

黏土地层土压平衡盾构渣土改良试验研究

李猛¹, 赵文¹, 王鑫¹, 刘晓迪²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中铁九局集团第四工程有限公司, 辽宁 沈阳 110032)

摘要: 在黏土地层中掘进时, 盾构会遇到刀盘“结泥饼”、土仓积土、排土不畅等问题。为此, 依托沈阳地铁六号线文储路站—观音路站区间盾构项目, 基于泡沫发泡倍率及半衰期试验、分散剂沉降试验、旋转剪切试验、流动度试验、搅拌试验进行渣土改良, 并使用扫描电镜、Zeta 电位及双电层理论对分散剂改良黏土的机理进行了分析。研究表明: 当泡沫剂体积分数为4%、六偏磷酸钠质量分数为2%时, 改良剂性能较好; 在含水率为30%的土体中, 分散剂注入比为10%、泡沫注入比为30%~60%时, 改良效果较好; 扫描电镜及Zeta 电位试验显示, 质量分数为2%的六偏磷酸钠溶液能增加黏土双电层厚度, 起分散黏土的作用。

关键词: 土压平衡盾构; 渣土改良; 双电层理论; 黏土地层; 评价指标

中图分类号: U 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)04-0106-09

Experimental Study on Muck Improvement of Clay Stratum in Earth Pressure Balance Shield

LI Meng¹, ZHAO Wen¹, WANG Xin¹, LIU Xiao-di²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. China Railway Ninth Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Shenyang 110032, China. Corresponding author: ZHAO Wen, E-mail: zhaowen@mail.neu.edu.cn)

Abstract: When tunneling in clay stratum, the shield may encounter some problems such as “mud cake” on the cutterhead, soil accumulation in the chamber, and poor soil discharge. Therefore, based on the shield project between Wenchu Road Station and Guanyin Road Station of Shenyang Metro Line 6, muck improvement was carried out based on foaming ratio and half-life test, dispersant settlement test, rotating shear test, mobility test and stirring test. Finally, scanning electron microscopy, Zeta potential and double electric layer theory were used to analyze the mechanism of clay improvement by dispersant. The results show that the performance of the modifier is better when the volume fraction of foam agent is 4% and the sodium hexametaphosphate mass fraction is 2%. The improvement effect is better when the moisture content of soil layer is 30%, the dispersant injection ratio is 10% and the foam injection ratio is 30%~60%. Scanning electron microscopy and Zeta potential tests showed that 2% sodium hexametaphosphate solution can increase the thickness of the clay double electric layer and disperse the clay.

Key words: earth pressure balance (EPB) shield; muck improvement; electric double layer theory; clay stratum; evaluation index

随着我国经济的快速增长, 轨道交通数量与日俱增。土压平衡盾构具有施工快速、安全的特点, 因此广泛应用于隧道建设中。盾构机在黏性土地层掘进时, 黏性土会黏附在刀盘、刀具上, 使盾构掘进速度变慢、扭矩增大。土压平衡盾构机

要实现安全快速掘进, 应首先确保开挖掘削的渣土具有良好的流塑状态、低内聚力、低渗透性和一定的黏稠度^[1-3]。因此, 需对土仓内的渣土进行改良, 通常的改良方法是向土体注入合适的添加剂, 以满足土压平衡盾构掘进的需求。

目前,众多学者对黏性土地层进行了渣土改良研究.王明胜等^[4]使用自主研发的分散型泡沫剂对粉质黏土地层进行改良,降低了盾构掘进过程中“结泥饼”的风险.Zumsteg等^[5-6]对黏性土进行搅拌试验和剪切试验,研究表明在相同含水率下,泡沫和分散剂能够显著减小黏土的黏附性,但当黏土含水率接近渣土塑限时,改良剂作用效果不佳.Martinotto等^[7]研究了聚合物、泡沫等改良剂对土体改良的作用机制,分析了黏土地层渣土改良对盾构掘进效率的重要性,并依托实际工程应用2种改良方法,通过综合分析室内试验结果和现场数据,多角度评价改良效果.Feinendegen等^[8]分析了细粒土形成“结泥饼”问题的主要原因,提出了评价土体“黏性”参数的试验方法以及调整黏性性能的操作方法.Thewes等^[9]使用自制筛分仪器测定筛分后岩石分解的黏土矿物质量分数和塑性指数,以此判断盾构掘进过程中“结泥饼”的可能性.Peila等^[10]通过室内坍落度试验研究了含水率对黏土地层渣土改良的影响,指出当黏土地层含水率较低时,需要加入更多的水进行改良;反之,则不需要加水来改良.Merritt等^[11]根据大气压下重塑伦敦黏土的大型落锥试验和叶片剪切试验,发现泡沫和聚合物改良后的黏土土样的不排水剪切强度降低.Wang等^[12]通过测定不同法向应力和不同分散剂质量分数下黏土与金属之间的切向黏附强度,评价分散剂对土壤黏附力的影响,发现随着分散剂质量分数的降低(<4%),切向黏着强度逐渐降低;但随着分散剂质量分数的增加,分散剂对切向黏附强度的影响逐渐减弱.Wan等^[13]通过使用泡沫剂和定制抗黏剂对黏性土进行改良,分析出抗黏剂与泡沫剂之间存在相互作用,采用泡沫剂和抗黏剂组合的改进方法可以有效降低黏性土对金属的黏附性.Zhuo等^[14]使用六偏磷酸钠和硅酸钠测定不同种类黏性土的液限,通过分析分散剂对土样液限的影响来确定分散剂的种类,并使用分散剂与泡沫剂进行渣土改良,建议黏性土渣土改良的坍落度不应小于10 cm,也不应大于17 cm.

综上所述,由于各地区的土体性质不同,学者们针对不同黏性土地层的渣土改良方案也不尽相同,对黏附性强、易“结泥饼”的土层尚未有统一的改良方法,虽然有一些学者使用分散剂改良土层,但如何选用分散剂未有明确的方法,而施工现场大多以经验来确定渣土改良方案.本文依托沈阳地铁六号线文储路站—观音路站区间

黏土地层盾构工程,首先通过沉降试验选用性能较优的分散剂;其次采用单一改良剂(水、泡沫、分散剂)以及组合改良剂(泡沫与分散剂)进行室内渣土改良试验,提出针对黏土地层较为合理的改良方案;最后基于扫描电镜分析分散剂改良黏土的机理.研究结果可为类似地层的盾构渣土改良提供参考.

1 工程概况

沈阳地铁六号线文储路站—观音路站区间全长约1 360 m,正线结构采用土压平衡盾构法施工,施工过程中出现刀盘“结泥饼”、土仓积土、排土不畅等问题.

盾构穿越的土层主要为黏性土地层,呈黄褐色,处于硬可塑状态,稍有光泽,无摇晃反应,干强度中等,韧性中等,局部含铁锰氧化物.该层连续分布,在施工基坑处取得黏土样品见图1.



图1 黏土样品

Fig. 1 Clay sample

采用日本 Rigaku D/MAX-2600 对黏土进行 XRD 检测,扫描角度范围为 5° ~ 90° ,扫描速度为 5° /min,结果如图2所示.

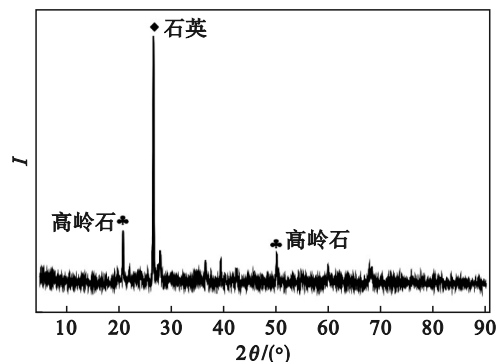


图2 XRD 试验结果

Fig. 2 XRD test results

根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[15],使用密度计法对黏土进行颗粒级配分析,级配累积曲线如图3所示.土体主要物理参数如表1所示.

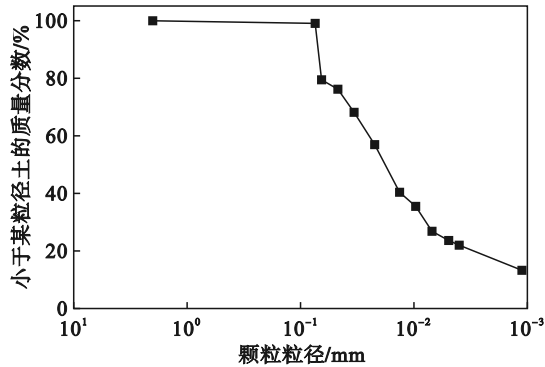


图3 颗粒粒径级配曲线

Fig. 3 Particle size grading curve

表1 土层物理参数

Table 1 Physical parameters of soil layer

参数	试验方法	值
含水率/%	烘干法	25
塑限/%	液塑限联合测定法	23.11
液限/%	液塑限联合测定法	42.3
塑性指数	液塑限联合测定法	19.19
内摩擦角/(°)	直剪试验	12.7
黏聚力/kPa	直剪试验	31.6
压缩模量/MPa	压缩试验	6.84

颗粒粒径主要小于0.075 mm,故该地层为全断面黏土层;由土层塑性指数与XRD成分分析试验可知:该地层属于低液限黏土,除石英外,黏土的矿物成分以高岭石为主,且基本上由黏粒组成,当黏粒质量分数大于25%时,“结泥饼”风险将大大提高^[16].可见此地层具有很高的“结泥饼”风险,需要对其进行渣土改良.

2 改良剂性能试验

2.1 泡沫性能评价指标及方法

2.1.1 泡沫的发泡倍率

发泡倍率也称为泡沫的膨胀倍率,是盾构现场调控和衡量泡沫性能及发泡能力的常用指标.通常情况下,泡沫的发泡倍率越高,其工作性质越好,但发泡倍率过大会影响泡沫的稳定性,EFNARC标准^[17]要求发泡倍率在5~30倍,工程上多采用10~20倍发泡倍率,通常使用式(1)进行计算^[18]:

$$FER = \frac{V_F}{V_L} \quad (1)$$

式中:FER为泡沫的发泡倍率; V_F 为工作压力下泡沫的体积; V_L 为泡沫剂溶液的体积.

本研究测定发泡倍率的试验装置如图4a所示.将容积为2 L的量杯放置于电子天平上并清零;将发泡装置发出的泡沫盛满该量杯并称量,得出泡沫的质量;忽略泡沫中气体的质量,泡沫剂溶液密度约为1.0 g/mL,可计算出泡沫剂溶液的体积,从而求出发泡倍率.

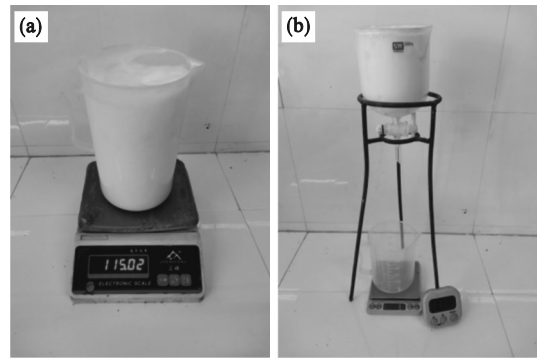


图4 泡沫性能试验

Fig. 4 Foam performance test

(a)—泡沫发泡倍率试验;(b)—泡沫半衰期试验.

2.1.2 泡沫的稳定性

泡沫消散50%的时间称作半衰期,根据盾构施工的实际情况,泡沫从生成到通过刀盘喷口、土仓和螺旋排土器与土体混合,需要2~3 min,故泡沫稳定性一般要求泡沫的半衰期大于5 min,才可以满足盾构施工的要求^[19].半衰期通常采用公式(2)计算:

$$F_s = \frac{M_d}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_s 为消泡率; M_d 为消散气泡的质量; M_0 为气泡的初始质量.

本研究测定半衰期的试验装置如图4b所示.试验方法:将发泡装置产生的泡沫注入500 mL漏斗中,放置于电子天平上,读取泡沫的质量;然后将漏斗放置于三角架上,再将量杯放置在三角架下的电子天平上,使漏斗对准量杯的中心,记录量杯内泡沫消散液体质量达到初始泡沫质量一半所用的时间,即为该泡沫的半衰期.每组试验进行3次平行试验,取其平均值.

2.2 评价指标与泡沫剂体积分数的关系

本研究选用盾构施工现场使用的某品牌泡沫剂原液,并采用自主设计的室内泡沫发生装置进行制备,发泡压力控制为0.3 MPa^[20].分别测定

泡沫剂溶液体积分数为1%~7%时的发泡倍率和半衰期,具体关系如图5所示.

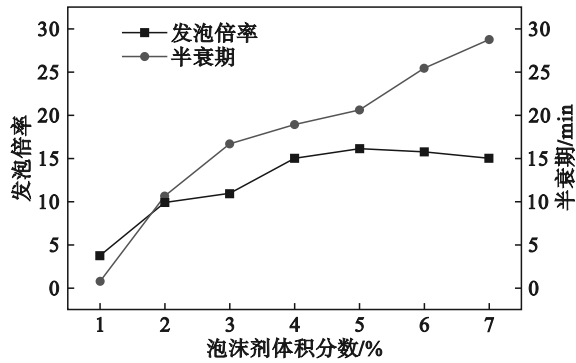


图5 发泡倍率和半衰期随泡沫剂体积分数变化曲线
Fig. 5 Foaming ratio and half-life change curves with the volume fraction of foam agent

由图5可见,溶液体积分数从1%增大到4%,发泡倍率从3.77倍增加到15.1倍,发泡倍率增大明显,在体积分数为5%时达到最大值后发泡倍率随体积分数继续增大而减小,可见泡沫的发泡并不是体积分数越高越好;半衰期在体积分数为2%时达到10.67 min,随后半衰期随溶液体积分数增大而迅速上升,故本文选用4%体积分数的泡沫剂溶液进行试验.

2.3 分散剂的确定

依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[15]和《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],选用国药集团化学试剂有限公司生产的六偏磷酸钠、硅酸钠、焦磷酸钠作为分散剂进行试验.

分散剂的分散性可以用黏土沉降厚度来衡量.首先配制质量分数为0,2%,4%,6%,8%,10%的溶液作为试验液,将100 g溶液和10 g黏土混合均匀后转移到量筒中,静置12 h后,测量黏土层厚度作为黏土沉降厚度值.

沉降试验开始时,直径较大的颗粒最先下沉,粒径较小的土粒悬浮在沉积物上方的溶液中,形成悬浊液.随着时间推移,悬浊液中的土粒不断下沉,累积于沉积物上方,形成一个分界线.分散剂的使用使土粒处于悬浊液中,因此下方沉积物越少,说明分散效果越好.

图6为黏土在不同质量分数的3种分散剂中静置12 h后的沉降图.可以看到,六偏磷酸钠和焦磷酸钠在质量分数为2%~4%时悬浊土层较厚,而硅酸钠基本上无悬浊土层;但随着分散剂质量分数的增加,六偏磷酸钠和焦磷酸钠在质量分数为8%,10%时也无悬浊土层,沉降厚度值在

2.65~3.65 cm之间.由图7可知,质量分数为2%~4%的六偏磷酸钠沉降层较小,沉降厚度值在1.1~2.05 cm之间,故六偏磷酸钠溶液的分散性较好,其中质量分数2%的六偏磷酸钠沉降层厚度最低,可应用于后续渣土改良试验.

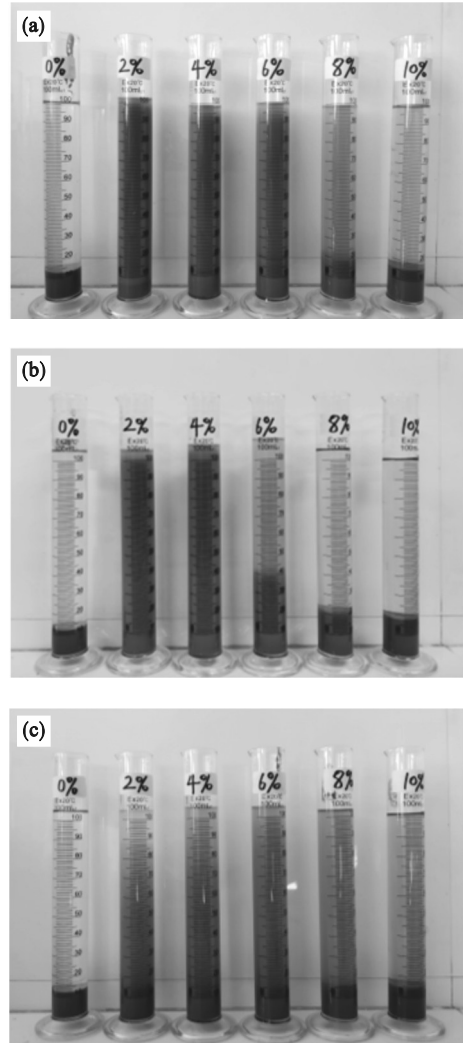


图6 分散剂黏土沉降试验图
Fig. 6 Clay settlement test photo of dispersant (a)一六偏磷酸钠; (b)一焦磷酸钠; (c)一硅酸钠.

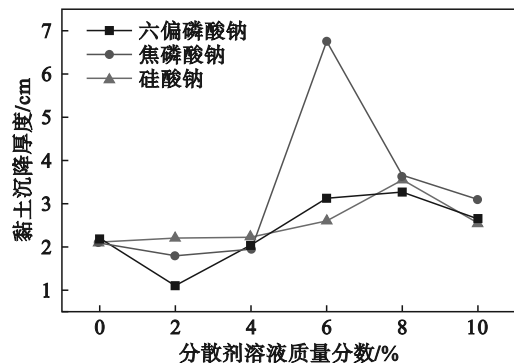


图7 黏土沉降厚度随分散剂溶液质量分数变化曲线
Fig. 7 Curves of clay settlement thickness with mass fraction of dispersant solution

3 渣土改良试验

盾构机在黏土地层掘进过程中,为了使盾构刀盘不结泥饼以及螺旋出土机正常工作,开挖土体应具有较小的黏附性及合适的剪切强度.另外,土仓内的土体应具有良好的流动性以便排土顺利.采用搅拌试验、旋转剪切试验和流动度试验3种方法分别评价改良土体的黏附性、剪切性及流动性.综合评价试验方案的改良效果,得到指导盾构现场施工的渣土改良方案.

3.1 试验方法

黏附性试验用于评价土体的黏附性(见图8a),使用搅拌机搅拌一定时间,直至混合均匀,使黏附在叶片上的黏土量达到稳定状态^[6],具体计算见式(3):

$$\lambda = \frac{G_{MT}}{G_{TOT}} \quad (3)$$

式中: G_{MT} 为黏附在搅拌叶片上土样的质量; G_{TOT} 为搅拌土样的总质量.

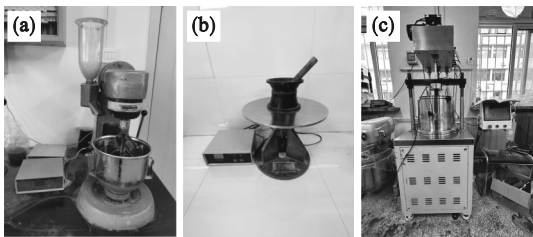


图8 渣土改良试验仪器

Fig. 8 Soil conditioning test instrument

(a)—搅拌试验;(b)—流动度试验;(c)—旋转剪切试验.

土体的流动性可以使用坍落度试验或跳桌试验(见图8b),因为跳桌试验所需土样较少,约为坍落度试验所需土样的三十分之一,便于操作.根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)^[22]中的相关规定,对拌制好的改良土体的流动性进行测量.

旋转剪切试验用于评价土体的剪切性.使用课题组自主研发的旋转剪切仪进行不排水剪切试验(见图8c),根据现场盾构刀盘转速与土仓压力,选定旋转剪切仪转速为1 r/min、压力为200 kPa.试验方法:将土样分层均匀置入试验仓中,打开排气阀,施加法向压力,直至试样上方空气排出;对试样加压至设计的压力值,压缩稳定后,进行旋转剪切试验.根据前人总结和大量施工经验表明^[23],当土体的不排水抗剪强度小于25 kPa时,盾构机可以正常施工.

分别使用单一改良剂(水、泡沫、分散剂)及组合改良剂(泡沫+分散剂)对黏土进行改良,改良剂的注入比范围见表2,共计46组试验.

表2 改良剂注入比范围

Table 2 Range of improver injection ratio %

序号	改良剂名称	含水率	注入比
1	水	20	0, 5, 10, 15, 20, 25
2	泡沫	20, 25, 30	15, 30, 45, 60
3	分散剂	20, 25, 30	5, 10, 15, 20
4	组合改良剂	30	泡沫:15, 30, 45, 60
		30	分散剂:5, 10, 15, 20

3.2 水改良试验

取烘干土样,配制成试验所需含水率,放置于湿润桶中密封24 h,使土的含水率分布均匀.将一定质量的土样与改良剂倒入搅拌器中搅拌混合,混合均匀后进行流动度试验及旋转剪切试验.将配置好的土样放入旋转剪切仪中进行加压剪切试验,结果如图9和图10所示.

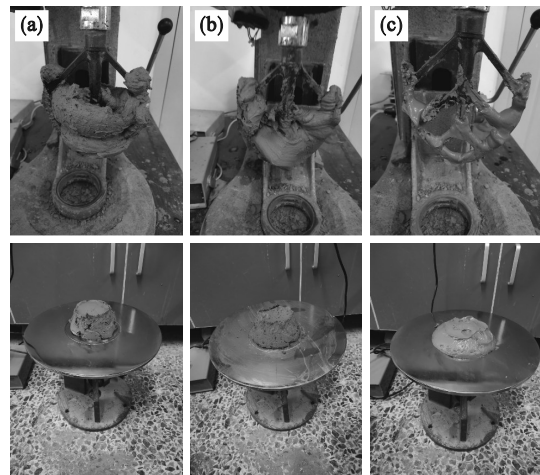


图9 含水率为35%~45%黏土的流动度及黏附试验
Fig. 9 Test of fluidity and adhesion of clays with a moisture content of 35%~45%

(a)—35%含水率;(b)—40%含水率;(c)—45%含水率.

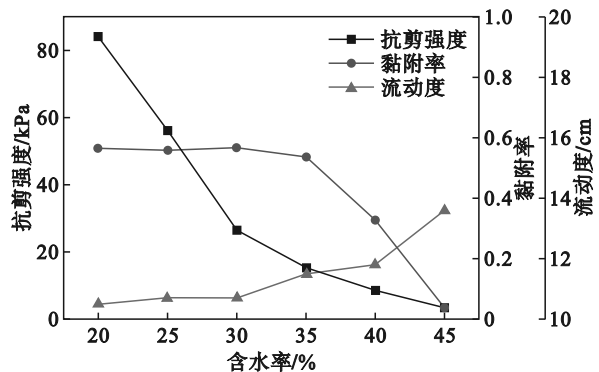


图10 水改良土体试验曲线

Fig. 10 Water reclaimed soil test curves

根据图10可知,当含水率在35%之前,土样的黏附率几乎不变,在0.6附近,而当含水率大于35%后,黏附率下降较快,最终在含水率为45%时,降低至0.039.可见,含水率为35%是黏附性的一个临界点,大于35%时,土样的黏附性会发生变化;当含水率在液限以下时,土样流动性变化并不明显;当含水率增加到液限以上时,流动度缓慢增长,在含水率为45%时为13.6 cm.说明加入水可以改变黏土的流动性,但作用效果并不明显;随着含水率的增大,土样的剪切强度迅速下降,在含水率为30%时,其抗剪强度从84.13 kPa降低至26.46 kPa,随着含水率的继续增加,抗剪强度呈现缓慢减小趋势.

3.3 泡沫改良试验

经现场调研发现土层含水率为20%~30%,故配置含水率分别为20%,25%,30%的3种工况重塑土进行试验.对3种含水率的土样分别加入不同注入比的泡沫进行改良,结果如图11~图13所示.由图可知,泡沫对土样黏附性、流动性和抗剪强度的作用效果有限,表明黏土地层含水率为20%~30%时,泡沫无法与黏土混合,单独加入泡沫的改良效果不理想.

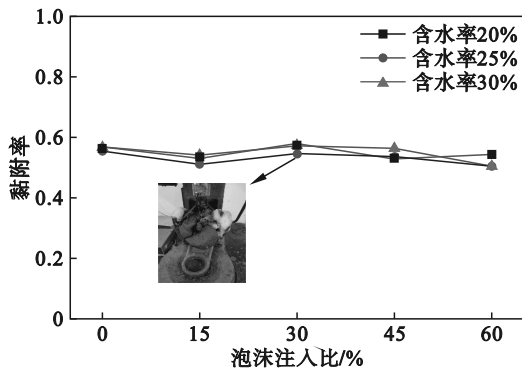


图11 泡沫改良土体黏附性试验曲线

Fig. 11 Adhesion test curves of foam-modified soil

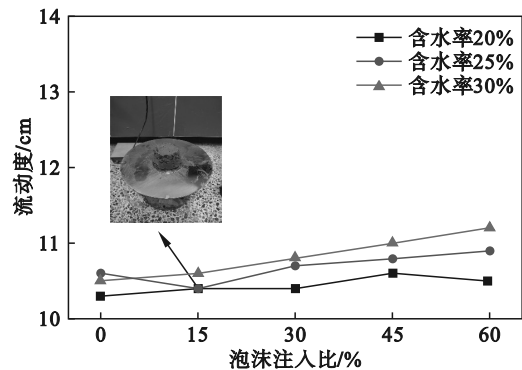


图12 泡沫改良土体流动度试验曲线

Fig. 12 Fluidity test curves of foam-modified soil

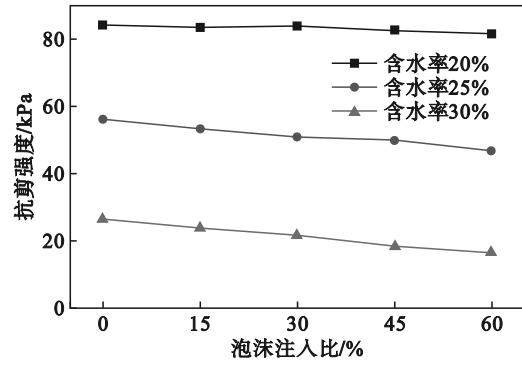


图13 泡沫改良土体旋转剪切试验曲线

Fig. 13 Curves of rotary shear test of foam-modified soil

3.4 分散剂改良试验

当加入分散剂时,结果如图14~图16所示.在20%,25%含水率,注入比大于10%时,黏附率才会迅速下降;在30%含水率时,分散剂的作用效果较明显.当含水率为20%,25%时,分散剂注入比需达到10%以上,土样的流动度才会迅速增加,且含水率越大,流动度增加得越快;在30%含水率情况下,分散剂的作用效果较为明显,可以显著提高土样的流动度,而且分散剂的注入可以迅速降低土样的抗剪强度,但当注入比过大时,土样类似稀泥,改良效果不理想.

3.5 组合改良剂试验

在单独使用水、泡沫作为土体改良材料时,黏土的黏附性较强;单独加入分散剂时,所需材料较多.出于经济性考虑,可以采用泡沫与分散剂组合进行多因素室内试验,即在含水率为30%的情况下,通过在分散剂注入比分别为0,5%,10%,15%,20%的土样中加入不同注入比的泡沫进行改良土体,试验结果见图17~图19.

当分散剂注入比较小时,土样较为干燥,泡沫对土体的影响较小,土样的流动度变化不明显,但黏附率随着泡沫注入比的增加而减小,剪切强度下降趋势较大;而当分散剂注入比达到10%以上时,土样的流塑性较好,且黏附率迅速下降,泡沫注入比的增大会增加土样的流动性,但剪切强度降低到一定程度后,加入泡沫的效果并不明显.

根据以上试验结果,建议改良效果较好的土样黏附率应小于0.3,流动度控制在14~16 cm范围内.综合考虑现场施工时间及经济成本,建议含水率为30%时,分散剂注入比为10%、泡沫注入比为30%~60%,此时土体的改良效果最佳.

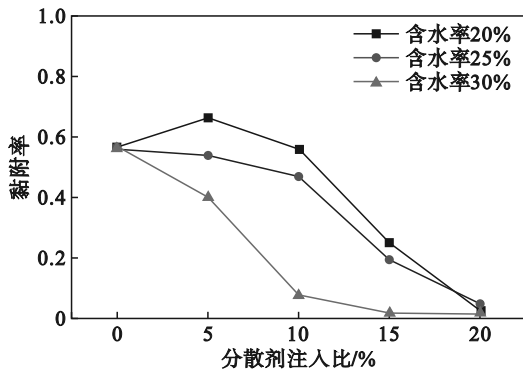


图 14 分散剂改良土体黏附性试验曲线
Fig. 14 Adhesion test curves of soil improved by dispersant

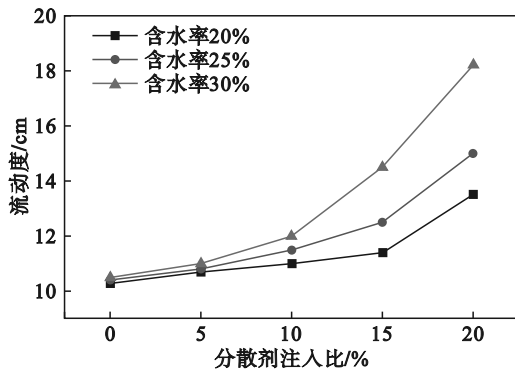


图 15 分散剂改良土体流动度试验曲线
Fig. 15 Fluidity test curves of soil improved by dispersant

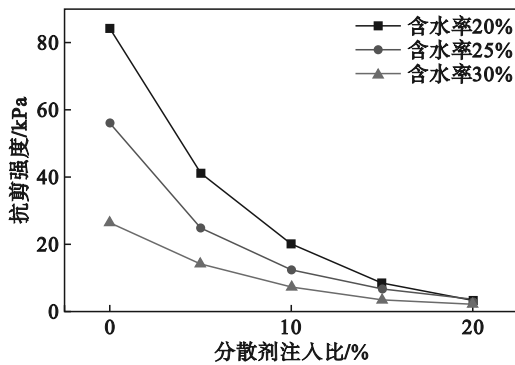


图 16 分散剂改良土体旋转剪切试验曲线
Fig. 16 Curves of rotary shear test of soil improved by dispersant

4 分散剂改良黏土的机理

由上述实验结果可知,分散剂对黏土改良效果影响较大,为了进一步研究分散剂对黏土的改良机理,进行了黏土扫描电子显微镜(SEM)分析和 Zeta 电位测定.

4.1 黏土微观试验研究

扫描电子显微镜分析试验采取自然风干土

样以及加入分散剂处理后的干燥土样,制取体积小于 1 cm^3 ,质量小于 200 g 的薄片,将其黏在导电胶上并喷金,随后使用扫描电子显微镜拍摄其形貌.

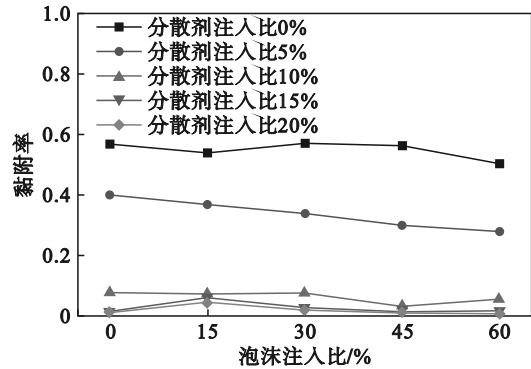


图 17 加入分散剂和泡沫的黏附性试验曲线
Fig. 17 Adhesion test curves of soil with dispersant and foam

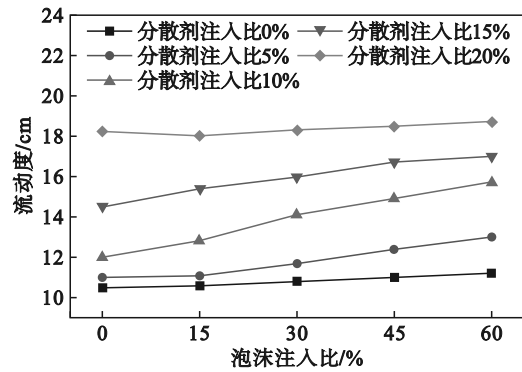


图 18 加入分散剂和泡沫的流动度试验曲线
Fig. 18 Fluidity test curves of soil with dispersant and foam

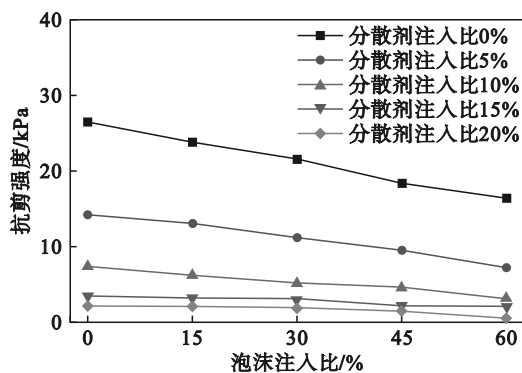


图 19 加入分散剂和泡沫的旋转剪切试验曲线
Fig. 19 Rotary shear test curves of soil with dispersant and foam

土的微观结构不仅反映了土体的形成条件,而且是决定土体工程性质及其他性能的重要因素.采用捷克 Tescan MIRALMS 扫描电子显微镜分别对未改良黏土、分散剂改良土的微观结构进

行观察,结果如图20所示.该黏土的结构主要由弯曲、卷曲的片状黏土矿物晶片组成,并以边-面、面-面接触形成不规则聚集体,晶界不清晰.加入分散剂改良后的黏土在高倍率显微镜下观察可以看到部分片状、颗粒与聚集体具有较明显的边界.

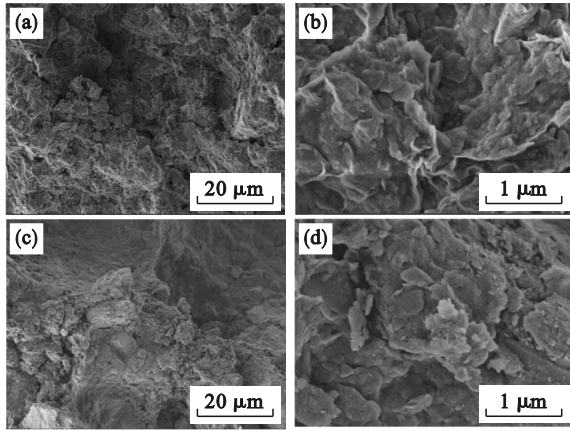


图20 土样微观结构特征

Fig. 20 Microstructure characteristics of soil samples

(a)(b)—未改良黏土;(c)(d)—分散剂改良黏土.

4.2 分散剂作用机理探讨

根据上述土样的微观结构变化,可用双电层理论进行解释^[24].黏土矿物颗粒表面带有一定量的负电荷,溶液中的阳离子在静电引力的作用下被吸附在黏土周围,形成双电层结构.双电层会因黏土颗粒在电场中运动而出现剪切面,该剪切面处的电位称为Zeta电位.

Zeta电位测定具体步骤如下^[25]:将质量分数为2%的六偏磷酸钠溶液以不同比例加入到1g黏土与蒸馏水的混合液中,搅拌均匀后静置5min,取上层清液作为试验样品,使用Litesizer 500纳米粒度及Zeta电位分析仪测定试样的Zeta电位.具体各成分添加量见表3,黏土试样的Zeta电位测试结果见图21.当六偏磷酸钠溶液添加比较低时,六偏磷酸钠产生的低价钠离子代替了高价离子,吸附在黏土颗粒表面,使得双电层变厚,负电势升高,增强了黏土颗粒的分散性,即Zeta电位降低;随着六偏磷酸钠溶液添加比达到一定量时,离子交换量加大,双电层厚度增大到高价离子被完全换成低价离子,吸附趋于饱和,分散效果不再增强,即Zeta电位下降后趋于稳定;同时,磷酸根离子会与非碱金属阳离子发生络合反应,破坏氧化物的胶结作用,提高黏土颗粒表面负电势,使颗粒间排斥力增加,进而改善分散效果.

表3 测定Zeta电位时各成分添加量
Table 3 Amount of each component added during the determination of Zeta potential

六偏磷酸钠溶液添加比/%	加入水质量/g
0	1 000
2	998
4	996
6	994
8	992
10	990

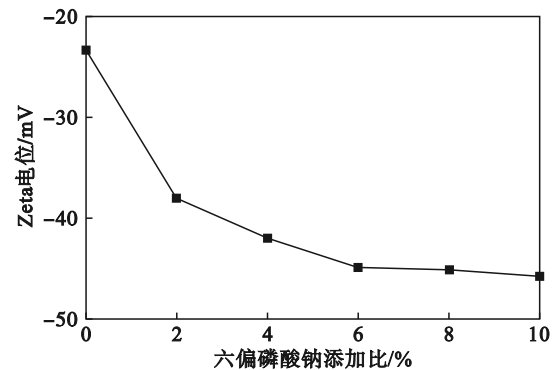


图21 Zeta电位随六偏磷酸钠溶液添加比变化

Fig. 21 Zeta potential changes with the addition ratio of sodium hexametaphosphate solution

5 结 论

1) 根据泡沫的发泡倍率与半衰期的特征规律,确定泡沫剂的体积分数为4%;通过沉降试验选择质量分数为2%的六偏磷酸钠作为黏土层的分散剂.

2) 仅改变黏土的含水率时,黏土的黏附率、抗剪强度随含水率的增大而降低,流动度随之增加.含水率大于35%时,黏附率开始显著降低,定义此含水率为改良黏附性的临界含水率.抗剪强度随含水率的增大迅速降低,当含水率为30%时,抗剪强度降低至26.46 kPa.含水率小于液限时,黏土流动性变化并不明显,仅当含水率大于液限时,流动度才缓慢增长,仅加水无法实现良好的改良效果.

3) 根据室内改良试验结果,建议改良效果较好的土样黏附率应小于0.3,流动度在14~16 cm范围内;推荐该地区黏土地层渣土改良方案为:当分散剂注入比为10%时,泡沫最优注入比为30%~60%;

4) 扫描电镜试验显示,分散剂可以使黏土颗粒分开,产生较明显的边界.质量分数2%的六偏

磷酸钠溶液使黏粒 Zeta 电位减小后趋于平稳,增加了黏土表面双电层的厚度,使得黏土颗粒间的排斥力增加,进而起到分散黏土的作用。

参考文献:

- [1] Mori L S, Mooney M, Cha M S. Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 454-465.
- [2] Sebastiani D, Vilardi G, Bavasso I, et al. Classification of foam and foaming products for EPB mechanized tunnelling based on half-life time [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 92: 103044.
- [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: 296-304.
- [4] 王明胜,路军富,罗奥雷. 粉质黏土地层隧道盾构施工渣土改良剂试验[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 74-79. (Wang Ming-sheng, Lu Jun-fu, Luo Ao-lei. Experiment on soil improver for shield tunnel construction in silty clay stratum[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(5): 74-79.)
- [5] Zumsteg R, Puzrin A M. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 31: 86-96.
- [6] Zumsteg R, Plötze M, Puzrin A M. Effects of dispersing foams and polymers on the mechanical behaviour of clay pastes [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(11): 920-933.
- [7] Martinotto A, Langmaack L. Toulouse Metro Lot 2: soil conditioning in difficult ground conditions [C]//ITA-AITES World Tunnel Congress. Prague, 2007: 1211-1216.
- [8] Feinendegen M, Ziegler M, Weh M, et al. Clogging during EPB-tunnelling: occurrence, classification and new manipulation methods [C]// Proceedings ITA-AITES World Tunnel Congress. Helsinki, 2011, 299: 767-776.
- [9] Thewes M, Hollmann F. Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 122-128.
- [10] Peila D, Picchio A, Martinelli D, et al. Laboratory tests on soil conditioning of clayey soil [J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(5): 1061-1074.
- [11] Merritt A S, Borghi F X, Mair R J. Conditioning of clay soils for earth pressure balance tunnelling machines [J]. *Underground Construction*, 2003, 2003: 455-466.
- [12] 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*, 2020, 95: 103144.
- [13] Wan Z E, Li S C, Yuan C, et al. Soil conditioning for EPB shield tunneling in silty clay and weathered mudstone [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(9): 06021020.
- [14] Zhuo B, Fang Y, Zhu M, et al. Combined conditioning of dispersant and foam agent for the soil with different clay minerals: an experimental study [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(7): 248.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 32-41. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019: 32-41.)
- [16] 李志军,翟志国,赵康林. 泥水盾构刀盘结泥饼形成原因及防治技术 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(sup2): 1866-1871. (Li Zhi-jun, Zhai Zhi-guo, Zhao Kang-lin. Causes of mud cake formation on cutter head of slurry shield and its control technology [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(sup2): 1866-1871.)
- [17] Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock [S]. Farnham: EFNARC, 2005: 15-16.
- [18] 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 and Underground Space Technology*, 1998, 13(2): 173-180.
- [19] 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): 449-453. (Yan Xin, Gong Qiu-ming, Jiang Hou-ting. Soil conditioning for earth-pressure balanced shields excavation in sand layers [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(3): 449-453.)
- [20] Li S C, Wan Z E, Zhao S S, et al. Soil conditioning tests on sandy soil for earth pressure balance shield tunneling and field applications [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 120: 104271.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 61-72. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020: 61-72.)
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG 3420—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 58-61. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Testing methods of cement and (concrete for highway engineering: JTG 3420—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020: 58-61.)
- [23] Houlsby G, Mair R, Borghi X, et al. Easing the way soil Conditioning [J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 2003, 35(6): 48-50.
- [24] Liu P F, Wang S Y, Ge L, et al. Changes of Atterberg limits and electrochemical behaviors of clays with dispersants as conditioning agents for EPB shield tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 73: 244-251.
- [25] 刘朋飞,王树英,阳军生,等. 渣土改良剂对黏土液塑限影响及机理分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 91-96. (Liu Peng-fei, Wang Shu-ying, Yang Jun-sheng, et al. Effect of soil conditioner on Atterberg limits of clays and its mechanism [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(6): 91-96.)