

文章编号:1673-9469(2022)04-0062-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.009

基于透明土技术的泥水盾构开挖面泥膜渗透特性研究

倪小东,史志鹏,王媛,曾乾坤

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 为了更直观的观测盾构泥浆成膜试验中注浆扩散和泥膜形成过程,开发了一套泥水盾构开挖面可视化注浆试验系统,采用透明土和透明浆液结合光学技术开展多种变量下泥水盾构泥浆渗透过程的可视化试验,记录各横纵断面渗透图像,并对图像进行二值化处理,探究了地层粒径与浆液粘度对泥浆扩散形态的影响,并评估了所形成泥膜的渗透特性,研究结果表明:浆液在地层中的渗透距离是评估泥膜形成质量的重要标准,而地层的孔径和泥浆粘度是影响浆液渗透距离的重要因素。在高渗透性土层条件下,减小盾构机刀盘开口率和注浆压力有助于形成泥皮型泥膜。试验结果对盾构的泥浆工程具有重要的指导意义。

关键词: 透明土;泥膜;浆液扩散;可视化

中图分类号: U451

文献标识码: A

Research on the Permeability Characteristics of Mud Film on the Excavation Surface of Mud-Water Shield Based on Transparent Soil Technology

NI Xiaodong, SHI Zhipeng, WANG Yuan, ZENG Qiankun

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to more intuitively observe the process of grouting diffusion and mud film formation in the shield mud film formation test, this paper developed a set of visual grouting test system for the excavation surface of the mud-water shield. The visualization test of the mud infiltration process of the mud-water shield under variable conditions, recording the infiltration images of each transverse and longitudinal section, and binarizing the images, exploring the influence of formation particle size and slurry viscosity on the mud diffusion pattern, and evaluating the formed mud film. The research results show that the permeability of the slurry in the formation is an important criterion for evaluating the quality of mud film formation, and the pore size of the formation and the viscosity of the mud are important factors affecting the penetration distance of the slurry. Under the condition of high permeability soil layer, reducing the opening ratio of the shield machine cutter head and reducing the grouting pressure can help to form a mud-skin type mud film. The test results have important guiding significance for the mud engineering of shield tunneling.

Key words: transparent soil; mud film; slurry diffusion; visualization

自1825年第一台盾构机开挖水底隧道以后,盾构法以其自身独有的优势在国内外迅速发展^[1],然而盾构法受制于土体自稳性,且其施工路径大多会穿越市区等繁华场所,施工过程中如果

出现掌子面失稳现象,将严重危害施工安全,造成巨大的人员和财产损失。所以在修建盾构隧道时形成安全有效的泥膜是解决开挖面稳定控制的关键问题。维持泥水盾构掌子面稳定性的根本途径

收稿日期:2022-04-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1510800);国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U2240210);江苏省水利科技项目(2021075)

作者简介:倪小东(1981-),男,江苏靖江人,博士,教授,从事岩土工程数值分析研究。

是泥浆压力与土压力和水压力的平衡。泥浆压力的施加需要依托在开挖面上形成不透水或微透水的泥膜,将部分泥浆压力转化为有效应力才能实现泥水平衡,同时部分泥浆渗透进入地层增加地层粘聚力^[2-6]。关于泥水盾构开挖面泥膜形态、孔隙特征、稳定性的研究,目前大多是通过在土体内部埋设仪器以获得土体内部变形和渗流规律,而常规盾构掌子面注浆物理模型试验则是利用空压机构造内外压力差促使浆液渗透进入土层,完成注浆后取出土层开展后续相关分析。显然,传统土工模型试验介入式测量会干扰土体变形,进而对试验结果产生影响,且当前试验无法揭示浆液在相应条件下的时空分布特征,无法准确把握泥浆渗透、扩展机制。基于上述因素,采用非介入式无损全域透明技术展现掌子面注浆过程^[7-11],探究其成膜机理,对于开挖面稳定控制具有积极的意义。

人工合成透明土的出现使得学者能够更方便直观地观测到土体内部变形规律,鉴于其自身优势,结合光学测量和数字图像处理技术,可实现土体内部渗流场、位移场、速度场的无损可视化观测。已有学者应用透明土作为模型土进行盾构模型试验,研究盾构掘进时地层变形规律、泥膜发展机理和开挖面稳定理论,验证了其优越性和可行性。孙吉主等^[12]以溴化钙溶液和熔融石英砂合成透明土作为模拟地层,开展了盾构开挖模型试验,为盾构掘进施工时的可视化观测又提供一种方案。叶飞等^[13]发明了一种泥水平衡式盾构模拟试验系统,可模拟高水压下泥水盾构的开挖过程。曹利强等^[14]发明了一种用于模拟盾构泥膜形成的试验装置,若将透明土作为试验地层,该装置可实时监测泥浆渗透过程中各参数变化规律,分析影响泥浆成膜的因素。本文就现有研究的不足进行探究,利用人工合成透明土技术,结合激光散斑技术和数字图像处理技术,通过小比例模型试验开展不同变量下泥水盾构泥浆渗透成膜的可视化过程和泥膜形成机理研究,分析各因素对泥膜形成质量的影响,为泥水盾构施工提供理论依据。

1 泥水盾构成膜试验

1.1 试验模型设计

试验装置示意图如图 1 所示,该试验系统包括模型箱、盾构推进系统、注浆系统、抽真空系统和

图像采集系统。模型箱作为地层环境;推进系统模拟泥水盾构机,其前方通过两片开孔圆盘同轴连接,通过转动调节盾构机开挖时前方刀盘开口率;注浆系统施加并控制注浆压力;通过抽真空系统排除透明土骨料与孔隙液体混合后产生的气泡,避免影响试验可视化观测;利用激光在盾构前方任意切面土层成像,结合 CCD 工业相机高频记录图像,通过位移平台移动激光器位置,获取多个切面图像,最后导入计算机进行图像处理,获取透明土体中泥浆的运动轨迹、获取浆液任意时刻填充形态和扩散范围。

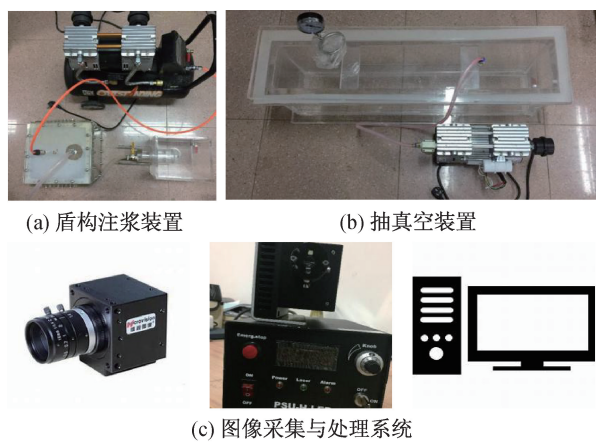


图 1 试验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of test device

1.2 试验材料选择

1.2.1 模拟土层与地下水

当使用与固体颗粒折射率相同的透明液体填充固体颗粒孔隙时,光在通过固液混合体时将不发生折射和反射,外观上呈现透明。为模拟不同粒径的地层,本试验选用 0.25~2 mm 的熔融石英砂,并采用标准土壤筛来筛分,以每一级筛余作为一组地层,配制 3 组均一粒径的地层,且为保证不同地层干密度与孔隙率相同,需在试验时对试样进行控制,地层基本性质见表 1。同时以不同质量比的正十二烷和 15#白油的混合溶液作为透明土的孔隙液体来拟合石英砂的折射率,达到透明可视的效果。

表 1 试验地层基本物理性质

Tab. 1 The basic physical properties of the formation tested						
地层	粒径/mm	C_u	D_{60}/mm	D_{10}/mm	$k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	
S_1	0.25~0.5	1.38	0.50	0.36	6.8×10^{-2}	
S_2	0.5~1.0	1.38	0.80	0.58	3.4×10^{-1}	
S_3	1.0~2.0	1.38	1.50	1.09	1.2	

1.2.2 浆液材料

作为模拟浆液的透明材料,与传统流体材料相比,其需满足一定特征,如:粘滞系数及比重与实际浆液相近;浆液材料与孔隙中液体不混溶;浆液扩散过程及最终形态可以完整呈现;注入材料能体现浆液硬化过程。经过不断探索,本文选择透明光敏树脂材料作为泥浆材料,并添加不同粒径的无定形硅粉充当浆液填充材料,调节浆液密度与颗粒级配,同时光敏树脂中加入不同质量的稀释剂 TPGDA 来获得不同粘度的试验泥浆,泥浆参数见表 2,各编号浆液粒径曲线如图 2 所示。

表 2 试验各材料性质

Tab. 2 Test the properties of each material

泥浆编号	配比	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	漏斗 粘度/s	塑性粘度 $/(mPa \cdot s)$	d_{85} $/\mu m$
1	光敏树脂+ 5%TPGDA	1.28	25.1	12	153
2	光敏树脂+ 10%TPGDA	1.15	21.8	8	112
3	光敏树脂+ 20%TPGDA	1.03	18.1	5	76

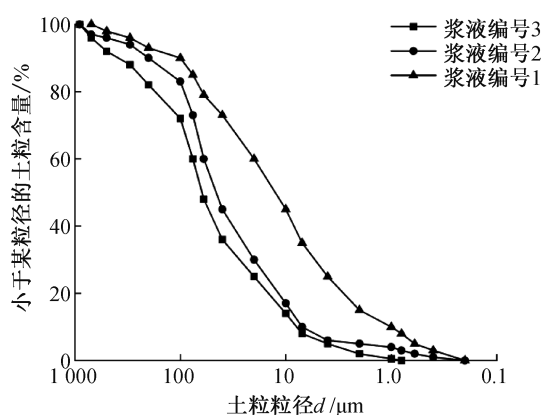


图 2 各编号浆液粒径图

Fig. 2 Physical map of each numbered slurry

1.3 试验流程

(1) 首先依据试验要求组装试验装置,检查注浆装置气密性是否良好。

(2) 分层填筑透明土样。每次填筑完成后进行抽真空直至透明度良好。

(3) 将激光器打开,调整激光器的面光源与盾构中心纵断面重合,按合适高度架设好 CCD 相机拍摄成像。

(4) 然后将配置好的浆液搅拌均匀,取出 200 mL 随后倒入浆液罐中,迅速密封好浆液罐,防止浆液

在注浆前发生离析。

(5) 打开空压机,逐级加压(0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 MPa),保持盾构刀盘开口率为 40% 推进,并用 CCD 相机拍摄并读取每级荷载下浆液的渗透距离变化情况,直至稳定。

(6) 对每组试验最后形成的泥膜进行滤失量分析。

2 泥水盾构注浆结果分析

2.1 浆液渗透类型分析

采用 3 组泥浆(表 2)在 3 组不同地层(表 1)进行 9 组渗透试验,并绘制出每组试验中浆液在各级荷载下的渗透距离变化曲线。浆液的渗透距离变化曲线大致可以分为三种类型,如图 3 所示,类别 A:在各级荷载作用下,泥浆的渗透距离均很小,且随着荷载的增长,渗透距离大小变化缓慢,呈现稳定状态;类别 B:泥浆的渗透距离随着荷载的增长呈阶梯式增长,并在每个荷载作用下缓慢增长;类别 C:在第一级荷载作用下,浆液便快速扩散,并随着荷载的增长,扩散速度逐渐减缓。

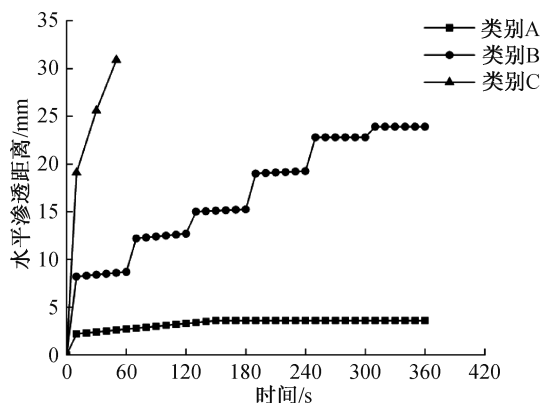


图 3 浆液在地层中三种典型渗透曲线

Fig. 3 Three typical permeability curves of slurry in formation

2.2 浆液渗透形态分析

试验同时用 CCD 相机记录下了各组浆液在地层中横断面与纵断面的最终填充形态,浆液在地层中的填充形态大致分为三种,如图 4—图 8 所示。从纵断面方向来看,类型 I:泥浆中的粗颗粒随着注浆进行逐渐在与其接触的土层表面聚集,最终形成了致密颗粒薄层,形成的泥膜称之为泥皮型泥膜;类型 II:泥浆中的细颗粒在压力作用下渗入地层,一部分填充在盾构前方表层,形成一层薄薄的固体颗粒层,另一部分由于地层的过滤作用而停留在地层孔隙中,形成一段渗透带,我们称

之为泥浆+渗透带型泥膜;类型Ⅲ:地层中存在明显的泥浆细颗粒,无明显的泥皮形成,形成的泥膜称之为渗透带型泥膜^[15-16]。

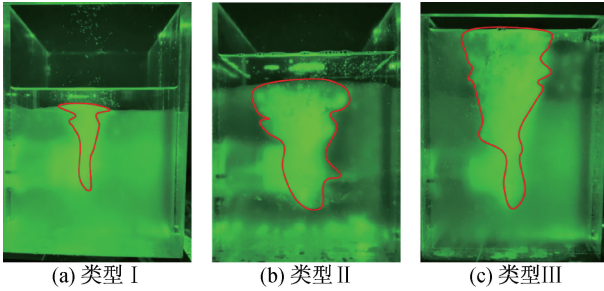


图4 浆液在地层中纵断面方向形态

Fig. 4 The shape of the grout in the longitudinal section in the formation

从横断面方向来看,类型Ⅰ:浆液开始从中心向四周扩散,最终在横断面形成一“梨状”的泥膜,其底部扩散区域近似等于刀盘面积,这说明浆液在第一阶段填充盾构前方区域时几乎未向四周扩散,盾构上方扩散区域呈现下小上大的特征,这说明越靠近地表浆液的扩散区域越大,这是因为越靠近地表注浆需克服的阻力越小,相同注浆压力下扩散的距离就越远,这也验证了纵断面的浆液扩散规律的正确性。类型Ⅱ:浆液开始呈现不规则形态,随后从中心向四周扩散,最终在横断面形成一不规则形状的泥膜,该泥膜形状呈现下窄上宽的形态。类型Ⅲ:浆液从开始就呈现“长柱状”,随后向四周扩散,开始与结束时扩散形态大致相同。从横断面渗透形态上来看,泥皮型泥膜的渗透范围最小,浆液中的颗粒都聚集在一小区域内;相比之下,泥皮+渗透带型泥膜与渗透带型泥膜的渗透范围更大,同时当同体积浆液形成泥皮+渗透带型泥膜时,其在掌子面形成的一段泥膜将阻碍浆液进一步在纵断面方向渗透,所以浆液在横断面方向的渗透范围比渗透带型泥膜更大。

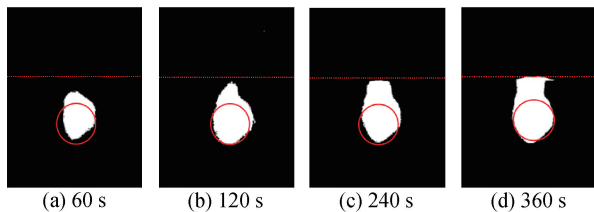


图5 类型Ⅰ浆液横断面扩散形态比较(盾构前方0 cm处)

Fig. 5 Comparison of cross-sectional diffusion patterns of type I slurry (0 cm in front of shield)

试验完成后,将9组不同类型的渗透试验的试验结果记录下来,包括各组浆液的渗透类型曲线,

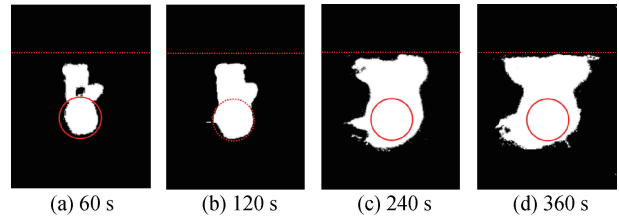


图6 类型Ⅱ浆液横断面扩散形态比较(盾构前方0 cm处)

Fig. 6 Comparison of cross-sectional diffusion patterns of type II slurry (0 cm in front of shield)

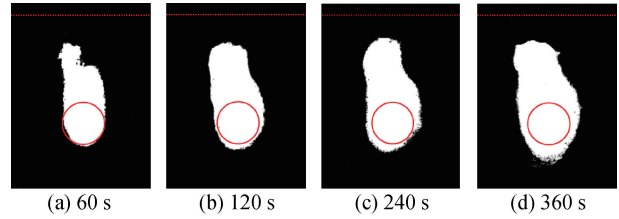


图7 类型Ⅲ浆液横断面扩散形态比较(盾构前方0 cm处)

Fig. 7 Comparison of cross-sectional diffusion patterns of type III slurry (0 cm in front of shield)

各组浆液的地层填充形态以及浆液的最大渗透距离,见表3。从表3中可以发现,在渗透系数最小的地层 S_1 中,浆液均发生类型A的渗透,同时填充形态也均为类型Ⅰ,泥膜类型均为泥皮型;而随着地层渗透系数的增长,浆液的渗透类型也逐渐转变为B甚至C,浆液的填充类型出现渗透带,在渗透系数最大的地层 S_3 中,泥浆将不会发生类型A的渗透,且无法形成泥皮型泥膜。从浆液的最大渗透距离上来看,当最大渗透距离 $D_{\max} < 10$ mm时,浆液都发生类型A的渗透,且填充形态也都对应类型Ⅰ,当 $10 \text{ mm} \leq D_{\max} < 20$ mm时,浆液的渗透类型均为B,填充类型也基本为类型Ⅱ,当地层为 S_3 ,浆液为③号时除外,这也不难理解,当粘度系数小的浆液在渗透系数大的地层渗透时,浆液的渗透不仅发生在水平方向,也发生在竖直方向,竖直方向上的渗透一定程度上影响了水平方向的渗透;而当浆液发生类型C的渗透时, $D_{\max}$ 均大于20 mm,填充类型均为泥皮+渗透带型,甚至无法形成泥皮。这表明渗透距离大小侧面反应了泥膜形成的类型,渗透距离小表明浆液在地层中形成了致密的泥膜,渗透距离大表明浆液在地层中形成了厚且疏松的渗透带。

而从试验对比结果来看,地层是影响泥膜形成类型的第一因素,在孔径最大的 S_3 地层中,即使是粘度系数最大的浆液也无法形成泥皮型泥膜;另外在相同地层中,浆液的粘度系数越高,密度越大,越容易形成薄且致密的泥膜,究其原因是因为

在相同孔径的地层中,浆液的密度越大,能够堵塞地层孔径的颗粒数量会越多,且浆液的粘度系数越高,浆液中颗粒与地层中水的结合能力也会越高,颗粒易在地层表面形成致密的泥膜,而当浆液的粘度变小后,浆液颗粒与水结合力变差,在压力作用下,颗粒容易被挤出形成一段渗透带,使得形成的泥膜厚且疏松。

表3 各组试验试验结果

Tab.3 Test results of each group

组号	地层	浆液编号	渗透类型	填充形态类型	最大渗透距离 $D_{\max}/\text{mm}$
1	S_1	1	A	I	2.5
2	S_1	2	A	I	4.9
3	S_1	3	A	I	6.8
4	S_2	1	A	I	6.1
5	S_2	2	B	II	14.2
6	S_2	3	B	III	20.3
7	S_3	1	B	II	15.6
8	S_3	2	C	II	24.9
9	S_3	3	C	III	31.8

2.3 泥膜渗透性分析

同时,本文对组号4、5、6所代表的泥皮型、泥皮+渗透带型泥膜和渗透带型泥膜进行了渗透性分析,用相同体积正十二烷和15#白油的混合溶液在逐级注浆压力下进行滤失试验,用量筒统计通过三种不同类型泥膜的渗滤液体积。如图8,可以发现在相同注浆压力下,泥皮型泥膜的渗滤液体积最少,泥皮+渗透带型次之,而渗透带型的渗滤液体积则为最多,在渗透速率方面,泥皮型泥膜每分钟滤液量在注浆压力达到0.1 MPa后速率逐渐稳定,达到3.5 mL/min,泥皮+渗透带型泥膜每

分钟滤液量在注浆压力达到0.15 MPa后逐渐稳定,达到5.1 mL/min,而渗透带型泥膜在全压力状态下,其每分钟滤液量保持稳定,为6.1 mL/min。试验结果表明,在相同注浆压力作用下,泥皮型泥膜的渗透系数最小,泥皮+渗透带型次之,渗透带型泥膜的渗透系数最大,而泥膜的渗透系数越小,其对泥浆入渗的阻力就越大,从而泥浆压力可以更好地转换为有效应力,来平衡地层土压力,达到开挖面的“泥水平衡”。

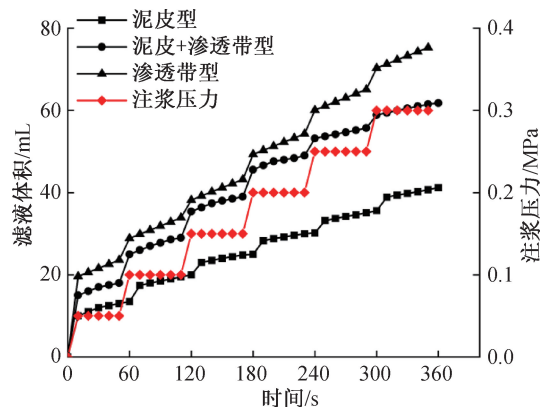


图8 不同注浆压力下滤液体积

Fig. 8 Percolate volume under different grouting pressure

2.4 高渗透性地层施工工况改良

当盾构机穿越高渗透性土层例如砂砾土和碎石土时,浆液颗粒易在较大的地层孔径中扩散,形成疏松的渗透带以致无法形成泥膜,如本试验的 S_3 地层。而如何在此类地层中通过改良施工工况来形成微透水的泥膜,从而维持开挖面的稳定十分关键。本文提供了两种可行方法:(1)适当缩小刀盘开口率(从40%刀盘开口率缩小为30%刀盘开口率);(2)适当减小注浆压力(逐级压力减半),并

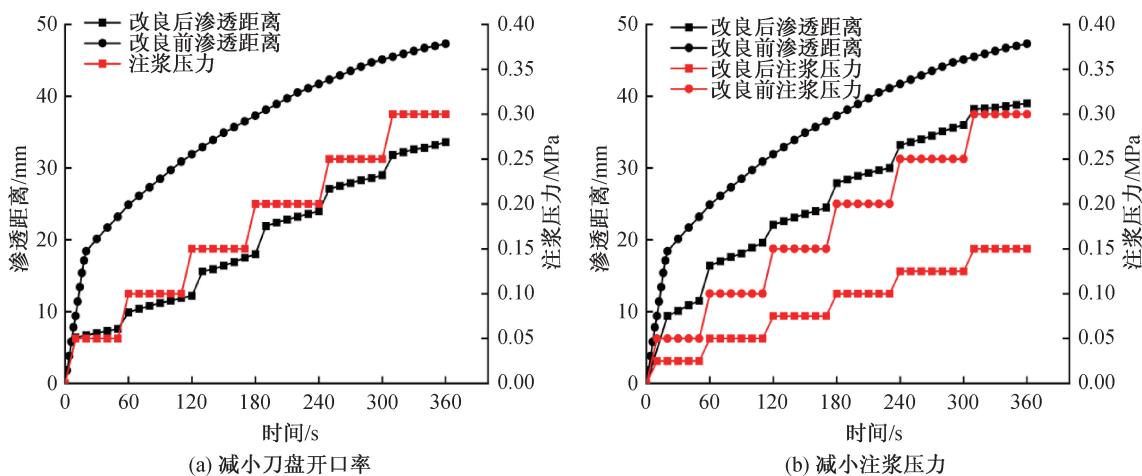


图9 工况改良后渗透距离对比图

Fig. 9 Comparison chart of penetration distance after working condition improvement

就改良后的两种工况进行了试验分析,渗透距离对比图如图9所示。从对比结果来看,无论是缩小刀盘开口率还是减小注浆压力,浆液的渗透曲线类型发生了改变(从类型C转变为类型B),且浆液的渗透距离均减小,但减小刀盘开口率后浆液渗透距离减小的幅度更大;而从渗透形态上来看(图10),两种工况改良后渗透形态也均发生了改变,形成的泥膜形态均往泥皮型泥膜靠拢,这说明在高渗透性土层条件下,减小盾构机刀盘开口率和减小注浆压力有助于形成泥皮型泥膜,从而降低地层的渗透系数,增大对泥浆入渗的阻力,从而更好的维持开挖面稳定。

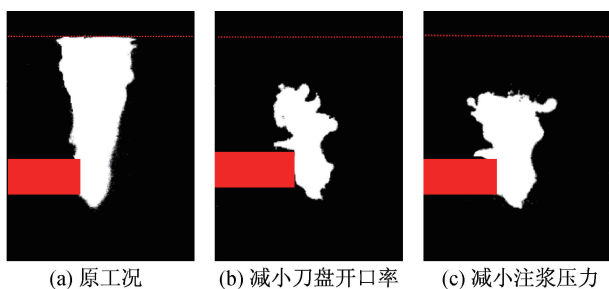


图10 工况改良后渗透距离对比图

Fig. 10 Comparison chart of penetration distance after working condition improvement

3 结论

1) 浆液的渗透距离大小决定了泥膜形成的类型,渗透距离越小表明浆液在地层中形成了泥膜越致密,渗透距离越大表明浆液在地层中形成的泥膜越疏松甚至没有形成泥膜。

2) 地层性质是影响泥膜形成类型的第一因素,相同性质浆液在孔径越小的地层越容易形成良好致密的泥膜;在相同地层下,浆液的粘度越高,其与水的结合力越大,形成的泥膜越致密,性质越稳定。

3) 3种泥浆堆积形态中,泥皮型泥膜的渗透系数最小,泥皮+渗透带型次之,渗透带型泥膜的渗透系数最大;并且泥膜两侧的水压力差泥皮型泥膜最小,泥皮+渗透带型次之,渗透带型泥膜最大。即泥膜越致密,其对泥浆入渗的阻力就越大,更多的泥浆压力可以转换为有效应力来平衡地层土压力,达到开挖面的“泥水平衡”。

4) 在高渗透性土层条件下,减小盾构机刀盘开口率和减小注浆压力有助于形成泥皮型泥膜,为开挖地层的稳定提供帮助。

参考文献:

- [1] 张凤祥,李炯,沈钧. 盾构隧道工法进展概况[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会年会,1998.
- [2] 袁大军,沈翔,刘学彦,等. 泥水盾构开挖面稳定性研究[J]. 中国公路学报,2017,30(8):24-37.
- [3] 王奇,朱东元. 泥浆密度对形成泥膜所需泥浆量的影响[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2017,39(3):62-65.
- [4] 闵凡路,魏代伟,姜腾,等. 泥浆在地层中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(10):2801-2806.
- [5] 钟小春,张洋,张露露,等. 复合地层土压平衡盾构压力舱渣土改良研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2020,37(2):24-29.
- [6] 韩晓瑞,朱伟,刘泉维,等. 泥浆性质对泥水盾构开挖面泥膜形成质量影响[J]. 岩土力学,2008,29(S):288-292.
- [7] WELKER A L, BOWDERS J J, GILBERT R B. Applied Research Using a Transparent Material with Hydraulic Properties Similar to Soil[J]. Geotechnical Testing Journal,1999,22(3):266-270.
- [8] 魏静,鲍宁,魏平,等. 透明砂土力学性质三轴试验研究[J]. 铁道工程学报,2018,35(11):16-21.
- [9] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Geotechnical Properties of Transparent Silica[J]. Canadian Geotechnical Journal,2002,39(1):111-124.
- [10] 丁平,尹清锋,刘阳君,等. 高黏性土质地层土压平衡盾构施工技术研究[J]. 南方冶金学院学报,2018,39(1):22-26.
- [11] 杜雪山,王奇,朱东元. 压力差对盾构施工形成泥膜所需泥浆量的影响[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2016,33(4):39-41,46.
- [12] 孙吉主,肖文辉. 盾构模型试验研究现状及新设想[J]. 土工基础,2011(6):55-58.
- [13] 叶飞,陈治,苟长飞,等. 基于球孔扩张的盾构隧道壁后注浆压密模型[J]. 交通运输工程学报,2014,14(1):35-42.
- [14] 曹利强,张顶立,房倩,等. 泥水盾构泥浆在砂土地层中的渗透特性及对地层强度的影响[J]. 北京交通大学学报,2016,40(6):7-13+31.
- [15] 林钰丰,张尚达,方勇,等. 不同渗透系数地层中泥浆渗透成膜试验研究[J]. 中国公路学报,2020,33(12):190-199.
- [16] 魏纲,朱彦华,尹鑫晟. 泥水盾构泥浆渗透试验及成膜规律研究进展[J]. 低温建筑技术,2021,43(3):76-81+87.

(责任编辑 周雪梅)