

大断面顶管工程减摩泥浆配合比实验研究

黄建华^{1,2}, 陈月香¹, 王蕴晨¹, 杨鹿鸣¹

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.地下工程福建高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 通过设计不同配合比的减摩泥浆进行泥浆性能试验, 得到膨润土和聚丙烯酰胺对泥浆性能的影响规律, 结合城市主干道路交叉口超大断面矩形顶管工程, 进行泥浆配合比优化和减摩效果测试模型试验, 得到适合场地土层特性的优化配合比的减摩泥浆, 实验结果表明, 在饱和软土中注入优化配合比的减摩泥浆可将摩擦力降低至原来的 55.7%, 在饱和砂土中可将摩擦力降低至原来的 63.1%, 研究成果将为今后大断面顶管工程减摩注浆提供理论基础和借鉴作用。

关键词: 顶管工程; 顶推力; 减摩泥浆; 配合比; 减摩效果

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)03-0212-07

Experimental study on the mix ratio of anti-friction slurry in large-section pipe jacking engineering

HUANG Jianhua^{1,2}, CHEN Yuexiang¹, WANG Yunchen¹, YANG Luming¹

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Fujian Provincial Key Laboratory in Universities of Underground Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The slurry performance tests were carried out by designing anti-friction slurries with different mix ratios, and the effects of bentonite and poly-acrylamide on slurry performance were obtained. Then, combined with the large section rectangular pipe jacking project at the intersection of an urban main road, the optimization of slurry mix ratio and the model tests of their anti-friction effects were carried out, and the optimum mix ratio suitable for the soil layer characteristics of the site was obtained. Test results show that injecting anti-friction slurry with an optimized mix ratio into saturated soft soil can reduce the friction by about 44.3%, and injecting it into saturated sand can reduce the friction by 36.9%. The research results will provide theoretical basis and reference for future large-section pipe jacking engineering.

Keywords: pipe jacking engineering; jacking force; anti-friction slurry; mix ratio; anti-friction performance

顶管施工中减摩注浆技术是最关键的技术之一, 通过顶管预留的注浆孔向顶管外壁和土体的空隙之间注入减摩泥浆能够稳定和支撑土体, 防止顶管机开挖时周围土体塌落, 并降低顶管顶进过程的摩阻力, 保证顶管施工的顺利进行^[1]。

不同的顶管工程特点对顶管减摩注浆材料及浆液配合比的要求差别较大, 特别是工程地质条

件的差异, 因此顶管施工时应根据工程自身特点采用合适的减摩泥浆配合比。王春婷, 隆威^[2]研究了聚丙烯酰胺、腐植酸钾和石墨粉对泥浆减摩效果和护壁性能的影响, 并且通过正交试验设计, 得到了最优的泥浆配方。王明胜, 刘大刚^[3]结合室内泥浆性能试验, 探讨了膨润土、纯碱、CMC 和 PHP 对泥浆性能的影响规律, 并由此确定了触变

收稿日期: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678153); 福州市科技计划项目(2018-G-42); 校企合作开发基金项目(GY-Z17145)

第一作者简介: 黄建华(1969-), 男, 福建莆田人, 教授, 博士(后), 研究方向: 岩土与环境、地下围护与结构。

泥浆的配合比。李刚^[4]结合工程实际研究了膨润土+高分子材料的新型减摩泥浆,结果表明该减摩泥浆的实施效果好。张云杰^[5]通过设计试验,研究了粉土和粉砂中不同配比的泥浆对摩阻力的影响,并且得到了较优的泥浆配方。郭伟,谢昊,武仁杰^[6]等研究了不同的浆土混合物与混凝土之间的最大静摩擦系数和滑动摩擦系数。Pellet^[7]等依托多个顶管工程进行了管周摩阻力试验研究,分析了顶管施工中减摩泥浆和土层特性对摩阻力的影响,并给出了摩阻力系数的取值范围。Reilly^[8]等使用传统的直接剪切装置和新型三轴试验装置进行了一系列界面摩擦试验的研究,对于粗粒土壤,顶管润滑剂的主要作用机理是通过在界面附近的土壤中产生超孔隙水压力来减少作用在管道上的局部有效应力。潘尚昆^[9]等结合工程实例,验证了人工注浆与自动注浆相结合的注浆工艺和注浆系统的良好效果。

综上,目前已有许多关于减摩泥浆配合比试验的相关研究,但针对滨海地区复杂地质条件下超浅埋、超大断面矩形顶管工程施工中的减摩泥浆性能试验研究及其减摩效果方面的研究还很少。为此,本文依托福州市白马路与工业路交叉口地下连接通道顶管工程,对顶管施工中的减摩泥浆进行研究,结合泥浆配合比试验及减摩效果模型实验,得到工程项目场地条件下的淤泥和砂土地层中顶管施工的优化配合比的减摩泥浆,并应用于现场超大断面顶管施工,实际检验可行有效,同时提高顶管顶进施工效率和安全,实验研究成果将为今后类似顶管工程减摩注浆提供理论基础和借鉴作用。

1 工程概况

城市交叉口地下连接通道采用2根9.02 m(宽)×9.26 m(高)的矩形顶管法施工,单条通道长度为47.25 m,其最小覆土深度约为2.5 m,最大覆土深度约为6.0 m。顶管由东向西推进,坡度约为-5.9%。该工程场地内土层的结构自上而下分别为:①杂填土②粉质黏土③淤泥④粉质黏土⑤中砂(夹薄层淤泥)。顶管施工的前半部分主要在淤泥中顶进,后半部分主要在砂土中顶进,隧道纵断面如图1所示。

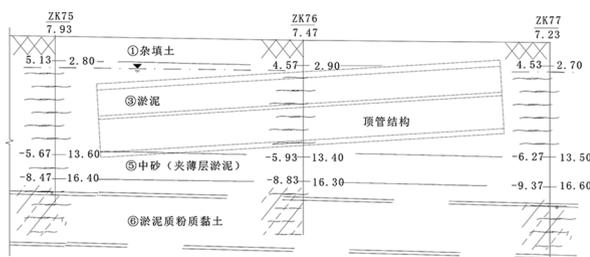


图1 顶管与土层纵断面图(单位:m)

Fig.1 Profile of soil layers and jacking pipe tunnel (unit: m)

2 减摩泥浆配合比设计

2.1 试验方案

顶管顶进现场主要在淤泥和砂土地层中,因此在设计减摩泥浆配合比时主要是针对淤泥和砂土。首先根据已有经验试配几组膨润土泥浆,然后通过不断调整浆液中水、膨润土(高黏)与高分子材料(聚丙烯酰胺)的含量,得到多组泥浆配合比,对每组浆液的马氏漏斗黏度、失水量、泥皮厚度和析水率等工作性能进行试验,从而得到满足顶管施工要求的浆液配合比。

2.2 泥浆性能指标测定

泥浆的性能指标包括密度、泥皮厚度、静切力、黏度、pH值、失水量和析水率等,但对顶管施工质量影响大的主要是泥皮厚度、黏度、失水量和析水率。

黏度反映了浆液的流动性,试验中采用ZMN型马氏漏斗黏度计和秒表来测试,记录流出946 mL泥浆所经历的时间即为漏斗黏度。如图2所示,单位:s。



图2 泥浆

Fig.2 Funnel viscosity measurement of slurry

失水量是指在压力差的作用下,浆液中的部分水分向土体中渗透的现象,试验中采用打气筒滤失仪来测定浆液的失水量和泥膜厚度(如图 3 所示)。

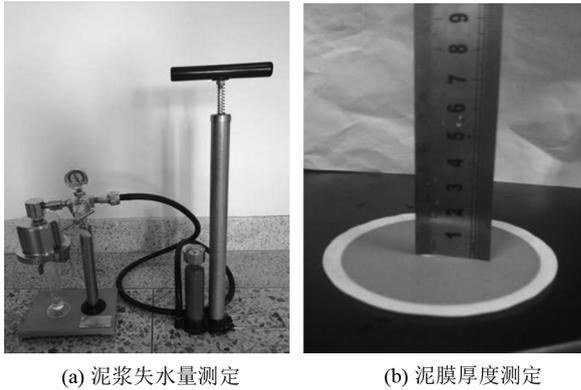


图 3 泥浆失水量及泥膜厚度测定

Fig.3 Determination of water loss and film thickness of slurry

泥浆的析水率反映了泥浆的稳定性,其测试方法是将泥浆倒入 100 mL 的量筒中,并加盖密封量筒,静置 24 h 后,观察泥浆析出水的情况(如图 4 所示)。

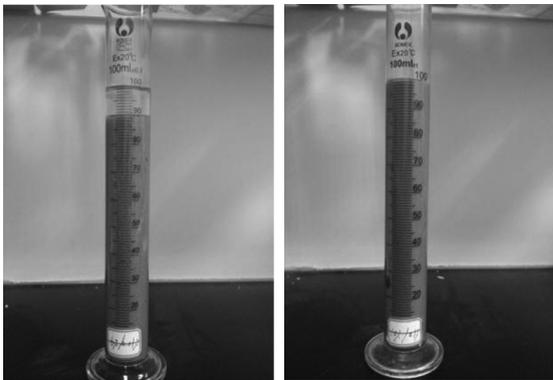


图 4 泥浆析水率测定

Fig.4 Determination of slurry syneresis rate

2.3 试验结果分析

2.3.1 膨润土对泥浆性能的影响

不同配合比的纯膨润土泥浆性能试验结果见表 1。

图 5 是膨润土含量对泥浆漏斗黏度、失水量、泥皮厚度和析水率的影响曲线。从图中可以看出:

表 1 不同配合比条件下纯膨润土泥浆性能

Tab.1 Properties of pure bentonite slurry with different mixing ratios

试验序号	$w_{\text{膨润土}}/\%$	漏斗黏度/0.1s	失水量/mL	泥皮厚度/mm	析水率/%
1	4	38	21.3	1.5	1
2	6	74	16.8	1.5	0.1
3	8	464	14.8	1.2	0
4	10	2 145	13	0.9	0

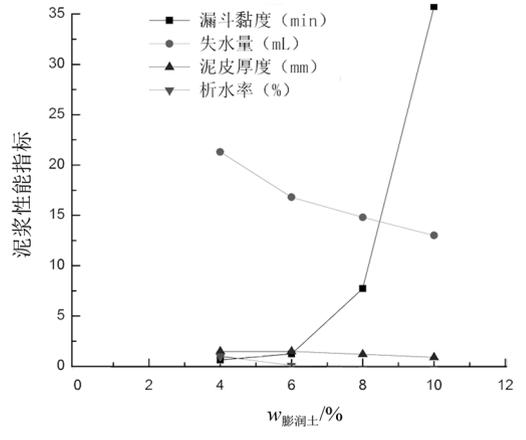


图 5 膨润土含量对泥浆性能的影响

Fig.5 Effects of bentonite content on slurry performance

(1)在一定范围内,泥浆的漏斗黏度随着膨润土含量的增加而增大,特别是当膨润土的含量达到一定量后,膨润土对漏斗黏度的影响更明显;

(2)膨润土的含量对泥浆失水量的影响也较明显,但是对泥皮厚度的影响较小。在一定范围内增加膨润土的含量,泥浆的失水量呈下降趋势,而泥皮的厚度稳定在一定范围内;

(3)膨润土的含量对泥浆的析水率影响也较大。当膨润土含量达到一定量后,膨润土泥浆的析水率为 0。

2.3.2 聚丙烯酰胺对泥浆性能的影响

在 4 种纯膨润土泥浆的基础上,分别加入少量聚丙烯酰胺后浆液的性能见表 2。

图 6 是 4 种纯膨润土泥浆中聚丙烯酰胺含量对泥浆性能的影响曲线。由表 2 和图 6 可知:在纯膨润土泥浆中,膨润土的含量对泥浆的漏斗黏度、失水量和析水率影响较大。以纯膨润土泥浆为基本配方加入少量聚丙烯酰胺时,泥浆的各种性能指标将会出现两种变化趋势:当膨润土含量

小于 6% 时, 随着聚丙烯酰胺含量的增加, 泥浆的漏斗黏度逐渐增大, 泥皮厚度逐渐减小, 失水量和析水率先增大后减小; 当膨润土含量大于 8% 时, 随着聚丙烯酰胺含量的增加, 泥浆的漏斗黏度先减小后增大, 泥浆的泥皮厚度、失水量和析水率逐渐减小。

表 2 不同配合比条件下的泥浆性能

Tab.2 Slurry performance under different mixing ratios

试验序号	$w_{\text{膨润土}} / \%$	$w_{\text{聚丙烯酰胺}} / \%$	漏斗黏度 / 0.1 s	失水量 / mL	泥皮厚度 / mm	析水率 / %
1	4	0.00	38	21.30	1.50	1.00
2	4	0.01	40	21.80	1.00	19.00
3	4	0.05	105	15.80	0.90	5.00
4	4	0.10	1 870	15.20	0.50	3.90
5	4	0.15	305	14.20	0.45	0.10
6	6	0.00	74	16.80	1.50	0.15
7	6	0.01	76	21.50	0.90	10.00
8	6	0.05	84	15.20	0.60	2.00
9	6	0.10	310	12.50	0.50	0.10
10	6	0.15	529	11.50	0.45	0.00
11	8	0.00	464	14.80	1.20	0.00
12	8	0.01	325	16.50	1.00	0.05
13	8	0.05	574	12.50	0.90	0.00
14	8	0.10	806	10.50	0.70	0.00
15	8	0.15	1 614	9.00	0.50	0.00
16	10	0.00	2 145	13.00	0.90	0.00
17	10	0.01	1 850	13.50	0.85	0.00
18	10	0.05	滴流	11.50	0.50	0.00
19	10	0.10	滴流	9.20	0.45	0.00
20	10	0.15	滴流	8.60	0.40	0.00

根据以上分析可知, 当膨润土含量较小时, 聚丙烯酰胺的含量达到一定量后, 泥浆的黏度明显增大, 但是当膨润土含量较大时, 聚丙烯酰胺的含量达到一定量反而能够降低黏度; 此外, 当膨润土含量较小时, 随着聚丙烯酰胺含量的增加, 泥浆的失水量和析水率先增大再减小。分析其原因是聚丙烯酰胺具有絮凝的作用, 当膨润土含量较小时, 随着聚丙烯酰胺含量的增加, 膨润土泥浆的絮凝效果逐渐提高, 表现为泥浆的失水量和析水率增大, 但是当超过一定含量之后, 膨润土泥浆的絮凝效果下降。

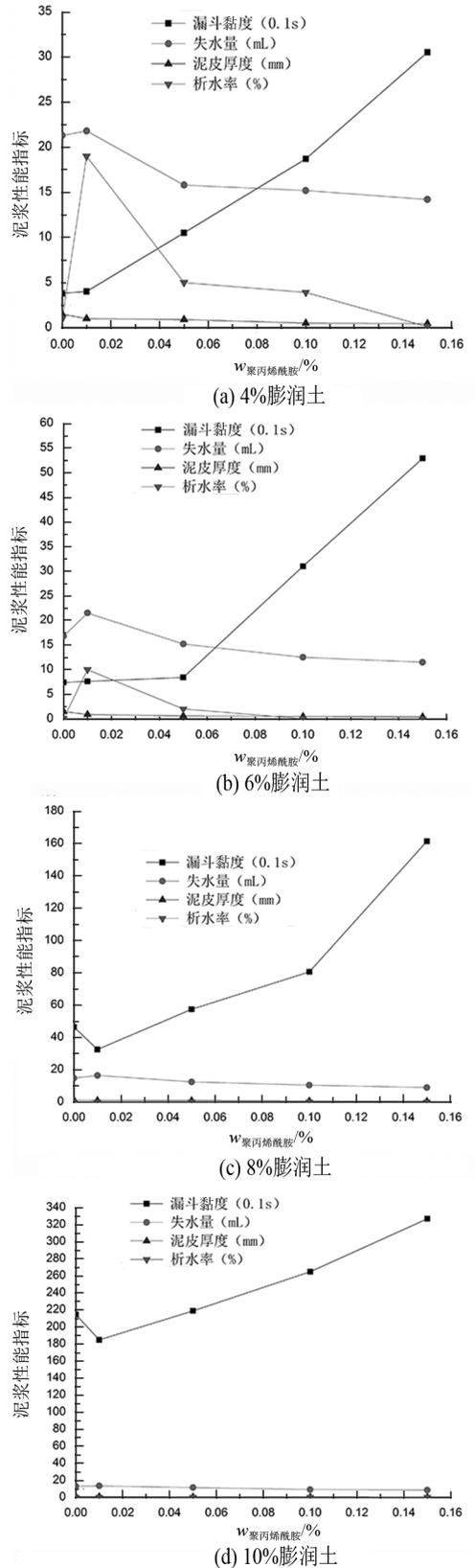


图 6 聚丙烯酰胺含量对纯膨润土泥浆性能的影响
Fig.6 Effects of poly-acrylamide content on the performance of pure bentonite slurry

3 泥浆减摩效果实验

3.1 试验模型

本研究针对不同触变泥浆配合比条件下顶管与土体间摩擦阻力的测试,主要是顶管与土体摩擦阻力直剪试验^[4-5,10]和泥浆减摩效果模型试验^[11-14],这两类试验均可以得到不同减摩泥浆条件下顶管与土体之间的摩擦阻力,但均存在不足。前者虽然可以测试两种接触界面间的摩擦阻力,但测试中无法模拟实际施工工况及管道的顶进过程,后者模拟实际施工工况,但整个试验装置较复杂,测试工作强度也较大,本文采用一种自行设计的接触界面摩擦阻力试验装置。

试验装置主要由模型箱、钢板、弹簧测力计和电动机等几个部分组成,试验装置如图 7 所示。模型箱采用的是尺寸为 800 mm(长)×400 mm(宽)×200 mm(高),厚度为 15 mm 的木箱;钢板底板尺寸为 150 mm(长)×140 mm(宽)×10 mm(厚),并且在钢板底板的 4 个角处进行圆弧处理,可减小钢板运动过程中前方土体的堆积,钢板侧板在不同高度处预留对称的小孔,可确保从小孔引出的线与钢板增加砝码时整体的重心位于同一水平位置;电动机采用转速为 15 r/min 的同步电机,在钢板向前运动的过程中可确保钢板为匀速运动;弹簧测力量程为 10 N;绳子为 0.7 mm 的软钢丝绳;1 kg 的砝码两个。

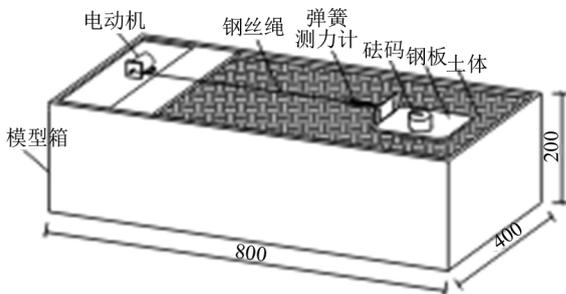


图 7 摩擦系数测定试验装置

Fig.7 Measurement test device of friction coefficients

与已有的顶管与土体间摩擦阻力试验方法相比,该试验方法既可以模拟实际施工工况,使试验过程和结果更符合实际工程,又可以实现测试方法的简化、测试工作强度的降低以及检测效率的提高。

3.2 试验方法

采用取自顶管施工现场的淤泥和砂土进行试

验,主要包括钢板与淤泥的接触界面摩擦试验和钢板与砂土的接触界面摩擦试验。

对于现场的淤泥层,其渗透系数低,土壤颗粒小,减摩泥浆一般不需要过高的黏度,但该场地地下水水位高,淤泥层的含水量大,故要求泥浆能够形成良好的泥皮,而且要求泥浆的失水量小^[11],因此在淤泥中采用膨润土与水配制的纯膨润土泥浆即可满足要求。根据上一节各浆液配合比性能试验可知,在纯膨润土泥浆中有 2 组纯膨润土泥浆符合在淤泥中注浆的要求,故选择这 2 组配合比的纯膨润土泥浆进行试验,这 2 组膨润土泥浆中各成分质量比例分别为:

(1) 优质泥浆一:膨润土:水=1:11.5

(2) 优质泥浆二:膨润土:水=1:9

在砂土地层泥浆极易发生漏失,故在砂土中注入的泥浆除了要有足够的黏度,使泥浆在高渗透性的砂土中能保持长时间不漏失,还要泥浆具有良好的触变性,使泥浆注入后能迅速变成凝胶状,有效堵塞砂层孔隙^[15]。结合工程实际以及前一节不同泥浆配合比性能试验,在砂土中可采用的减摩泥浆为膨润土含量为 8% 的纯膨润土泥浆以及在该膨润土泥浆的基础上加入少量的聚丙烯酰胺的优化泥浆,试验中采用的泥浆的各成分质量比例分别为:

(1) 优质泥浆一:膨润土:水=1:11.5

(2) 优化泥浆一:膨润土:聚丙烯酰胺:水=1:0.006 25:11.494

(3) 优化泥浆二:膨润土:聚丙烯酰胺:水=1:0.012 5:11.487

(4) 优化泥浆三:膨润土:聚丙烯酰胺:水=1:0.018 8:11.482

3.3 试验过程

(1) 安装固定好试验装置后,将从施工现场取回的淤泥和砂土土样进行风干并碾散后平铺在模型箱中,并且在土样上均匀洒水、压密后静置 24 h 使其固结^[12],如图 8 所示。

(2) 将钢板、弹簧测力计、拉绳和电动机组装好后,让钢板在砂土中匀速向前运动(如图 9 所示),同时读取多组弹簧测力计的示数,然后增加砝码后读取多组弹簧测力计的示数,最后得到钢板与砂土之间的摩擦系数。

(3) 在砂土表面平铺一层厚度为 3 mm 的不同配合比的泥浆,如图 10 所示,重复步骤 2),得



(a) 淤泥土样 (b) 砂土土样

图 8 模型箱中的土体示意图

Fig.8 Schematic diagram of the soil in the model box

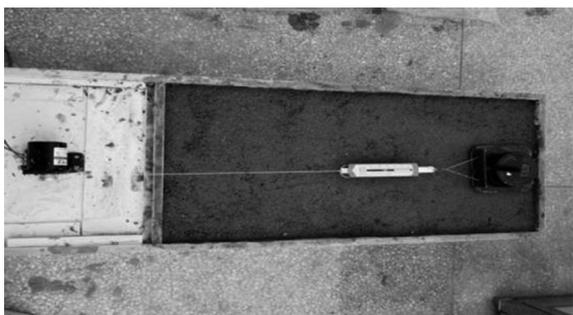


图 9 无泥浆作用的砂土与钢板摩擦系数测定

Fig.9 Determination of friction coefficient between sand and steel plate without slurry action



图 10 不同配合比泥浆下砂土与钢板的摩擦系数测定

Fig.10 Determination of friction coefficients between sand and steel plate under the action of slurries with different mix ratios

到砂土在不同配合比泥浆条件下与钢板之间的摩擦系数。

(4)待砂土中需要测试的浆液与钢板之间的摩擦试验完成后,将砂土换成淤泥,重复以上试验步骤,得到淤泥与钢板之间的摩擦系数以及淤泥在不同配合比泥浆条件下与钢板之间的摩擦系数。

3.4 实验结果分析

3.4.1 淤泥与钢板接触界面实验分析

钢板与淤泥之间的接触界面摩擦试验结果和钢板与淤泥在不同配合比的纯膨润土泥浆条件下的接触界面摩擦试验结果见表 3。

表 3 淤泥在不同工况下与钢板的摩擦系数

Tab.3 Friction coefficients between sludge and steel plate under different working conditions

试验序号	$w_{\text{膨润土}} : w_{\text{水}}$	摩擦系数			平均值
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	
1	不注浆	0.38	0.45	0.48	0.436
2	1 : 11.5	0.26	0.24	0.29	0.263
3	1 : 9	0.18	0.2	0.2	0.193

根据表 3 可知,在淤泥中注入合适的减摩泥浆可有效地减小顶进过程中的摩擦阻力。与未注浆工况下的淤泥和钢板之间的摩擦系数相比较,膨润土泥浆配合比为 $w_{\text{膨润土}} : w_{\text{水}} = 1 : 11.5$ 时,淤泥在该泥浆配合比条件下与钢板之间的摩擦系数减小 39.7%;当膨润土泥浆配合比为 1 : 9 时,淤泥在该泥浆条件下与钢板的摩擦系数减小 55.7%,故不同配合比的膨润土泥浆产生的减摩效果不同。

3.4.2 砂土与钢板接触界面实验分析

钢板与砂土之间的接触界面摩擦试验结果和钢板与砂土在不同配合比的减摩泥浆条件下接触界面摩擦试验结果见表 4。

表 4 砂土在不同工况下与钢板的摩擦系数

Tab.4 Friction coefficients between sand and steel plate under different working conditions

试验序号	$w_{\text{膨润土}} : w_{\text{聚丙烯酰胺}} : w_{\text{水}}$	摩擦系数			平均值
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	
1	不注浆	0.25	0.26	0.28	0.263
2	1 : 0 : 11.5	0.2	0.24	0.24	0.226
3	1 : 0.006 25 : 11.494	0.09	0.08	0.12	0.097
4	1 : 0.012 5 : 11.487	0.098	0.1	0.13	0.109
5	1 : 0.018 8 : 11.482	0.17	0.16	0.19	0.173

从表 4 可直观地看到,不同配合比泥浆的减摩效果。与未注浆工况下的砂土相比较,优质泥

浆可有效地减小顶进过程中的摩擦力。与未注浆工况下砂土和钢板之间的摩擦系数相比较,膨润土减摩泥浆材料配合比为 $w_{\text{膨润土}} : w_{\text{聚丙烯酰胺}} : w_{\text{水}} = 1 : 0.006\ 25 : 11.494$ 时,砂土在该配合比泥浆作用下与钢板间的摩擦系数减小 63.1%;当膨润土泥浆配合比为 $1 : 0.006\ 25 : 11.487$ 时,砂土在该减摩泥浆作用下与钢板的摩擦系数减小 58.6%,在砂土中注入掺有适量聚丙烯酰胺的膨润土泥浆的减摩效果比纯膨润土泥浆的减摩效果好,但是在一定范围内,随着添加聚丙烯酰胺含量的增加,其泥浆的减摩效果降低,故配制砂土中的减摩泥浆时应选择合适的配合比,使泥浆达到较好的减摩效果。

4 结论

1) 当泥浆配合比一定时,在纯膨润土泥浆

中,膨润土的含量对泥浆的性能影响大;对于掺有少量聚丙烯酰胺的泥浆,聚丙烯酰胺对泥浆的黏度、失水量和析水率影响较大。

2) 根据泥浆材性试验及泥浆减摩效果模型实验,得到适合在现场顶管工程中饱和淤泥层的优化减摩泥浆配合比是 $w_{\text{膨润土}} : w_{\text{水}} = 1 : 11.5$,饱和砂土层中优化的泥浆配合比是 $w_{\text{膨润土}} : w_{\text{聚丙烯酰胺}} : w_{\text{水}} = 1 : 0.006\ 25 : 11.494$ 和 $w_{\text{膨润土}} : w_{\text{聚丙烯酰胺}} : w_{\text{水}} = 1 : 0.012\ 5 : 11.487$ 。

3) 不同土层中的大断面顶管工程对泥浆的性能要求差异较大,特别是当顶管施工中穿越的土层性质变化较大时,应该适时调整膨润土泥浆的配合比,使其满足顶管顶进过程的减摩要求,保证工程安全顺利实施。

参考文献:

- [1] 魏纲,徐日庆,邵剑明,等. 顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J]. 岩土力学, 2004(6): 930-934.
- [2] 王春婷,隆威. 大口径长距离顶管工程泥浆配方试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014(1): 106-111.
- [3] 王明胜,刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016(6): 182-189.
- [4] 李刚. 超大断面矩形顶管新型泥浆的开发应用[J]. 绿色建筑, 2016(4): 67-71.
- [5] 张云杰. 小间距大直径双孔顶管顶进对周围土体的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] 郭伟,谢昊,武仁杰,等. 顶管施工过程中膨润土润滑作用试验研究[J]. 河南科技, 2015(1): 115-118.
- [7] PELLET-BEAUCOURA L, KASTNER R. Experimental and analytical study of friction forces during microtunnelling operations [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2002, 17(1): 83-97.
- [8] REILLY C C, ORR TREVOR L L. Physical modelling of the effect of lubricants in pipe jacking[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 63: 44-53.
- [9] 潘尚昆,刘勇,徐连刚. 大断面矩形顶管人工-自动结合注浆减摩效果分析[J]. 施工技术, 2017, 46(11): 94-97.
- [10] 黄吉龙. 大口径玻璃钢夹砂顶管室内试验与数值分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11] 罗云峰. 长距离大直径混凝土顶管中的减阻泥浆研究与应用[J]. 建筑施工, 2014(2): 186-188.
- [12] 肖世国,夏才初,李向阳,等. 管幕内顶进箱涵时外表面摩擦系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(15): 2746-2750.
- [13] 龙星. 黏性土环境中矩形顶管施工的室内试验研究[J]. 中州煤炭, 2016(12): 53-57.
- [14] 杨焯旻. 顶管施工注浆作用及环境效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [15] 王福芝,曾聪,孔耀祖. 大口径长距离顶管润滑泥浆方案研究[J]. 地质科技情报, 2016(2): 49-52.

(责任编辑: 陈 雯)