

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2026.0611

河道浑水及淤泥含量对顶管施工管道减阻性能影响

陈旭¹, 杜升涛^{1,2,3*}, 程滨生¹, 周朝阳¹, 陈伟²

(1.宁波市市政工程建设集团股份有限公司, 浙江 宁波 315000; 2.中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 3.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为节约水资源并探索河道淤泥的资源化利用, 以甬江浑水及淤泥为研究对象, 讨论其对膨润土泥浆减阻性能的影响。通过正交实验设计 4 组共 18 种泥浆配比, 分别测试不同质量分数下膨润土、浑水、淤泥及黄原胶对泥浆触变指数的影响规律。在 3 个不同长度管道模型条件下, 利用摩阻力测试装置进行 51 个泥浆减阻效果的拉力测试实验。结果显示, 含沙浑水提高了膨润土泥浆的触变指数, 对触变泥浆具有积极作用, 但对泥浆减阻效果几乎没有影响; 淤泥质量分数的增加导致触变指数降低, 但添加 0.05% 黄原胶可部分恢复其触变指数; 淤泥和膨润土质量分数分别为 2%~6%、6%~10% 时, 黄原胶对泥浆减阻性能影响较小, 但对泥浆减阻性能的稳定效果显著。

关键词: 浑水; 淤泥; 膨润土; 触变指数; 摩阻力

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2026) 02-0011-07

The influence of turbid water and silt content on friction reduction performance in pipe jacking construction

CHEN Xu¹, DU Shengtao^{1,2,3*}, CHENG Binsheng¹, ZHOU Chaoyang¹, CHEN Wei²

(1.Ningbo Municipal Engineering Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2.School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To conserve water resources and explore the recycling of muddy sediment in river, this paper investigated the influence of Yongjiang River turbid water and silt on the friction-reducing properties of bentonite slurry. Through orthogonal experiments, four groups with a total of 18 slurry mixtures were designed to examine the influence of the mass fractions of bentonite, turbid water, and silt, as well as xanthan gum, on the thixotropic index of the slurry. Under three pipeline models of varying lengths, 51 tension tests were conducted using a frictional resistance testing apparatus to evaluate the drag-reducing effectiveness of the slurries. The results indicate that sand-laden turbid water enhances the thixotropic index of bentonite slurry, exerting a positive effect on thixotropic slurries while showing negligible impact on drag reduction. An increase in silt mass fraction reduces the thixotropic index, but adding 0.05% xanthan gum partially restores it. When the mass fractions of silt and bentonite range from 2% to 6% and 6% to 10%, respectively, xanthan gum has minimal influence on the drag-reducing performance of the slurry yet significantly improves its stability.

Keywords: turbid water; silt; bentonite; thixotropic index; friction resistance

收稿日期: 2025-06-10 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

第一作者: 陈旭, 高级工程师, 主要研究方向为市政工程及道路工程。E-mail: 282988214@qq.com

*通信作者: 杜升涛, 博士/讲师, 主要研究方向为市政地下顶管工程。E-mail: dushengtao@nbu.edu.cn

近年来,在人口密度高、市政地下工程需求旺盛的城市建设中,顶管法得到了广泛应用^[1-3]。特别是随着城市化进程的加速,洪涝灾害现象频发,城市综合管线、地下排水管道等工程也随之迅猛发展;同时,随着城市河道下穿管线、抽水蓄能引水隧洞、海底隧道管幕施工等工程需求持续增长,大直径、长距离顶管施工案例已屡见不鲜^[3-4]。顶管施工过程中,管道与岩土体之间摩阻力是顶力的主要控制因素,通过注入高性能减阻泥浆可使管-土界面形成润滑膜,甚至最大可降低90%的管-土摩阻力^[5-7]。因此,利用减阻泥浆降低管-土摩阻力是一种行之有效的方法。

减阻泥浆又称触变泥浆,主要成分为膨润土、纯碱、水以及相关外加剂。这种泥浆在静置状态下呈凝胶状,受剪切力作用后则会稀化,并具有流动性,是目前市政顶管工程最常用的润滑剂。为此,国内外学者对膨润土泥浆的减阻机理和泥浆配比进行了大量研究。

根据管道与地层的接触状态,现有摩阻力理论计算模型可分为管-土全接触、管-浆接触、管-土部分接触模型^[4,8-9]。减阻泥浆配比研究方面,众多学者通过添加不同外加剂对膨润土泥浆进行改性,以适应不同的工程需求。罗如平等^[7]、高增奎等^[8]、Xu等^[9]研究了含水地层和砂砾对触变泥浆漏斗黏度、滤失量、析水率、流性指数等性能的影响,讨论含砂量对泥浆配比与管道摩阻力的关系,发现顶管受到的摩阻力随静置时间延长和泥浆含砂量的增加而明显增长,泥浆形成的滤饼可有效阻碍细砂和中粗砂之间的渗流,泥浆含砂量低于20%时的管道摩阻力仅降低5%,并根据砂砾粗细程度给出对

应的膨润土泥浆配比。雷华阳等^[10]在膨润土泥浆中添加羧甲基纤维素钠(CMC)、聚丙烯酰胺和瓜尔胶,发现CMC对膨润土泥浆黏度具有较高的契合效应。张雪等^[11]在无水砂层条件下开展研究,得出触变泥浆配比为10%膨润土、0.2%CMC、0.5%纯碱和89.3%水时,泥浆的流塑性强,滤失量低且触变性优良。王春婷等^[12]通过室内实验,测试了聚丙烯酰胺、腐植酸钾、石墨粉的含量与膨润土含量配比对触变泥浆性能参数的影响,最终确定11%膨润土、5%纯碱、0.007%聚丙烯酰胺、1%腐植酸钾、0.6%石墨粉为最优配比。王旭等^[3]以重庆观景口水利枢纽工程的岩石地层顶管施工为背景,研究了钠基膨润土、钙基膨润土和有机膨润土在添加改性外加剂后的性能,结果显示,由6.6%钠基膨润土、0.4%纯碱、0.4%CMC、0.1%聚丙烯酰胺、0.2%瓜尔胶混合而成的泥浆减阻效果最优,可使摩阻力降低35%。

本文以宁波市甬江河道浑水和淤泥为材料,开展河道浑水和淤泥质量占比对膨润土泥浆减阻效果的影响研究,希望为减阻泥浆的配比优化提供参考依据,同时,探索河道淤泥在膨润土泥浆制备中的再利用途径,从而实现节约资源与减少河道清淤工作量的双重目标。

1 泥浆触变指数及摩阻力实验

1.1 实验工况

具体实验工况见表1。实验A1~A4为膨润土、纯碱、CMC和清水配制的膨润土泥浆,膨润土质量分数分别为6%、8%、10%、12%,以测试膨润土质量占比对触变泥浆触变指数和摩阻力减阻效

表1 实验工况及参数列表

单位: %

编号	膨润土	纯碱	CMC	清水	浑水	淤泥	黄原胶
A1	6	0.5	0.2	93.3	—	—	—
A2	8	0.5	0.2	91.3	—	—	—
A3	10	0.5	0.2	89.3	—	—	—
A4	12	0.5	0.2	87.3	—	—	—
B1	6	0.5	0.2	—	93.3	—	—
B2	8	0.5	0.2	—	91.3	—	—
B3	10	0.5	0.2	—	89.3	—	—
B4	12	0.5	0.2	—	87.3	—	—

表 1 （续） 单位：%

编号	膨润土	纯碱	CMC	清水	浑水	淤泥	黄原胶
C1	0	0.5	0.2	—	87.3	12	—
C2	6	0.5	0.2	—	87.3	6	—
C3	8	0.5	0.2	—	87.3	4	—
C4	10	0.5	0.2	—	87.3	2	—
C5	12	0.5	0.2	—	87.3	0	—
D1	0	0.5	0.2	—	87.3	12	0.05
D2	6	0.5	0.2	—	87.3	6	0.05
D3	8	0.5	0.2	—	87.3	4	0.05
D4	10	0.5	0.2	—	87.3	2	0.05
D5	12	0.5	0.2	—	87.3	0	0.05

果的影响。实验工况 B1~B4 采用甬江浑水，与实验 A1~A4 中清水进行对比，分析甬江浑水制备的膨润土泥浆减阻效果。实验工况 C1~C5 中膨润土和甬江淤泥质量分数之和保持为泥浆总质量的 12%，探讨淤泥质量占比对泥浆减阻性能的影响，其中工况 C5 与 B4 为同个实验。实验工况 D1~D5 在工况 C1~C5 基础上添加 0.05%黄原胶作为增稠剂，用以提高含甬江淤泥膨润土黏度。其中，甬江浑水中悬移质含沙量约为 0.79~1.27 kg/m³，中值粒径介于 0.004~0.009 mm，取它们平均值 1.03 kg/m³、0.006 5 mm 分别作为浑水中悬移质质量浓度和泥沙中值粒径；河道底沙以黏土质粉砂为主，中值粒径介于 0.110~0.118 mm，平均值为 0.114 mm^[13]。

1.2 触变指数测试

膨润土泥浆各组分材料在精度为 0.01 g 电子秤称重后，在实验室水泥胶砂搅拌机以上 500 r/min 速率搅拌 10 min，然后在 1 000 r/min 条件下对混合物搅拌 30 min，使其混合均匀。泥浆静置 4 h 后，利用旋转黏度计测试低转速和高转速条件下的泥浆表观黏度。

膨润土泥浆在流动和剪切条件下为流态，静止时为凝胶状，具有可逆性。触变指数反映泥浆在动态剪切和静态恢复过程中结构破坏后的恢复能力，通过 NDJ-1B 型旋转黏度计（上海昌吉地质仪器有限公司）测定泥浆的表观黏度，再按下式计算触变指数（ T_1 ）：

$$T_1 = V_6 / V_{60} \tag{1}$$

式中： V_6 为低转速（6 r/min）下的表观黏度，mPa·s；

V_{60} 为高转速（60 r/min）下的表观黏度，mPa·s。

1.3 摩阻力测试

泥浆混合物经实验室水泥胶砂搅拌机搅拌均匀后，在半圆形槽道中进行摩阻力测试实验。管道模型采用直径 4.6 cm，长度分别为 8、12、15 cm 的混凝土圆柱。分别对混凝土圆柱称重，测量泥浆接触高度，得到混凝土圆柱质量、圆柱与泥浆接触面积、平均应力（表 2）。其中，平均应力介于 2.19~2.22 N/m²，可知 3 个混凝土柱体的应力平均值为 2.21 N/m²，实验误差为 0.91%，表明误差较小，能满足本次实验要求。

表 2 顶管模型参数及接触应力

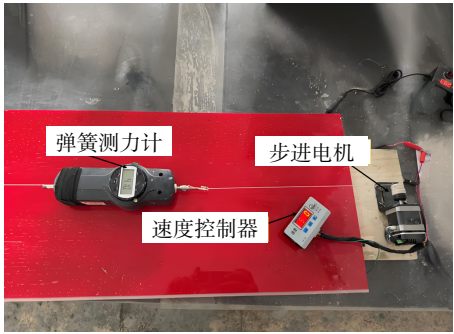
圆柱长度/ cm	圆柱质量/ kg	接触面积/ cm ²	平均应力/ (N·m ⁻²)
8	0.285	57.78	2.22
12	0.425	86.66	2.21
15	0.525	108.33	2.19

实验采用的摩阻力测试装置如图 1 所示，由模型槽、弹簧测力计、拉绳、混凝土圆柱模型（图 1（a））和步进电机（图 1（b））等组成。模型槽为长度 100 cm、直径 5 cm 的半开口式槽道，混凝土圆柱与槽道两侧边壁间的泥浆厚度为 2 mm。实验步骤：（1）布置摩阻力测试装置，利用水平仪校正桌面平整度；（2）采用刻度尺校对拉绳与槽道间距、测力计与步进电机等位置，保持混凝土圆柱、拉绳、电机在同一直线；（3）将制备好的泥浆均匀灌入槽道，逐步调节电机档位和转速，反复测试后获得混凝土圆柱模型由静止状态转为滑动状态的弹簧测

力计读数;(4)每个摩阻力测试工况重复3次以上,取弹簧测力计平均值,最终步进速度范围锁定为10~50 cm/min,测得混凝土模型在滑动状态下的摩阻力。过程中保证数显弹簧测力计量程0~10 N、精度0.01 N,使其满足本实验需求。



(a) 顶管模型及模型槽



(b) 测力计与步进电机

图1 摩阻力测试装置

2 实验结果与讨论

2.1 膨润土、浑水、淤泥占比对泥浆触变指数影响

利用旋转黏度计分别在低转速(6 r/min)和高转速(60 r/min)条件下,对每个实验工况测试3

次以上,取其平均值后,得到A1~A4、B1~B4、C1~C4、D1~D5的表观黏度(表3),其中工况B4与工况C5为同一工况,并由此计算出所有工况下相应的触变指数(T_1)。

清水和甬江浑水条件下的膨润土泥浆触变指数如图2所示。由图可见,A1~A4、B1~B4的触变指数随膨润土质量分数增加表现为先增长后减小,且分别在膨润土质量分数为8%、10%时达到最大值,具有较高的触变性。清水配制的膨润土泥浆在膨润土质量分数6%和12%时(A1、A4),具有较为接近的触变指数,分别为9.27和9.30;然而,浑水制备的膨润土泥浆则随着膨润土含量增加而变化显著,尤其是在膨润土质量分数10%和12%时(B3、B4),触变指数较高,分别为10.26、10.17。触变指数代表了触变泥浆受剪切作用力后的胶结恢复能力,触变指数较高可形成更坚固的凝胶,当长距离管道输送的泵送阻力变小时,触变泥浆的再启动性较差。

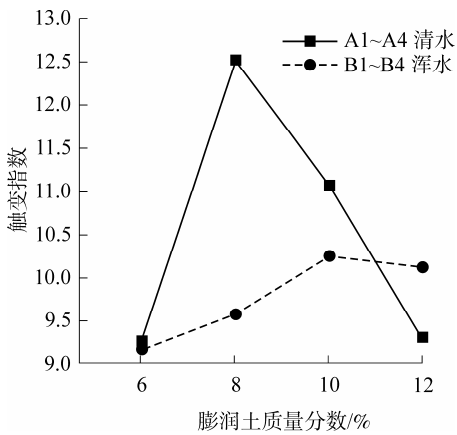


图2 膨润土占比影响的触变指数变化曲线

表3 A1~A4、B1~B4、C1~C4、D1~D5 工况下的表观黏度及触变指数

条件及参数	编号							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
$V_6/(mPa \cdot s)$	621	1 430	2 780	4 800	308	701	1 970	3 570
$V_{60}/(mPa \cdot s)$	67	114	250	516	33.6	73.2	192	351
T_1	9.27	12.54	11.12	9.30	9.17	9.58	10.26	10.17

条件及参数	编号								
	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	D5
$V_6/(mPa \cdot s)$	27.6	523	1 220	1 860	126	1 150	2 450	4 410	5 240
$V_{60}/(mPa \cdot s)$	7.4	56.4	124	181	32	182	358	537	620
T_1	3.73	9.27	9.84	10.28	3.94	6.32	6.84	8.21	8.45

当膨润土泥浆中添加甬江淤泥后，未掺入黄原胶和加入质量分数 0.05%黄原胶的泥浆触变指数如图 3 所示。由图可见，触变指数随淤泥占比增加而逐渐降低，且未添加黄原胶的 C1~C5 介于 3.73~10.28，添加黄原胶的 D1~D5 触变指数介于 3.94~8.45。由于不同地层施工条件下的触变指数要求有一定差异，例如防止地层坍塌时的触变指数一般应不小于 2.00，保证泥浆流动性时的触变指数应不超过 5.00，因此在具体工程施工时，应因地制宜地选择触变指数合适的泥浆作为减阻泥浆。

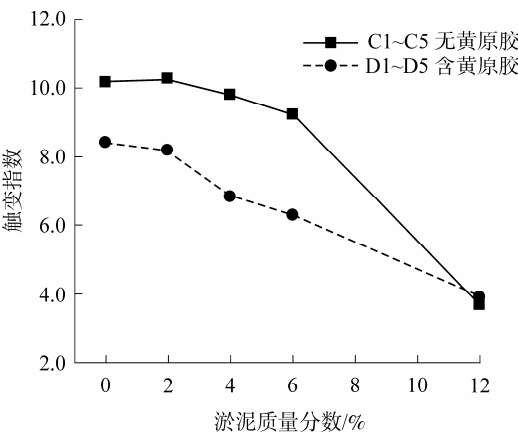


图 3 淤泥占比影响的触变指数变化曲线

2.2 膨润土、浑水、淤泥占比对管道摩阻力影响

利用自制的摩阻力测试装置（图 1），在 3 个混凝土圆柱长度条件下分别测试泥浆配制 A1~A4、B1~B4、C1~C5、D1~D5 的拉力，得到混凝土模型由静止状态转变为滑动状态的平均摩阻力，具体平均摩阻力结果见表 4~表 7。

以表 4 为例，混凝土圆柱长度为 10 cm，膨润土质量分数 6%（A1）、8%（A2）、10%（A3）、12%（A4）时，在摩阻力测试装置上进行实验，分别测试得到弹簧测力计读数。每个实验工况的摩阻力均测试 3 次以上，当存在异常值时，继续重复实验，并根据弹簧测力计读数取平均值。最终得到 A1~A4 条件下的混凝土圆柱平均摩阻力分别为 3.6、3.1、3.3、3.2 N。其他实验工况下，同理得到平均摩阻力的平均值。因此，表 4~表 7 共进行超过 153 次摩阻力测试，得到 51 个摩阻力测试的平均值。根据表 2 中混凝土圆柱与槽道中的泥浆接触面积，结合表 4~7 的平均摩阻力，通过下式计算可得单位面积摩阻力。

表 4 清水配制泥浆下 A1~A4 的平均摩阻力 单位：N

编号	混凝土圆柱		
	10 cm	12 cm	15 cm
A1	3.6	4.2	5.8
A2	3.1	4.1	4.5
A3	3.3	3.6	4.4
A4	3.2	3.5	4.3

表 5 甬江浑水配制泥浆下 B1~B4 的平均摩阻力 单位：N

编号	混凝土圆柱		
	10 cm	12 cm	15 cm
B1	3.5	4.1	5.7
B2	3.1	4.0	4.5
B3	3.4	3.6	4.6
B4	3.2	3.5	4.3

表 6 甬江淤泥配制泥浆下 C1~C5 的平均摩阻力 单位：N

编号	混凝土圆柱		
	10 cm	12 cm	15 cm
C1	3.7	4.6	5.9
C2	3.2	3.8	4.8
C3	3.3	3.8	5.2
C4	3.3	3.9	4.5
C5	3.2	3.5	4.3

表 7 甬江淤泥配制含黄原胶泥浆下 D1~D5 的平均摩阻力 单位：N

编号	混凝土圆柱		
	10 cm	12 cm	15 cm
D1	3.7	4.4	4.8
D2	3.5	4.1	4.5
D3	3.6	4.2	4.8
D4	3.7	4.2	4.7
D5	3.7	4.0	4.4

$$f_k = F / (\pi RL) \tag{2}$$

式中： f_k 为单位面积摩阻力，N/m²； F 为平均摩阻力，N； R 为混凝土圆柱半径，m； L 为圆柱长度，m。此外，动摩阻力测试结果显示，其值略小于静摩阻力，此处不再对其进行分析。

清水、膨润土、CMC、纯碱混合泥浆（A1~A4）的单位面积摩阻力测试结果如图 4 所示，由图中正

方形散点数据可见,单位面积摩阻力随膨润土质量分数的增加呈线性减小趋势。以 f_{k1} 表示 A1~A4 的单位面积摩阻力、 P_B 表示膨润土质量分数,通过数据拟合曲线得到单位面积摩阻力与膨润土质量分数线性公式(3)。甬江浑水、膨润土、纯碱制备的泥浆(B1~B4)的单位面积摩阻力测试结果如图4所示,同理,以 f_{k2} 表示 B1~B4 的单位面积摩阻力,由图中三角形散点数据拟合得到公式(4)。由图中拟合直线及式(3)和式(4)可知,混凝土圆柱模型在甬江浑水制备的泥浆条件下,摩阻力与清水制备泥浆所获得的摩阻力差距很小。根据式(3)和式(4),计算得到泥浆配比工况 A1~A4、B1~B4 的单位面积摩阻力在膨润土质量分数为 6% 时最大,分别为 0.49 kN/m^2 和 0.48 kN/m^2 ,相差仅 2.1%;最小值为膨润土质量分数 12% 时,泥浆配比 A1~A4、B1~B4 具有相同单位面积摩阻力,均为 0.41 kN/m^2 。由此可见,利用甬江浑水制备的膨润土泥浆,其减阻效果与清水制备所得膨润土泥浆相同。

$$f_{k1} = 0.58 - 1.44P_B, 6\% \leq P_B \leq 12\% \quad (3)$$

$$f_{k2} = 0.55 - 1.19P_B, 6\% \leq P_B \leq 12\% \quad (4)$$

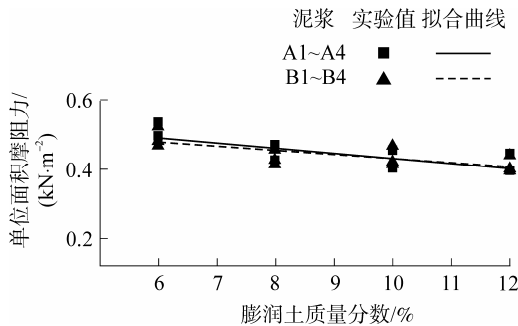


图4 单位面积摩阻力随膨润土占比变化趋势

当采用甬江浑水、纯碱、膨润土、淤泥混合泥浆作为减阻材料时,3种混凝土圆柱长度下测试得到的单位面积摩阻力如图5所示。其中,C1~C5为不含黄原胶增稠剂配制泥浆,D1~D5为添加0.05%黄原胶制备的泥浆,膨润土和淤泥质量分数之和始终保持为12%。以 f_{k3} 、 f_{k4} 分别表示 C1~C5、D1~D5 泥浆测试所得单位面积摩阻力, P_S 表示甬江淤泥质量分数,利用线性拟合得到单位面积摩阻力与淤泥质量分数线性式(5)和式(6)。对于未添加黄原胶作为增稠剂的泥浆 C1~C5,根据拟合公式及图5所示单位面积摩阻力变化规律,淤泥质量分数 $P_S = 0$ 、膨润土质量分数 $P_B = 12\%$ 时,单位面积摩

阻力最小为 0.43 kN/m^2 ;随着淤泥质量分数的增加,单位面积摩阻力缓慢增长;当淤泥质量分数 $P_S = 12\%$ 、膨润土质量分数 $P_B = 0$ 时,单位面积摩阻力增大至最大值 0.46 kN/m^2 ;单位面积摩阻力最大值与最小值相差 0.03 kN/m^2 ,随着淤泥质量分数的减小,相对减小 6.5%。当添加 0.05% 黄原胶时,D1~D5 泥浆的摩阻力测试得到单位面积摩阻力如图5中方形数据所示,随着淤泥质量分数的增加,单位面积摩阻力变化较小。由式(6)可知,单位面积摩阻力最大值和最小值分别为 0.46 kN/m^2 、 0.45 kN/m^2 ,两者相差仅为 2.2%,基本相等。对比 C1~C5 与 D1~D5 可知,当淤泥质量分数 2%~6%、膨润土质量分数 6%~10% 时,黄原胶对泥浆的减阻性能影响较小;在此淤泥质量分数范围内,添加黄原胶后的泥浆单位面积摩阻力最大增长 4.2%。因此,相比于未添加黄原胶泥浆 C1~C5 测试得到的单位摩阻力,黄原胶的添加对淤泥制备的泥浆摩阻性能影响显著,添加黄原胶后的泥浆大大提高了减阻效果的稳定性。

$$f_{k3} = 0.43 + 0.23P_S, 0 \leq P_S \leq 12\% \quad (5)$$

$$f_{k4} = 0.46 - 0.058P_S, 0 \leq P_S \leq 12\% \quad (6)$$

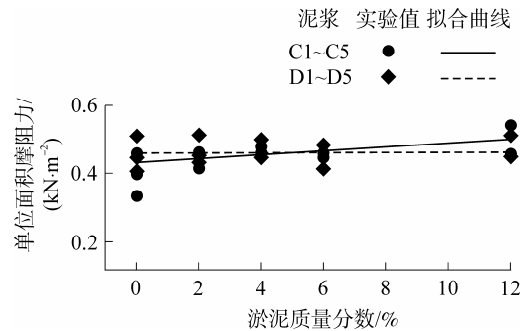


图5 单位面积摩阻力随淤泥质量分数的变化趋势

3 结论

通过室内正交实验,对甬江浑水和淤泥用于城市地下顶管工程中的减阻泥浆配制进行研究。利用旋转黏度计测试泥浆的表观黏度,采用自制管道模型的摩阻力实验装置测试不同配比泥浆的摩擦阻力,分析膨润土、甬江浑水、淤泥的质量分数以及黄原胶对泥浆触变指数和单位面积平均摩阻力的影响。

(1) 清水配制泥浆在膨润土质量分数 8% 时,泥浆触变指数达到最高值(12.54),而浑水配置的

泥浆在膨润土质量分数 10%~12%时,泥浆触变指数更高,表明浑水能增强高膨润土泥浆的触变性。甬江淤泥混合膨润土制备的泥浆会降低触变指数,但添加 0.05%黄原胶可在一定淤泥质量分数范围内进行改性,提高并恢复泥浆的触变指数。

(2) 管道模型受到的单位面积摩阻力随膨润土质量分数增加呈现线性降低趋势,浑水配制的膨润土泥浆单位面积摩阻力与清水配制的膨润土泥浆差异仅为 2.1%,表明其在实际工程中具有几乎等效的减阻性能,可应用于地下顶管工程中的减阻泥浆制备,为节约淡水资源提供技术支持。

(3) 添加 0.05%黄原胶可显著提升含淤泥膨润土泥浆的表观黏度和稳定性,当淤泥占比 6%时,泥浆性能满足触变指数和减阻要求。黄原胶的加入有效降低了淤泥质量分数变化对摩阻力的影响,使泥浆性能在不同工况下保持稳定,为河道淤泥的资源化利用提供了新途径。

参考文献:

- [1] STERLING R L. Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling[J]. *Underground space*, 2020, 5(1):1-19.
- [2] 马鹏, 岛田英树, 马保松, 等. 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(10):1677-1692.
- [3] 王旭, 李超, 刘宇, 等. 长距离岩石顶管泥浆配比优化及减摩效果分析[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(3):1235-1244.
- [4] CHOO C S, ONG D E L. Assessment of non-linear rock strength parameters for the estimation of pipe-jacking forces. Part 2. numerical modeling[J]. *Engineering geology*, 2020, 265(2020):1-10.
- [5] NAMLI M, GULER E. Effect of bentonite slurry pressure on interface friction of pipe jacking[J]. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, 2017, 8(2):1-9.
- [6] FENG X, ZHANG Y, YUAN X, et al. An experimental study on frictional properties of concrete pipe-soil interface[J]. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, 2022, 13(2):1-12.
- [7] 罗如平, 胡茗鹭秋, 朱碧堂, 等. 泥浆含砂量及静置时间的顶管摩阻力模型试验[J]. *华东交通大学学报*, 2023, 40(6):8-16.
- [8] 高增奎, 张睿钦, 王先甲, 等. 膨润土种类及黄原胶含量对减阻泥浆性能的影响[J]. *土木工程与管理学报*, 2024, 41(1):19-24.
- [9] XU T, ZHOU W H, BEZUIJEN A, et al. Effects of sand and slurry characteristics on pressure infiltration of bentonite slurry into sand[J]. *Géotechnique*, 2024, 74(9):935-946.
- [10] 雷华阳, 刘旭, 施福硕, 等. 顶管工程聚合物改性膨润土泥浆配比优化研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊2):51-55.
- [11] 张雪, 万中正, 王传银, 等. 无水砂层中矩形顶管施工用触变泥浆配比优化及减阻性能试验[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5):1611-1620.
- [12] 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, 11(1):106-111.
- [13] 严文武. 宁波三江河道水沙特性及冲淤变化规律[J]. *水利水运工程学报*, 2011(4):143-148.
- [14] 刘延年. 建筑结构胶粘剂黏度及触变性试验分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2008, 34(6):77-81.

(责任编辑 章践立)