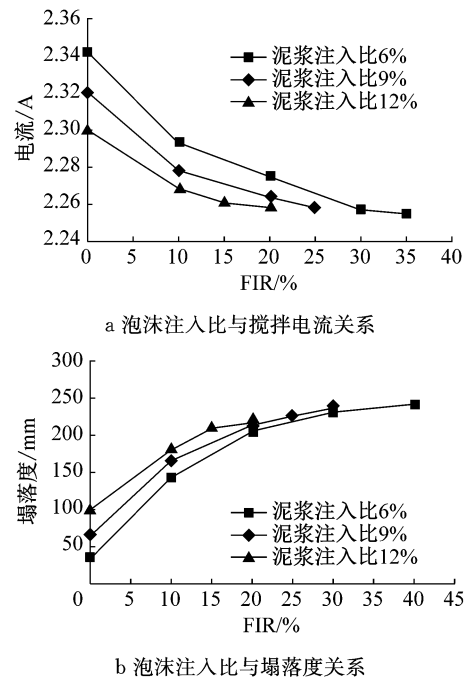
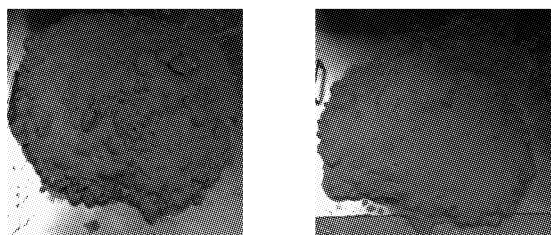


图11 泡沫注入率与搅拌电流、塌落度关系图(泡沫加膨润土泥浆改良)

Fig.11 Foam injection rate versus stirring current and slump(foam and bentonite slurry)



a 泥浆 12%、泡沫 15%

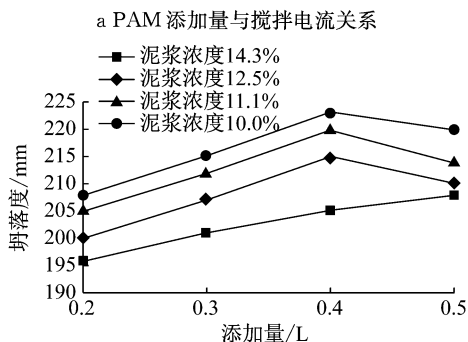
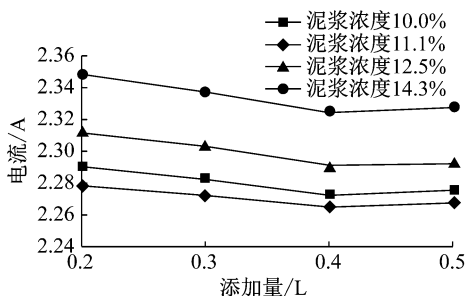
b 泥浆 6%、泡沫 30%

图 12 两种泡沫和泥浆组合改良的合适状态

Fig. 12 Two suitable states of foam and bentonite slurry conditioning

3.4 膨润土泥浆加聚合物改良

泡沫和膨润土一起改良并且能够达到比较理想的状态有一个前提是土体含水量合适. 当土体含水量较大甚至有丰富的地下自由水流动时, 泡沫改良效果不明显, 而膨润土泥浆也会因水较多黏度下降, 且容易发生析浆, 针对这种情况比较合适的方法是添加聚合物. 图 13 为采用 PAM 与膨润土泥浆组合改良时在不同泥浆浓度情况下搅拌电流和塌落度与 PAM 添加量的关系. 分析可知, 泥浆浓度越大, 黏性越大, 搅拌电流越大; 当 PAM 添加量较少, 电流降低, 然后有一个临界值, 当超过临界值时反而系统黏性增大, 因此, PAM 不适合添加过多. PAM 改良比较适合低浓度的膨润土浆液, 在泥浆浓度为 10%、注



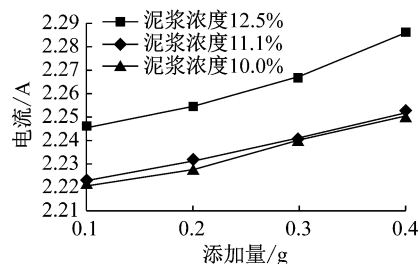
a PAM 添加量与搅拌电流关系

b PAM 添加量与塌落度关系

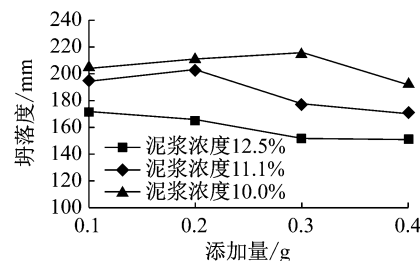
图 13 PAM 添加量与搅拌电流、塌落度关系图 (膨润土加聚合物改良)

Fig. 13 PAM addition amount versus stirring current and slump (bentonite slurry and PAM)

入率为 20% 时, PAM 溶液 (质量分数 1%) 添加比为 22% (0.4 L) 可以达到良好的改良效果. 同理, 图 14 为添加 CMC 和膨润土组合的改良情况, 试验测得在泥浆浓度为 10%、注入率为 20% 时, CMC 添加量为 0.3 g 可达到较好的改良效果. 图 15 为不添加聚合物和添加后对比图. 可以发现, 聚合物能够起到增稠作用, 防止低浓度泥浆析浆. 因此, 对于富水砂卵石层, 添加聚合物可以达到较好的改良效果. 此外, 由于聚合物比较适合低浓度膨润土泥浆时添加, 且用量较少, 对于正常情况, 可通过降低膨润土泥浆浓度, 添加聚合物, 在达到同样改良效果的同时降低膨润土用量, 从而降低工程成本.



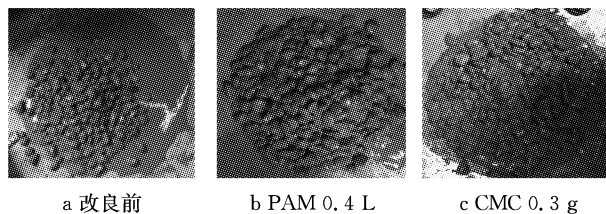
a CMC 添加量与搅拌电流关系



b CMC 添加量与塌落度关系

图 14 CMC 添加量与搅拌电流、塌落度关系图 (膨润土加聚合物改良)

Fig. 14 CMC addition amount versus stirring current and slump (bentonite slurry and CMC)



a 改良前

b PAM 0.4 L

c CMC 0.3 g

图 15 添加聚合物改良前后对比图

Fig. 15 Comparison before and after adding polymer

4 现场渣土改良应用分析

图 16 为盾构始发后在 10~220 环的土仓压力设定和掘进速度情况. 在 10~70 环内都在摸索掘进, 掘进情况不顺利. 渣土改良采用巴斯夫泡沫, 泡

沫参量3%,发泡倍率10,泡沫流量 $200\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,渣土改良效果较差,当土仓压力保持到 60 kPa 时,掘进速度在 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 便无法提高,而且扭矩较大,在 $10\sim 20$ 环内便发生刀盘卡死情况,每次卡死后都需要清空土仓来脱困,在卡死处带来较大的超挖,在该阶段尝试增大泡沫注入量也无济于事。

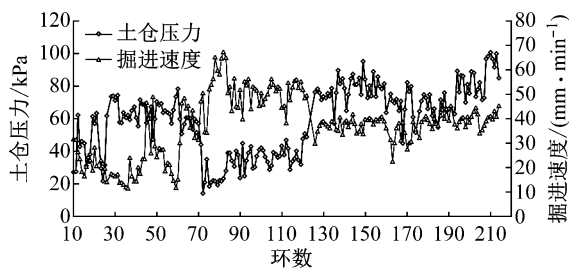


图16 10~220环之间土仓压力和掘进速度情况

Fig. 16 Chamber pressure and tunneling speed between 10 and 220 rings

通过总结认为,在参数控制和渣土改良上都存在问题,在 $70\sim 120$ 环改变参数控制模式,通过降低土仓压力至 30 kPa ,这种欠压掘进模式掘进速度可以提高到 $50\sim 60\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;渣土改良除了添加泡沫外还注入浓度为 14.2% 的膨润土泥浆,泥浆流量 $100\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右;在该阶段掘进效率有较大改观,速度得到较大提高,刀盘卡死几率大大降低,然而因土仓压力保持较低经常发生较大超挖,地面沉降较大,对超挖特别大的地方采取地表打孔,查看是否存在空洞,增大同步注浆率,局部进行二次补浆;出渣情况如图17a所示,渣土流动性得到较大改善。

在 $120\sim 220$ 环,通过分析认为渣土改良还有进步空间,增大膨润土泥浆流量至 $200\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,渣土状态如图17b所示,流动性极好;掘进参数也进行优化,将掘进速度降到 $40\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,同时提高土仓压力至 $60\sim 70\text{ kPa}$;在该段掘进参数较为

稳定,地表沉降得到较好的控制,此后均参照该段掘进。

在下一区间中有盾构穿越江安河施工,参考试验结果,渣土改良采用泡沫、膨润土泥浆和聚合物,由于地下水较丰富,泡沫流量设定降低到 $150\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,质量分数为 14.2% 的膨润土泥浆流量保持 $200\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右不变,聚合物CMC成本低于PAM,且可以直接向膨润土泥浆内添加,因此在膨润土泥浆箱内按照 $40\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 添加CMC,并结合出渣情况动态调节,最终盾构顺利穿越江安河段。

5 结论

(1) 钠基膨润土比钙基膨润土具有更好的膨化能力,且静置不发生分层,更适合用于渣土改良;不同钠基膨润土选择根据造浆率和成本综合确定。泥浆浓度和注入量都要合适,本文案例中膨润土单独改良的合理配比为泥浆浓度 14.3% ,注入量 20% 。

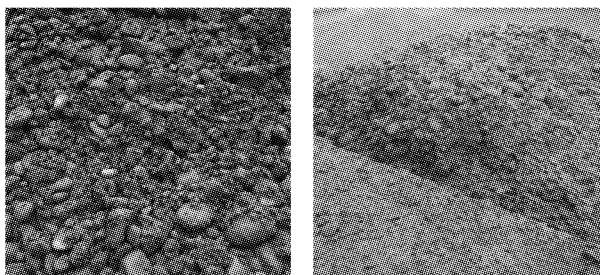
(2) 泡沫改良可以有效降低摩擦性,泡沫注入率受渣土含水率影响较大,土体含水率越大,泡沫最佳注入率越小,当含水率超过一定值时,有注不进现象,泡沫改良效果不明显。

(3) 采用泡沫加膨润土组合改良效果比两者单独改良效果要好。泡剂浓度取 3% 、泥浆浓度取 14.3% ,添加量是一个范围,有多种组合都可以达到较好的改良效果;当泥浆注入量为 12% 时,泡沫最优注入量为 $15\%\sim 20\%$;当泥浆注入量为 6% ,泡沫最优注入量为 $30\%\sim 35\%$ 。

(4) 当地下水丰富时,添加聚合物可以达到较好的改良效果;正常情况下也可降低膨润土泥浆浓度,添加聚合物,来节省膨润土用量,从而降低工程成本。

参考文献:

- [1] SOTIRIS P. Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications [D]. Oxford: St Hugh's College, 2001:84-85.
- [2] 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. Balkema: [s. n.], 1999: 1991-1996.
- [3] JANCSEK S, KRAUSE R, LANGMAACK L. Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir [C] // Proceedings ITA-AITES World Tunnel Congress. Oslo: ITA-AITES World Tunnel Congress, 1999: 865-875.
- [4] 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.



a 70~120 环

b 120~220 环

图17 70~120环和120~220环的渣土状态

Fig. 17 Soil states at 70 to 120 rings and 120 to 220 rings

- 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.
- [5] 许恺, 季昌, 周顺华. 砂性土层盾构掘进面前土体改良现场试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9):147.
- XU Kai, JI Chang, ZHOU Shunhua. Soil conditioning field test before heading face of EPB shield in sandy soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 147.
- [6] 张旭东. 土压平衡盾构穿越富水砂层施工技术探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9):1445.
- ZHANG Xudong. Construction technology of earth pressure balance shield in watery sandy stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9):1445.
- [7] 许有俊, 文中坤, 闫履顺, 等. 多刀盘土压平衡矩形顶管隧道土体改良试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2):288.
- XU Youjun, WEN Zhongkun, YAN Lüshun, *et al.* Experimental study on soil improvement during construction of EPB rectangular pipe jacking with multi-cutter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2):288.
- [8] 邱龑, 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, 43(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, 43(11):1703.
- [9] 郭彩霞, 孔恒, 王梦恕. 无水大粒径漂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1):201.
- GUO Caixia, KONG Heng, WANG Mengshu. Study on muck improvement of EPB shield tunneling in waterless sandy-cobble-boulder stratum [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1):201.
- [10] 江华, 张晋勋, 苏艺, 等. 砂卵石地层土压平衡盾构隧道施工土体改良试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4):40.
- JIANG Hua, ZHANG Jinxun, SU Yi, *et al.* Study on soil conditioning experiments during earth pressure balance shield tunneling in sandy gravel strata [J]. China Railway Science, 2013, 34(4):40.
- [11] 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.
- [12] 贺少辉, 张淑朝, 李承辉, 等. 砂卵石地层高压条件下盾构掘进喷涌控制研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9):1583.
- HE Shaohui, ZHANG Shuchao, LI Chenghui, *et al.* Blowout control during EPB shield tunnelling in sandy pebble stratum with high groundwater pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9):1583.

(上接第 667 页)

- [2] 王平, 刘哲. 轮轨磨耗对岔区轮轨接触行为的影响[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1):46.
- WANG Ping, LIU Zhe. Effects of wheel and rail wear on wheel/rail contact behavior in turnout zone [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1):46.
- [3] KALKER J J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [4] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1):1.
- [5] KALKER J J. A simplified theory for non-hertzian contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1983, 12(1/2/3):43.
- [6] LI Z. Wheel-rail rolling contact and its application to wear simulation[D]. Delft: Delft University of Technology, 2002.
- [7] BURGELMAN N, LI Z, DOLLEVOET R. A new rolling contact method applied to conformal contact and the train-turnout interaction[J]. Wear, 2014, 321:94.
- [8] 金学松. 轮轨蠕滑理论及其试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1999.
- JIN Xuesong. The theory of wheel rail creepage and its experimental study [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999.
- [9] REN Z, IWICKI S D, XIE G. A new method for determining wheel-rail multi-point contact[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(10):1533.
- [10] 杨新文, 顾少杰, 练松良. 30 t轴重重载列车轮轨法向接触应力分析[J]. 铁道学报, 2015(6):19.
- YANG Xinwen, GU Shaojie, LIAN Songliang. An analysis of wheel-rail normal contact stress under 30 t-axle-load heavy haul train [J]. Journal of the China Railway Society, 2015(6):19.
- [11] VOLLEBREGT E, SEGAL G. Solving conformal wheel-rail rolling contact problems[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(S1):455.
- [12] MA Y, MARKINE V, MASHAL A A, *et al.* Modelling verification and influence of operational patterns on tribological behaviour of wheel-rail interaction [J]. Tribology International, 2017, 114:264.
- [13] 孙宇, 翟婉明. 钢轨磨耗演变预测模型研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8):1.
- SUN Yu, ZHAI Wanming. A prediction model for rail wear evolution [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8):1.
- [14] 杨新文, 姚一鸣, 周顺华. 基于轮轨非 Hertz 接触的影响系数的有限元计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(10):1476.
- YANG Xinwen, YAO Yiming, ZHOU Shunhua. Calculation of influencing number of wheel-rail non-Hertz contact using finite element method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(10):1476.
- [15] BLANCO-LORENZO J, SANTAMARIA J, VADILLO E G, *et al.* On the influence of conformity on wheel-rail rolling contact mechanics[J]. Tribology International, 2016, 103:647.