

地铁车站出入口工程顶管法施工泥浆 被污水渗入后的性能分析

张 锐¹ 申 政² 李少平³ 李国宾¹ 唐 莹¹ 王 栋² 闵凡路²

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 250013, 济南; 2. 河海大学土木与交通学院, 210024, 南京;

3. 中铁二十一局集团轨道交通工程有限公司, 250117, 济南)

摘 要 [目的] 顶管法施工容易造成施工区域内老化的污水管破裂, 进而导致污水沿土体渗入触变泥浆内, 对触变泥浆的性能造成一定的影响。为确保施工安全, 需研究污水渗入触变泥浆后的性能指标变化规律。[方法] 以济南市轨道交通 2 号线宝华街站 1 号出入口工程为例, 结合该站出入口因顶管下穿导致污水管破裂的施工工况, 研究了污水渗入后触变泥浆的性能指标变化规律, 并通过减阻试验分析了污水渗入对触变泥浆减阻效果的影响。[结果及结论] 污水渗入后, 触变泥浆性能发生了劣化, 泥浆的漏斗黏度减小, 析水率及失水量大幅增加。污水中无机盐的正电荷与泥浆土颗粒的负电荷相互吸引, 导致泥浆 Zeta 电位从稳定的 31.0 mV 降至 20.0 mV 以下。污水渗入导致大粒径土颗粒质量分数明显增加, 泥浆发生团聚沉淀现象, 这是泥浆析水率大幅增加的原因。污水渗入还导致泥浆的减阻效果降低, 摩擦因数及顶管顶推力增加。

关键词 地铁车站; 顶管法施工; 触变泥浆; 污水渗漏; 泥浆性能; 泥浆减阻效果

中图分类号 U455.47; U231.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.09.024

Performance Analysis of Slurry After Sewage Infiltration in Pipe Jacking Construction of Subway Station Entrances and Exits Project

ZHANG Kun¹, SHEN Zheng², LI Shaoping³, LI Guobin¹, TANG Ying¹, WANG Dong², MIN Fanlu²

(1. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., 250013, Jinan, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, 210024, Nanjing, China; 3. China Railway 21st Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., 250117, Jinan, China)

Abstract [Objective] During pipe jacking construction, aging sewage pipes within the construction area are prone to rupture, leading to sewage infiltration into the thixotropic slurry along the soil body, thus impacting the performance of the thixotropic slurry to some extent. In order to ensure the construction safety, it is necessary to study the change law of per-

formance indicator after sewage infiltration of the thixotropic slurry. [Method] Using the No. 1 entrance and exit project of Baohua Street Station on Jinan Rail Transit Line 2 as a case study, combined with the construction conditions of the sewage pipe rupture due to the jacking pipe underpass at the entrance and exit of the station, the change law of the thixotropic slurry performance indicators after sewage infiltration is studied, and the sewage infiltration impact on the drag reduction effect of thixotropic slurry is analyzed by drag reduction test. [Result & Conclusion] After sewage infiltration, the performance of the thixotropic slurry deteriorates, with a reduction in slurry funnel viscosity and a significant increase in water separation rate and water loss. The positive charges of inorganic salts in the sewage and the negative charges of the slurry soil particles attract each other, causing the slurry Zeta potential dropping from a stable 31.0 mV to below 20.0 mV. Sewage infiltration results in a noticeable increase in the mass fraction of large-size soil particles, and aggregation and precipitation of the slurry, this is the reason for the significant increase in slurry water separation rate. Sewage infiltration also leads to the decrease in the slurry drag reduction effect, with an increase in the friction factor and pipe jacking thrust.

Key words subway station; pipe jacking construction; thixotropic slurry; sewage leakage; slurry performance; slurry drag reduction effect

在对沉降控制要求严格的工程中(如地铁隧道、车站出入口等), 顶管法的应用越来越广泛。采用顶管法施工时, 有时需要下穿老化、破损管线。由于顶管法施工不可避免地引起周围土体扰动, 易造成老化的污水管破裂, 进而导致污水沿土体渗入触变泥浆内, 对触变泥浆性能造成一定的影响。

当前关于顶管触变泥浆配制及减少阻力(以下简称“减阻”)技术的研究多集中于采用不同添加剂来改善触变泥浆性能, 且侧重于对粉细砂、砂土地

层的研究。文献[1]在粗砂、砾砂地层中,以膨润土、纯碱、PAC(聚合氯化铝)等进行了触变泥浆配制正交试验,得出膨润土、PAC的质量浓度对泥浆黏度影响最明显的结论。文献[2]研究了粉质砂土、砂土地层下膨润土、CMC(羧甲基纤维素钠)、纯碱和PAM(聚丙烯酰胺)4种材料对于触变泥浆性能的影响。文献[3]发现,随着膨润土质量浓度的增加,触变泥浆漏斗黏度增大,析水率和失水量减小。文献[4]重点分析了触变泥浆流变性、失水造壁性及润滑性等的变化规律。文献[5]对触变泥浆的失水量、密度、漏斗黏度等参数进行了研究。文献[6]研究了PAM和石墨粉等的质量浓度对泥浆性能的影响,得到了泥浆的最优配比。文献[7]通过设计摩阻力试验,研究了粉土、粉砂2种土层中触变泥浆对摩阻力的影响,并通过调整膨润土泥浆的成分,对触变泥浆的配比进行了优化。

但既有研究中,针对顶管工程在风化闪长岩地层中触变泥浆的减阻特性,以及污水渗入对触变泥浆性能的影响等方面的研究较少。本文以济南市轨道交通2号线宝华街站1号出入口工程为例,结合该站出入口因顶管下穿导致污水管破裂的施工工况,研究污水渗入后触变泥浆的性能指标变化规律,并通过减阻试验研究了污水渗入对泥浆减阻效果的影响。

1 工程概况

宝华街站1号出入口工程采用矩形顶管施工。矩形顶管机的尺寸为5.30 m(长)×6.92 m(宽)×4.92 m(高),管节外包尺寸为1.50 m(长)×6.90 m(宽)×4.90 m(高),管节厚度为0.45 m,管节横断面净空尺寸为6.00 m(长)×4.00 m(宽)。管节为整环结构,质量约为40 t,采用强度为C50的混凝土预制,抗渗等级为P10。

该工程穿越风化闪长岩地层,并下穿污水管等重要管线。车站的覆土厚度约为6.0 m,过街通道长度为32 m。由于污水管邻近始发井且管体陈旧,受邻近施工干扰较为严重,导致污水管管节间发生错动,污水沿管节接口处流出并渗入地层。污水管的埋深为2.1 m,直径为600 mm,管体为塑料材质,管线接口方式为承插式,接口处的材质为混凝土。污水沿着泥浆套和顶管之间的缝隙,将泥浆套挤入始发井。与此同时,螺旋排土器排出的土体被发现有污水渗入,即污水已沿泥浆套向后进入了始发

井,向前进入了压力舱,进而导致顶管顶进时所需的顶推力大幅增加,顶进施工困难。现场始发井污水渗漏情况如图1所示。



图1 现场始发井污水渗漏情况

Fig. 1 Sewage leakage of the on-site starting well

2 污水渗入对泥浆性能的影响

触变泥浆主要是由膨润土、水、添加剂拌合而成。触变泥浆在管节与土体中形成高膨胀、低渗透、封闭的泥浆套,在顶管施工中起到润滑及填补支撑的作用^[8]。现场采用的触变泥浆主要由膨润土和水组成,其质量比为1:12。对工程现场泄漏的污水进行取样,得到泄漏污水部分成分质量浓度的检测值,其结果如表1所示。

表1 泄漏污水部分成分质量浓度检测值

Tab.1 Mass concentration dection values of some components from leaked sewage

成分	质量浓度/(mg/L)
Na ⁺	51.20
SO ₄ ²⁻	4.50
Cl ⁻	75.70
K ⁺	16.20
Mg ²⁺	10.20
Fe	2.41
Cu	0.11
NH ₄ ⁺	36.20

由表1可知:污水中质量浓度相对较高的离子为Cl⁻、Na⁺、NH₄⁺,其他离子的质量浓度较小,因此选取代表污水渗入的氯化铵、氯化钠作为研究对象,对氯化铵、氯化钠取不同质量浓度时的触变泥浆性能指标进行研究。

2.1 试验材料和性能测试方法

根据地质勘查资料,风化闪长岩地层的渗透系

数为 $6.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 黏聚力为 20 kPa, 内摩擦角为 22° 。试验用的膨润土采用现场实际使用的膨润土, 其黏粒的质量分数为 8%。氯化铵、氯化钠均选取 5 个质量分数 (0%、0.01%、0.10%、0.25% 及 0.50%) 进行测试分析, 其中, 质量分数为添加的氯化铵或氯化钠质量与添加的膨润土质量之比。

测试的性能指标主要有密度、马氏漏斗黏度、失水量、析水率及 pH 值, 分别采用 1002 型泥浆比重秤、马氏漏斗黏度计、量筒、中压滤失仪、pH 计对上述指标进行测定。针对污水渗入引起析水率明显变化的现象, 增加泥浆颗粒级配、泥浆 Zeta 电位 ζ 2 个指标, 并分别采用 MS2000 型激光粒度分析仪、Zeta 电位仪对这 2 个指标进行测定。

2.2 污水渗入对泥浆基本性能的影响

按照 1:12 的膨水比 (膨化土与水的质量比) 配制泥浆后, 采用搅拌装置 (转速取 1 000 r/min) 充分搅拌泥浆 30 min, 随后将泥浆密封静置 24 h, 使膨润土充分膨化。为模拟污水渗入对泥浆基本性能的影响, 往泥浆中分别掺入不同质量分数的氯化铵、氯化钠, 测定氯化铵、氯化钠在 5 种质量分数下泥浆的各项性能指标, 其试验结果如表 2、表 3 所示。

表 2 5 种质量分数下氯化铵渗入对泥浆性能的影响

Tab.2 Effect of ammonium chloride infiltration on slurry properties at five mass fraction

膨水比	质量 分数/%	密度/ (g/cm^3)	马氏漏 斗黏度/s	失水量/ mL	析水 率/%	pH 值
1:12	0	1.05	73	14.1	0	9.42
1:12	0.01	1.05	76	15.2	0.5	9.38
1:12	0.10	1.05	68	22.8	2.0	9.30
1:12	0.25	1.05	48	285.0	28.5	9.27
1:12	0.50	1.05	37	570.6	57.0	9.28

表 3 5 种质量分数下氯化钠渗入对泥浆性能的影响

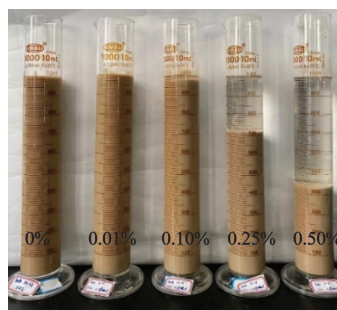
Tab.3 Effect of sodium chloride infiltration on slurry properties at five mass fraction

膨水比	质量 分数/%	密度/ (g/cm^3)	马氏漏 斗黏度/s	失水量/ mL	析水 率/%	pH 值
1:12	0	1.05	73	14.1	0	9.42
1:12	0.01	1.05	76	15.6	0	9.42
1:12	0.10	1.05	81	21.9	1.0	9.44
1:12	0.25	1.05	53	173.2	17.3	9.42
1:12	0.50	1.05	40	262.3	26.2	9.39

由表 2、表 3 可知:①随着氯化铵或氯化钠质量

分数的增加, 触变泥浆的 pH 值与密度变化较小, 漏斗黏度大致呈下降趋势, 失水量逐渐增加, 这表明污水中的无机盐与泥浆混合后, 触变泥浆的性能有所劣化。②当氯化铵质量分数增加到 0.25% 时, 触变泥浆的析水率出现了明显变化, 从 2.0% 增至 28.5%; 当氯化铵的质量分数增加到 0.50% 时, 其析水率达到了 57.0%。③当氯化钠的质量分数增加到 0.25% 时, 触变泥浆的析水率也出现了明显的变化, 从 1.0% 增至 17.3%; 当氯化钠的质量分数增加到 0.50% 时, 其析水率达到了 26.2%。

图 2 为氯化铵渗入后各析水率下的泥浆实物图。总体来看, 当污水中的无机盐质量分数较低时, 污水渗入主要导致泥浆产生物理稀释作用, 析水率等指标的变化相对较小。当污水中无机盐质量分数较高时, 除了稀释作用外, 污水渗入还会导致触变泥浆自身性质发生变化, 表现为马氏漏斗黏度的降低、析水率的增加及失水量的增加, 其中, 析水率的增加使得泥浆失去稳定性。



注: 图内数字均为泥浆析水率。

图 2 氯化铵渗入后各析水率下的泥浆实物图

Fig.2 Physical pictures of slurry at different water separation rates after ammonium chloride infiltration

表 2、表 3 的试验结果表明, 污水中无机盐渗入触变泥浆后, 对泥浆析水率的影响较大, 因此需要进一步研究泥浆的析水率指标。将质量分数为 0.01%、0.10%、0.25%、0.50% 的氯化铵与膨水比为 1:12 的泥浆混合膨化后分别标记为 SL2、SL3、SL4、SL5, 将试验得到的结果与纯膨润土泥浆 SL1 (膨水比为 1:12) 进行析水率对比。此外, 将质量分数为 0.01%、0.10%、0.25%、0.50% 的氯化钠与膨水比 1:12 的泥浆混合膨化后分别标记为 SL6、SL7、SL8、SL9, 将试验得到的结果与纯膨润土泥浆 SL1 (膨水比 1:12) 进行析水率对比。

将各种试验材料进行 24 h 的析水率分析, 得到各种试验材料吸水率随时间的发展曲线, 如图 3

所示。

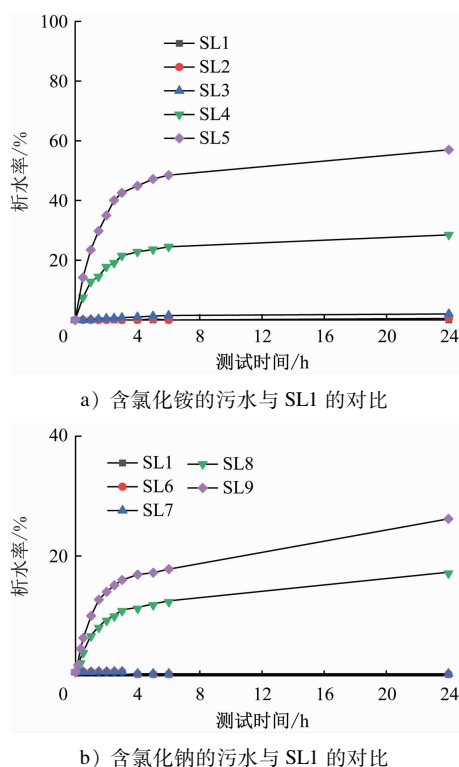


图3 9种试验材料析水率随时间的发展曲线

Fig. 3 Development curves of water separation rate over time for 9 test materials

由图3可知:当氯化铵或氯化钠质量分数较大(达到0.25%及以上)的污水与触变泥浆混合后,在测试的0~6 h内泥浆的析水率变化较快(约占24 h内总析水率的80%),随后析水率的变化较为平缓。

2.3 污水对泥浆微观性质的影响

进一步开展触变泥浆颗粒粒径的分析及泥浆Zeta电位 ζ 的测定。图4为各种试验材料颗粒粒径随无机盐质量分数的变化曲线,其中:试验材料SL1、SL3、SL4、SL5的颗粒粒径测定结果如图4 a)所示;试验材料SL1、SL7、SL8、SL9的颗粒粒径测定结果如图4 b)所示。

由图4可知:由于氯化铵、氯化钠的渗入,触变泥浆中大粒径土颗粒的质量分数明显增加。泥浆在100~1 000 μm 粒径范围内出现了小型的波峰,且远高于SL1相应区段的粒径分布曲线;在10 μm 粒径附近,泥浆的土颗粒质量分数开始快速减小。这表明由于无机盐的渗入,泥浆中土颗粒出现了团聚,泥浆更易产生沉淀,且质量分数越高,沉淀越多。

ζ 是颗粒上净电荷的间接度量指标,可用于反映泥浆颗粒间排斥或吸引的能力,进而判断泥浆的

稳定性。 ζ 的绝对值越大,泥浆稳定性越好。图5为泥浆的Zeta电位值 ζ 随无机盐质量分数的变化曲线。

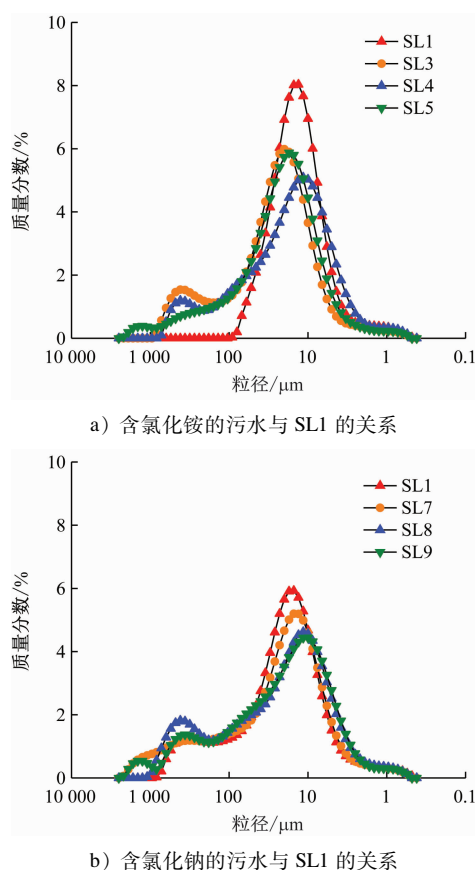


图4 各种试验材料颗粒粒径随无机盐质量分数的变化曲线

Fig. 4 Particle size variation curves of various test materials with inorganic salt mass fraction

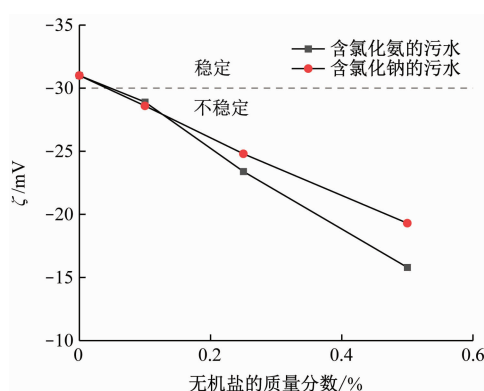


图5 泥浆的Zeta电位值随无机盐质量分数的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of slurry Zeta potential value with inorganic salt mass fraction

由图5可知:氯化铵、氯化钠渗入泥浆后, ζ 的绝对值呈降低趋势。 $\zeta > 30.0$ mV 时,泥浆稳定性较好,不易出现析水等现象。试验中SL1的 $\zeta = 31.0$

mV, 泥浆体系较为均匀稳定。污水无机盐渗入的泥浆, 其 $\zeta < 30.0$ mV, 且随着无机盐质量分数的增加, ζ 的绝对值逐渐减少。当无机盐质量分数为 0.10% 时, ζ 降幅不大, 基本位于性能稳定、不稳定的分界线附近。当无机盐质量分数为 0.50% 时, 掺入氯化铵的泥浆的 ζ 绝对值降至 15.8 mV, 掺入氯化钠的泥浆的 ζ 绝对值降至 19.3 mV。

根据试验结果, 无机盐中的阳离子与泥浆土颗粒所带的负电荷相互吸引, 使得土颗粒所带的电荷量降低, 导致相邻土颗粒间的排斥作用减小、吸引作用增加, 土颗粒相互吸引聚集, 进而导致触变泥浆出现析水及沉淀现象, 无法形成稳定的分散体系。 ζ 的试验结果解释了污水中无机盐渗入泥浆后析水率增加的原因。

3 污水渗入对泥浆减阻效果的影响

3.1 减阻试验装置与试验方法

本文采用自主设计的试验装置进行触变泥浆减阻试验, 试验主要测定水泥板与土体接触界面的摩擦阻力。泥浆减阻试验装置主要由托盘、水泥板、弹簧拉力计、软绳等组成, 如图 6 所示。

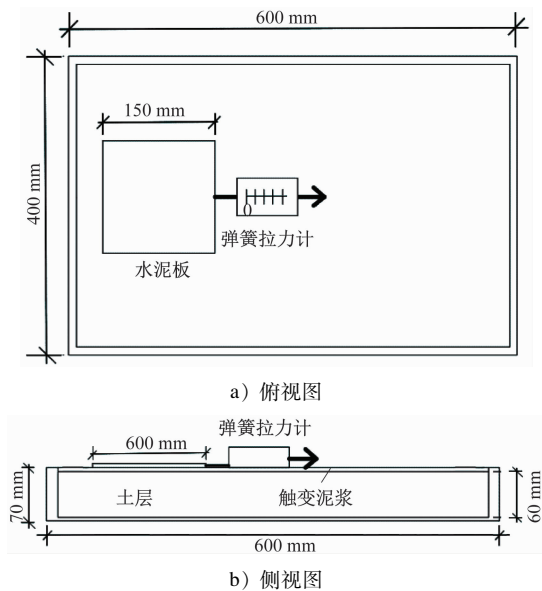


图 6 泥浆减阻试验装置图

Fig. 6 Diagram of slurry drag reduction test apparatus

试验开始前, 在托盘中装入重新配制的高度为 6 cm 的风化闪长岩 (已烘干), 将闪长岩用小锤紧密压实, 确保土体表面水平。将水泥板与弹簧拉力计连接, 缓慢匀速拉动弹簧拉力计, 读取弹簧拉力计示数, 在被拉动水泥板上分别添加 1 块、2 块、3 块

水泥板, 多次测量读取弹簧拉力计的示数。最后绘制出弹簧拉力与水泥板质量的关系曲线, 二者的斜率即为水泥板与风化闪长岩的摩擦因数。

在上述试验的基础上, 在土层上平铺 5 mm 厚的不同质量比的泥浆, 开展触变泥浆的减阻试验。试验过程与上述试验相同。最后绘制出不同质量配比泥浆的拉力与水泥板质量关系曲线, 进而求得水泥板与泥浆之间的摩擦因数。

3.2 污水渗入对泥浆减阻效果的影响规律

对被含有氯化铵、氯化钠的污水渗入后的触变泥浆开展减阻试验, 地层采用风化闪长岩。通过绘制不同荷载情况下水泥板的拉力-质量曲线, 对曲线斜率进行拟合计算, 可以得到各种试验材料平均摩擦因数与风化闪长岩平均摩擦因数的对比情况, 如图 7 所示。其中, 图 7 a) 为试验材料 SL1、SL2、SL3、SL4、SL5 与风化闪长岩的摩擦因数对比; 图 7 b) 为试验材料 SL1、SL6、SL7、SL8、SL9 与风化闪长岩的摩擦因数对比。

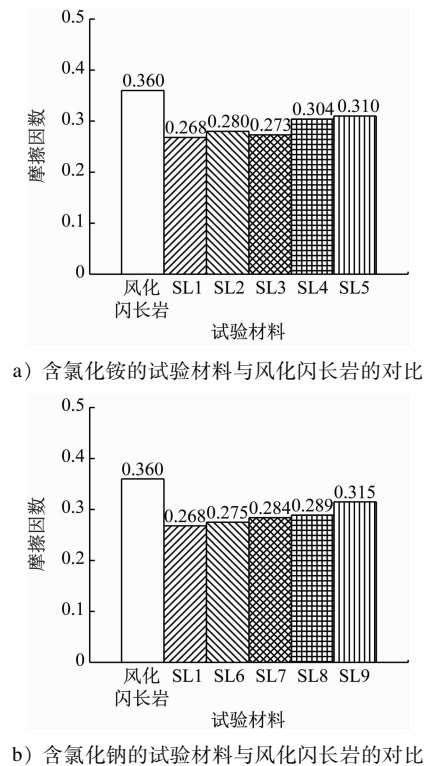


图 7 各种试验材料摩擦因数与风化闪长岩摩擦因数的对比

Fig. 7 Comparison of the friction factor between various test materials and weathered diorite

由图 7 可知, 与风化闪长岩的摩擦因数相比: ①污水中氯化铵的质量分数为 0.01%、0.10% 时, 水

泥板与泥浆间的摩擦因数分别增加了 4.50%、2.00%；氯化铵质量分数为 0.25%、0.50% 时，水泥板与泥浆间的摩擦因数分别增加了 13.40%、15.70%；②污水中氯化钠的质量分数为 0.01%、0.10% 时，水泥板与泥浆间的摩擦因数分别增加了 2.60%、6.00%；氯化钠质量分数为 0.25%、0.50% 时，水泥板与泥浆间的摩擦因数分别增加了 7.80%、17.50%。

由此可认为，当无机盐质量分数较小时，渗入了氯化铵和氯化钠的泥浆摩擦因数增幅不大。当无机盐质量分数较大时，渗入了氯化铵的泥浆摩擦因数相对增幅较大，渗入了氯化钠的泥浆摩擦因数增幅相对较为平稳。

与纯膨润土泥浆的减阻摩擦因数相比，污水中的无机盐渗入泥浆后，水泥板与触变泥浆的摩擦因数增加。摩擦因数的增幅与无机盐的质量分数呈正相关，这表明无机盐的渗入降低了触变泥浆的减阻效果。

4 现场顶推力计算验证

顶管工程顶进的摩阻力主要由 2 个部分组成：工作面的迎面阻力、管道四周外壁与土体摩擦产生的摩擦阻力。顶管工程的顶推力主要由油缸提供，施工现场的顶推系统如图 8 所示。通过油缸作用在 U 形顶铁上，U 形顶铁与混凝土管节相连，因此，顶推力可以作用在顶管机及管节上。



图 8 施工现场的顶推系统

Fig. 8 Jacking system at the construction site

顶管的顶推力计算式为：

$$F = F_0 + f_0 L \quad (1)$$

$$F_0 = S(p_0 + p_w) \quad (2)$$

$$p_0 = K_0 \gamma (H + 2H_1/3) \quad (3)$$

$$f_0 = f_R + G\mu \quad (4)$$

式中：

F ——顶管的顶推力；

F_0 ——顶管的初始推力；

f_0 ——单位长度(1 m)内管节与土层之间的综合摩擦阻力；

L ——管节的总长度；

S ——顶管机头的截面积；

p_0 ——机头底部以上 1/3 高度处的静止土压力；

p_w ——地下水压力；

K_0 ——静止土压力系数，砂性土中取 0.25 ~ 0.33，黏土中取 0.33 ~ 0.70；

γ ——土的重度；

H ——顶管的覆土层厚度；

H_1 ——顶管机高度；

f_R ——管节与土层之间的平均摩擦阻力；

G ——单位长度(1 m)内管节的重力；

μ ——管节在土中的摩擦因数。

代入案例工程实际数据后，得到无污水渗入时的顶推力为 1.53×10^4 kN。经过现场调研，地铁车站出入口贯通时顶管机的实际顶推力为 1.42×10^4 kN，这表明式(1)一式(4)具有有效性。代入污水渗入后的摩擦因数，可得到顶推力为 1.58×10^4 kN，即：与无污水渗入相比，污水渗入后顶管的顶推力增幅约为 11.3%。

5 结语

1) 顶管法施工过程中，污水渗入触变泥浆后，泥浆的马氏漏斗黏度呈下降趋势，泥浆的析水率、失水量大幅增加，这表明污水中的无机盐与泥浆混合后，触变泥浆的性能有所劣化。

2) 污水渗入触变泥浆后，污水中无机盐的正电荷与泥浆土颗粒的负电荷相互吸引，导致泥浆的 Zeta 电位 ζ 从稳定的 31.0 mV 降至 20.0 mV 以下，土颗粒之间的排斥作用有所减少。

3) 污水渗入导致大粒径土颗粒的质量分数明显增加，10 μm 左右粒径的土颗粒质量分数减小，100 ~ 1 000 μm 粒径区段的质量分数出现小型的波峰，即泥浆发生了团聚沉淀现象。这也是泥浆析水率大幅增加的原因。

3) 污水中的无机盐与泥浆混合后，泥浆的减阻效果有所下降。泥浆摩擦因数的增加量与无机盐的质量分数呈正相关。此外，污水渗入后引起顶管

顶推力增加,其增幅约为 11.3%。

参考文献

- [1] 王福芝,曾聪,孔耀祖. 大直径长距离顶管润滑泥浆方案研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 49.
WANG Fuzhi, ZENG Cong, KONG Yaozu. Mud scheme for a large diameter and long distance pipe jacking project[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 49.
- [2] 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, 53(6): 182.
WANG Mingsheng, LIU Dagang. Test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182.
- [3] 袁为岭,荣亮,杨红军. 原材料含量对顶管施工触变泥浆性能的影响[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 683.
YUAN Weiling, RONG Liang, YANG Hongjun. Influence of raw materials content on performance of thixotropic slurry used in pipe jacking[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(6): 683.
- [4] 王李昌,赵跃奇,隆威,等. 大直径顶管穿越沙漠深部护壁浆液体系研究与应用[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 163.
WANG Lichang, ZHAO Yueqi, LONG Wei, et al. Research on the wall protection slurry system of large diameter pipe jacking across deep desert and its application[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 163.
- [5] 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, 36(2): 186.

- LUO Yunfeng. Research and application of drag reduction mud to long-distance and large diameter concrete pipe-jacking[J]. Building Construction, 2014, 36(2): 186.
- [6] 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.
WANG Chunting, LONG Wei. Experimental study on the slurry formulation used for the large diameter long distance pipe-jacking project[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1): 106.
- [7] 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.
ZHANG Yunjie. The analysis on the surrounding soil deformation by propulsion of closely spaced parallel pipes with large diameter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [8] 喻军,李元海. 顶管泥浆套的物理性质对顶推力的影响[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 327.
YU Jun, LI Yuanhai. Influence of physical properties of pipe jacking mud sleeve on jacking force[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 327.

· 收稿日期:2022-05-07 修回日期:2022-09-19 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-07 Revised:2022-09-19 Published:2024-09-10
· 第一作者:张锐,高级工程师,279625702@qq.com
通信作者:申政,硕士研究生,1060509522@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 131 页)

的变形控制标准进行深入分析,以期为不同地质条件下基坑变形控制值的优化提供数据支撑。

参考文献

- [1] 吴锋波,金淮,张建全,等. 轨道交通基坑工程变形监测控制指标[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(6): 78.
WU Fengbo, JIN Huai, ZHANG Jianquan, et al. Deformation monitoring controlled indexes of urban rail transit foundation pit engineering[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(6): 78.
- [2] 金淮,张建全,吴锋波,等. 城市轨道交通工程变形统计分析与控制指标[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(3): 65.
JIN Huai, ZHANG Jianquan, WU Fengbo, et al. Engineering deformation statistical analysis and control index in urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(3): 65.

- [3] 张建全,姚爱敏,闫宇蕾. 基于监测大数据的地表沉降控制值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1646.
ZHANG Jianquan, YAO Aimin, YAN Yulei. Analysis of surface subsidence control value based on monitoring big data [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1646.

· 收稿日期:2023-07-03 修回日期:2023-11-08 出版日期:2024-09-10
Received:2023-07-03 Revised:2023-11-08 Published:2024-09-10
· 第一作者:孙长军,正高级工程师,2421394502@qq.com
通信作者:闫海生,高级工程师,172404530@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license