

顶管隧道膨润土泥浆对地层扰动影响的离心机实验研究^{*}

刘 剑¹⁾ 邹宇翔¹⁾ 马险峰^{2)†} 李向红²⁾ 陈 伟²⁾

(1)中亿丰建设集团股份有限公司, 215000, 江苏苏州; (2)同济大学土木工程学院, 200092, 上海)

摘要 为了探究顶管隧道膨润土泥浆的减阻机制及其性能对地层扰动的影响规律, 结合地层和膨润土泥浆的特点, 对顶管隧道施工过程中摩擦阻力和地层沉降的产生机制进行了理论分析; 采用岩土离心模型实验手段对该机制进行了验证; 自主研发了适用于离心模型实验的顶管注浆模拟系统, 可以采用不同的泥浆材料与配合比等进行实验研究. 通过对实验结果与“减阻泥浆套”现象分析, 总结了泥浆黏度、失水量等对地层扰动的影响规律. 这些成果在今后类似的工程中具有极好的参考价值.

关键词 顶管工程; 泥浆性能; 黏度; 失水量; 岩土离心机实验; 注浆模拟系统

中图分类号 TU93+1; TU990.3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021127

0 引言

顶管隧道施工所用的膨润土泥浆, 是一种由膨润土(多为钠膨润土)、水以及少量高分子添加剂充分水合后所形成的混合物. 钠膨润土的成分以钠蒙脱石为主, 其质量分数为 70%~90%^[1]. 钠蒙脱石在矿物学中属于高活动性黏土, 水分子经渗透进入水合钠离子的颗粒中间层后, 会引起溶胀并最终分层. 膨润土的体积在水中会膨胀至 10 倍或更多倍^[2]. 膨润土悬浮液具有高度的触变性, 在固体中的质量分数为 1%~3%, 即便在质量分数非常低的情况下仍具有很高的黏度和屈服应力^[3-4], 是一种假塑性(非牛顿)流体. 膨润土泥浆有很多流变参数, 而对顶管隧道工程注浆性能影响最大的是黏度和失水率, 二者受土壤类型、粒度分布、矿物学、固体密度、盐度、pH、温度以及剪切速率历史^[5]等因素影响.

尽管目前已有更多关于泥浆流变性质的研究, 但研究对象大多是防放射物的防渗墙泥浆、钻井液、泥石流等, 而顶管隧道施工过程中泥浆参数对地层扰动的研究较少, 且多为施工参数和机制方面, 如: 注浆压力对摩擦阻力的影响^[4], 顶管注浆减阻机制^[6], 注浆压力对地层沉降的影响^[7], 浆液渗透机制^[8], 等. 本文综合运用泥浆流变性质、顶管隧道施工所产生的扰动机制等研究成果, 采用最新的离心模型实验技术, 利

用最接近现场工况的方法, 研究泥浆的黏度、失水率、注浆量、注浆压力等对地层扰动的影响; 通过系统的顶管隧道注浆分析研究, 为顶管隧道施工泥浆的配制、注浆参数的设计等提供理论和实验依据.

1 理论分析

1.1 顶管隧道形态和摩擦阻力分析 顶管隧道顶进时的摩擦阻力, 主要有开挖面阻力、开挖机与土层之间的摩擦力、顶管隧道与土层之间的摩擦力等. 开挖面阻力和开挖机与土层之间摩擦力在顶进短距离时占比很大, 但随着顶进距离的增加, 逐渐趋于稳定; 相对而言, 顶管隧道与土层之间的摩擦力会越来越小, 因此减小顶管隧道与土层之间的摩擦阻力是减小摩擦阻力、增加顶进距离、减小扰动等研究的重点. 注浆减阻的原理是在顶管隧道的四周形成一个泥浆套, 使顶管隧道与土层不直接接触, 即避免混凝土与土层的直接摩擦, 从而减小摩擦阻力. 因为管片的尺寸比顶管机外径要小, 开挖时会产生超挖区, 同步注浆将这些超挖区填满, 以防止上方土层塌陷. 由于顶管顶进时注浆压力造成的土层移位、浆液不均匀、施工外力等复杂因素, 根据阻力类型, 顶管隧道主要包括无注浆、管片沉底(浮起)、管片悬浮、管片偏移 4 种形态(图 1).

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41272290)

[†] 通信作者: 马险峰(1972—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 地下结构抗震, 岩土离心模型实验. E-mail: xf.ma@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021-04-30

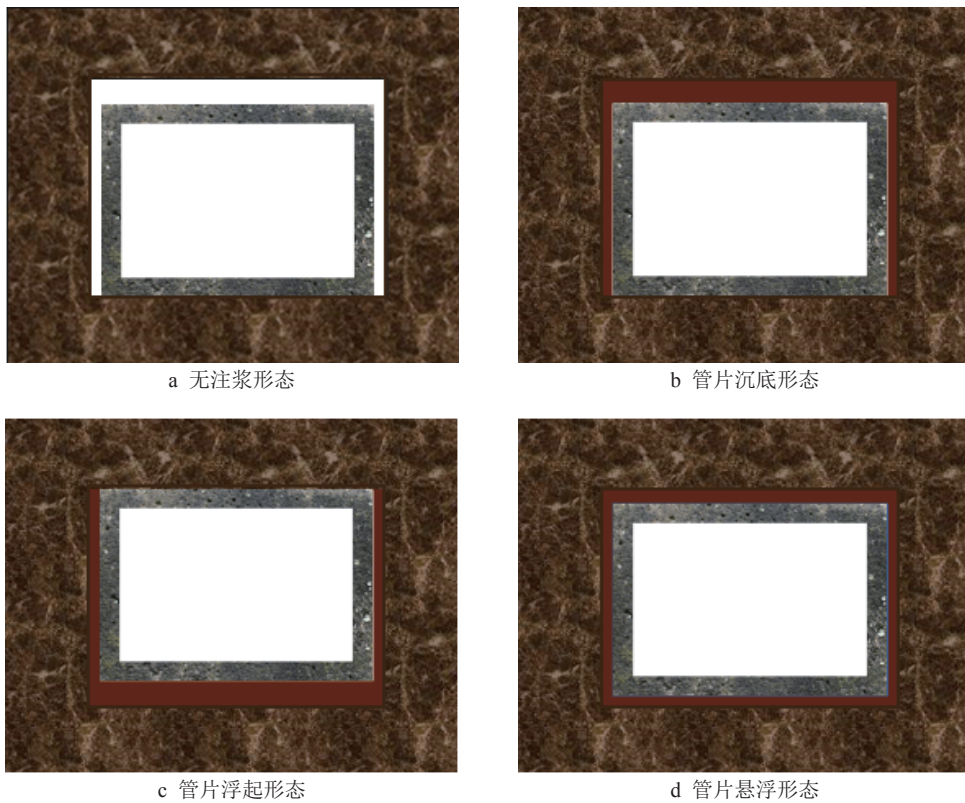


图 1 顶管隧道顶进时隧道管片相对位置形态示意

1.1.1 无注浆形态 当注浆量太少或同步注浆出现问题时,部分管片将会呈现无注浆状态(图 1-a)。此时整个管片处于超挖区的底部,上方土体因无泥浆支撑坍塌在管片上,管片四周会与原土层直接接触并产生滑动摩擦力(假设为 F_{μ}),此时的摩擦会很大,严重限制了顶进的距离,且对土层产生很大的剪应力和沉降,是工程中应该避免的。

1.1.2 管片沉底(浮起)形态 超挖区处于被泥浆填满的状态(图 1-b、c),管片底面与底部土层接触或者顶面与顶部土层接触,并产生滑动摩擦力(假设为 $F_{\mu d}$);其他 3 面与泥浆接触并产生流体摩擦力(假设为 $F_{\mu s}$),此时摩擦力会明显减小,注浆减摩效果较明显。

1.1.3 管片悬浮形态 超挖区处于被泥浆填满的状态,并且管片处于泥浆中间(图 1-d),管片四周与泥浆接触;此时只产生流体摩擦;此时的摩擦阻力应该是最小的。

1.1.4 管片偏移形态 超挖区处于被泥浆填满的状态,因施工偏差等引起管片的左或右面与土层接触,产生滑动摩擦,其大小与隧道侧面之间的压力成正比;如果施工偏差很大,则所产生的滑动摩擦也会很大。

$$F_{\mu} = F_N \times \mu, \quad (1)$$

$$F_{\mu d} = F_N \times \mu_d, \quad (2)$$

$$F_{\mu s} = k \times \dot{\gamma}^n. \quad (3)$$

式中: F_N 为管片与土层的接触压力; $F_{\mu d}$ 为管-土摩擦; $F_{\mu s}$ 为管-浆摩擦; μ 为混凝土与土层间的摩擦因数; μ_d 为混凝土与混合土体的摩擦因数; k 为流体稠度系数,与黏度正相关; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,在此实验中恒定; n 为流型参数,膨润土泥浆的 $n < 1$ 。

1.2 泥浆失水与土层沉降 土体是由各种不规则形状的土颗粒组成的集合体,其表面有很多孔隙.饱和状态下,这些孔隙会被水填充,因而产生孔隙水压力 p_{yw} .当用一定的注浆压力 p 将泥浆注入建筑空隙时,因泥浆与土层表面直接接触,故而泥浆会通过孔隙进行渗透.刚开始接触时, $p > p_{yw}$.在压力差作用下泥浆中的自由水与黏土小颗粒会通过土层孔隙渗透进土层.因为土层的孔隙很小,只允许自由水通过,泥浆中的大部分黏土颗粒和它的附着水会留在土层表面.随着渗透的继续,黏土颗粒和它的附着物在土层表面不断聚集,并在注浆压力的作用下不断压实挤密,最终形成致密、透水性很小的泥皮^[9].此时泥浆的渗透会大幅度减小并趋于稳定,泥浆在压力差的作用下,自由水渗入土体的程度用失水量来衡量.在顶管注浆时,泥浆会充满建筑空隙,避免上方土层塌落在管片上,从而起到支撑上方土体的作用.泥浆会因为失水而体积变小,此时上方土体就会产生大量沉降.当持续注浆并使得泥皮形成后,作为渗透动力的注浆压力将会作用在泥皮上,并由泥皮传递到土骨架上,转

换为对土体的应力,因此对上方土体施加一个 $p-p_0$ 的应力,使土层抬升,这对之前的失水沉降会起到一定的补偿作用(图2)。

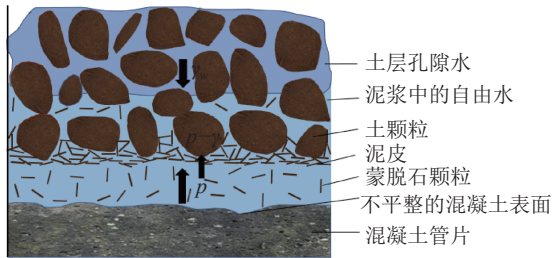


图2 泥浆渗透机制与泥皮形成示意

2 实验方法和原理

为了使实验能更好地模拟现场工况,结果更加精确,本次研究采用离心模型实验来模拟顶管顶进注浆过程,并自主设计了用于离心机实验的顶管工程注浆模拟系统。该实验方法的优势有3个:1)土的应力变形等参数均为复杂的非线性关系,通过离心机能还原现场土的真实应力状态,使实验结果更为精确;2)顶管工程注浆模拟系统采用与现场施工相同的同步注浆方法,能很好地模拟顶管-泥浆-土层的复杂的相互作用;3)隧道开挖后土的地层固结沉降过程往往需要数十天甚至数月,离心场加快土的固结沉降速度,可达原型的 N^2 倍(N 为相似比),将固结沉降过程缩短为数小时,使得实验室内对地层沉降的研究成为可能。

2.1 离心机设备 本实验采用岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)的TLJ-150复合型岩土离心实验机(图3)。



图3 同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心实验机

模拟实验是一个埋深和横断面分别为4.0 m、7.0 m×5.2 m的矩形顶管工程。主要参数(模型与原型):密度、应力(变)、速度、摩擦因数、孔隙比、颗粒尺寸、强度的相似比均为1;长与渗透性的相似比均为1/40;渗流固结时间的相似比为1/1 600。

2.2 顶管工程注浆模拟系统 顶管工程注浆模拟系统由顶进模拟、注浆和测量系统3部分组成(图4)。

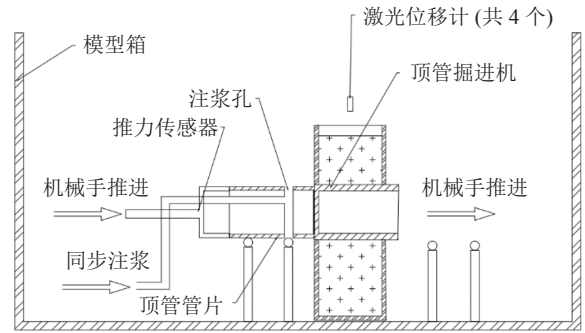


图4 顶管工程注浆模拟系统

顶进开挖系统:由机械手、钛合金传力架、顶管模型组成。实验中通过操控机械手,顶进钛合金传力架,进而顶进顶管管片。此时前方顶管机段会被逐渐顶出模型箱,模拟土层的开挖,而后方的顶管管片段则被顶进模型箱,模拟管片的顶进,其全过程即为顶管工程顶进过程。

同步注浆系统:由电磁阀、离心机气路、液缸、密封系统组成。离心机气路能产生压力为0~1 MPa的气体,通过液缸将气压转换为注浆压力注入土层,再通过调整空气压缩机的气体压力来调整注浆压力。

密封环模拟现场洞口防水卷帘装置:由固定的铁片、高弹性的硅胶板组成,防止泥浆从建筑空隙中流出,同时允许顶管管片在洞口能实现上下浮动,以便观察顶管模型的浮沉。

测量系统在管片下方外露段放置激光位移计,通过位移观测管片的沉浮状态;在机械手和支架中间放置受力传感器,通过总顶力计算顶管所受的摩擦阻力;在土层表面上部,放置4个激光位移计监测地表位移,形成整体沉降曲线;通过给气缸拉杆,标定体积和摄像头监控,实时监控实验过程中的注浆量。

实验的膨润土泥浆是将水、膨润土与一定量的黄原胶和淀粉添加剂按比例混合制得。黄原胶和淀粉均能增加泥浆的黏度而对泥浆的滤失量影响不大^[10],这对实验非常重要。混合物放入膨润土泥浆搅拌机(转速:1.1 kr·min⁻¹)搅拌0.5 h后进行制浆,搅拌完成后静置24 h,使其充分水化;使用马氏黏度漏斗仪与滤失仪进行指标测量(表1)。

2.3 实验内容与过程 本研究实验内容主要关注3个方面:1)摩擦阻力组成与随注浆量变化;2)注浆的泥浆黏度与摩擦阻力的关系;3)注浆的泥浆失水率与地层沉降的关系。

实验过程分为预压固结、电机顶进、同步注浆、测量数据4步,实验共有8组(表2)。

3 实验结果与分析

3.1 顶管隧道形态和摩擦阻力 第1组实验采用标

表 1 泥浆型号与参数

泥浆型号	配比(质量比)	黏度(马氏漏斗)/(Pa·s)	失水量/mL
标准泥浆	水:膨润土=1:0.06	38.2	16.0
低膨润土泥浆	水:膨润土=1:0.05	34.6	18.0
高膨润土泥浆	水:膨润土=1:0.08	46.6	12.5
高黏度泥浆a	水:膨润土:黄原胶=1:0.06:0.005	45.8	16.0
高黏度泥浆b	水:膨润土:黄原胶=1:0.06:0.01	61.2	15.5
低滤失量泥浆a	水:膨润土:淀粉=1:0.06:0.03	38.9	12.5
低滤失量泥浆b	水:膨润土:淀粉=1:0.06:0.05	40.2	8.0

表 2 顶管注浆实验参数

实验编号	泥浆	注浆量/100 mL	注浆压力/100 kPa
1	标准泥浆	无限量	1.2
2	标准泥浆	6	1.2
3	低膨润土泥浆	6	1.2
4	高膨润土泥浆	6	1.2
5	高黏度泥浆1	6	1.2
6	高黏度泥浆2	6	1.2
7	低滤失量泥浆1	6	1.2
8	低滤失量泥浆2	6	1.2

准泥浆:注浆压力为 120 kPa;上覆土压力为 p_y+40 kPa, p_y 为土体天然压力(kPa)。停机将管片整个放入土层后,运行离心机进行持续注浆,并以 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度顶进管片;观察并记录顶管模型形态、摩擦阻力(图 5)。

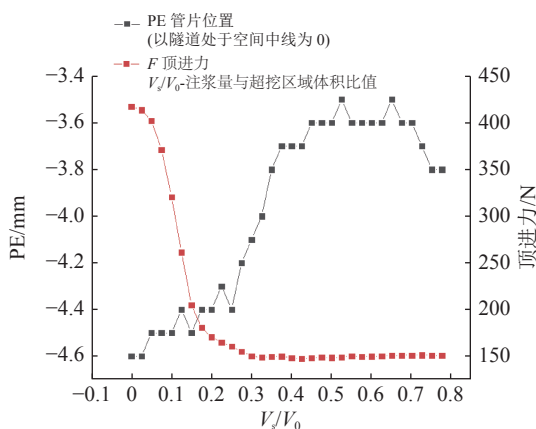


图 5 管片位置 (PE) 和顶进力随注浆进程变化

从图 5 可看出,整个注浆过程管片的位置都处于 $-4.6 \sim -3.5$ mm(达到 -4.6 mm 是因为底部土层的回弹)。由此可见,管片全程处于沉底状态,属于前述第

2 种形态。未注浆的一瞬间底部与原土层接触产生滑动摩擦为 $F_\mu = 417.4 \text{ N}$, $\mu = 0.39$;当浆液注入后,管片位置些许上升,同时 F_μ 以很快的速度减小,当注浆量 V_s 与超挖区域体积比 $V_s/V_0 = 0.15$ 时, $F_{\mu d} = 204.6 \text{ N}$, 下降到原来摩擦力的一半。该阶段是浆液通过土层颗粒表面的孔隙大量渗进土层,同时膨润土颗粒因无法通过孔隙,故逐渐堆积在孔隙处,使得凹凸不平的表面被填平,导致 F_μ 大幅下降。当 $0.15 < V_s/V_0 < 0.40$ 时,管片明显上升, F_μ 缓慢减小;管片在上升了 0.9 mm 之后就不再上升,这说明管片不是因为浮力而悬浮,而是由于土层表面在上升,也是泥皮的形成过程。土层表面孔隙在该阶段已被大量膨润土颗粒填充并堵塞,在自由水渗入孔隙的同时膨润土颗粒在孔隙周围与土层表面大量堆积,并将原土层覆盖。因为膨润土颗粒比黏土颗粒要小,表面更光滑, F_μ 进一步减小。 $V_s/V_0 = 0.4$ 时,可判断泥皮已基本形成,此时 $F_{\mu d} = 147.9 \text{ N}$, 下降至原土层 F_μ 的 35.4%; $\mu = 0.14$ 。当 $V_s/V_0 > 0.4$ 时,管片不再上升,而 F_μ 有微小上升趋势,这是因为管片与浆液的接触面积增加,从而产生 $F_{\mu s}$ 的缘故。泥皮形成后,土层表面渗透性减小,此时泥浆不再渗入土层,而是开始填充管片四周与土层间的空隙,管片左右 2 面逐渐被泥浆包裹,并发生相对运动,产生 $F_{\mu s}$; F_μ 增加缓慢。当 $V_s/V_0 = 0.7$ 时, $F_\mu = F_{\mu d} + F_{\mu s} = 150.8 \text{ N}$, $F_{\mu s} = 2.9 \text{ N}$, 在总摩擦阻力中占比只有 2%。当 $V_s/V_0 > 0.7$ 时,管片发生了下沉,同时 F_μ 不再变化。并在 $V_s/V_0 = 0.77$ 左右时,无法继续注浆。由于没有及时同步注浆,周围土体已发生很大的变形并产生位移,导致 V_s 还未达原 V_0 就达到饱和。该阶段为泥皮形成后,注浆压力通过充满超挖区的浆液传递到泥皮上,并通过泥皮传递到土骨架上,使土层产生了一定的位移,并在补浆后达到稳定。

值得注意的是,在实验结束后停机处理管片时,发现管片周围的泥浆套并不是均匀连续的,管片模型的四面中间各有一个注浆孔,孔前注浆饱满,但随着离注浆孔距离的增大浆液厚度变薄,甚至在管片边缘处有注浆盲区。同时泥浆套本身是一个很薄的液体层(实际工程中也只有 2 cm 左右),土层发生的很多毫米级的变形、塌落或者管片自身因施工因素发生的偏移都有可能多处阻断泥浆套,破坏泥浆套的整体性。这在实验数据中也体现出来,在 $V_s/V_0 > 0.4$ 阶段,浆液逐渐填充管片周围空隙并将整个管片包裹于泥浆套中,如果泥浆套是一个连续性的整体,处于其中的管片会受到一个向上的浮力(F_f)和向下的重力(G)。

$$F_f = \rho g V = 1.06 \times 10^3 \times 400 \times 0.165 \times 0.12 \times 0.15 \text{ N} = 1259.3 \text{ N},$$

$$G = mg = (2.4 \times 10^3 \times (0.165 \times 0.12 - 0.149 \times 0.104) \times 0.2 \times 400) \text{ N} = 826.4 \text{ N}.$$

由此可知管片 $F_f > G$. 在实验中, 管片不但没有浮起, 底部摩擦力也没有减小; 管片并没有受到明显的浮力作用, 说明该泥浆套为一个不连续体, 只起到填充大部分管片表面与土层之间空隙的润滑减阻作用, 不对管片产生浮力作用, 我们将顶管工程中这种泥浆套叫作“减阻泥浆套”。

3.2 注浆的泥浆黏度与摩擦阻力的关系 第 2 组实验是在相同注浆压力、注浆量和顶进参数下, 改变泥浆的黏度, 研究其与摩擦阻力的关系(图 6)。

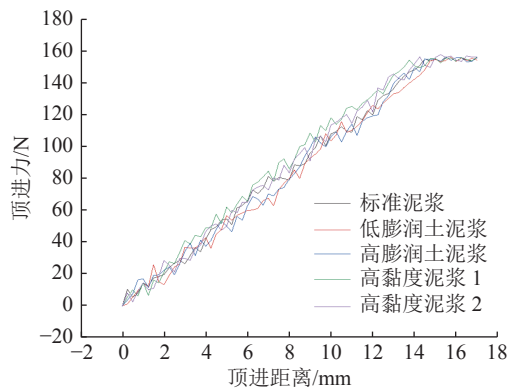


图 6 不同黏度泥浆顶进力随顶进距离的关系曲线

图 6 中的摩擦力结果已减去顶管机与土层摩擦力。5 组数据在前 15 mm(顶管并未完全顶进)都处于波动上升, 且随着管片进入土层的长度增加整体呈现线性关系。波动的原因是管片前方 mTBM 管与原土层接触摩擦力的不稳定, 但到顶进距离 $> 15 \text{ mm}$ 时, 摩擦力趋于稳定。研究选取最后趋于稳定的数据, 并各自进行加权, 换算成摩擦力 F_μ , 可以得到如表 3 所示的结果。

表 3 泥浆黏度与侧摩擦力关系

实验泥浆	黏度/(Pa·s)	失水量/mL	F_μ/kPa
标准泥浆	38.6	16.0	1.819
低膨润土泥浆	34.6	18.0	1.815
高膨润土泥浆	46.6	12.5	1.823
高黏度泥浆 1	45.8	16.0	1.824
高黏度泥浆 2	61.2	15.5	1.831

随着泥浆黏度的增加, F_μ 也增加(图 7)。

对比第 3 和 4 组数据, 可以发现: 摩擦力和泥浆失水量没有明显关系(图 8)。

值得注意的是摩擦力 F_μ 增加的量很小。对比第 2 和 5 组数据, 黏度相差非常大, 但 F_μ 只增加了 0.016 kPa。

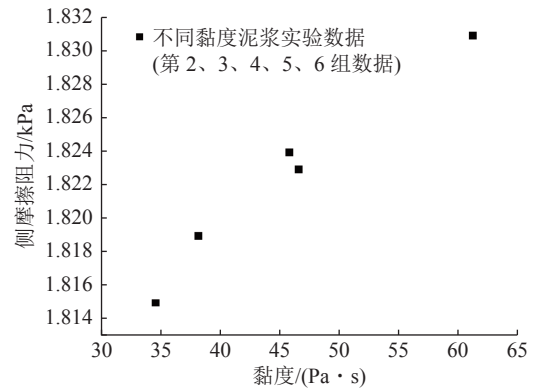


图 7 泥浆黏度与侧摩擦阻力散点

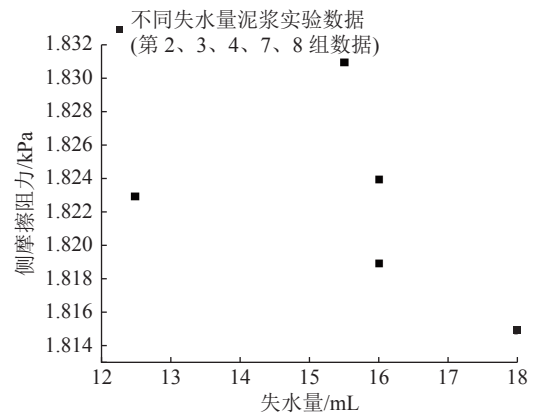


图 8 泥浆失水量与侧摩擦阻力关系

换算到现场 1 个 $6.9 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ 的管片, 顶力仅增加了 $0.38 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$. 相对于原管片 $43.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 的顶力来说, 变化微乎其微。原因是管片与土层的摩擦力 F_μ 由 $F_{\mu d}$ 和 $F_{\mu s}$ 这 2 部分构成, 其中 $F_{\mu s}$ 是流体摩擦, 由式(3)可知: 其摩擦力应随黏度的增加而增加, 但由于其本身量级小, 占总摩擦力 F_μ 比例非常小(第 1 组实验测定 $F_{\mu s}$ 占比为 2%)。同时黏度的增加显然没有使 $F_{\mu d}$ 增加, 所以在顶管工程中黏度对摩擦力 F_μ 的影响有限。

3.3 注浆的泥浆失水量与地层沉降的关系 第 3 组实验是在相同注浆压力、注浆量和顶进参数下, 通过改变泥浆的失水量来研究其与最终地层沉降的关系。为了让失水量与最终沉降关系更加明显, 本实验设定: 覆土较浅, 且注浆量不饱满; 同步注浆后并未补浆, 因此沉降量与现场相比较较大。管片轴线处的地层沉降随开挖面距测点的距离变化如图 9 所示(数据只截取沉降变化明显的区域, 以便于观察分析)。

由于已开挖区域的土体扰动和沉降均有一定的影响范围。在开挖面未到达测点之前, 地层已产生了少量沉降; 当开挖到测点时, 5 组数据在 $0 \sim 0.75 \text{ mm}$ 期间, 突然地层都产生了较大的一次沉降, 且沉降量基本相差不大, 该沉降为注浆未注饱满(注浆量 600 mL), 上方土体因无泥浆支撑发生塌落所导致的。塌落导

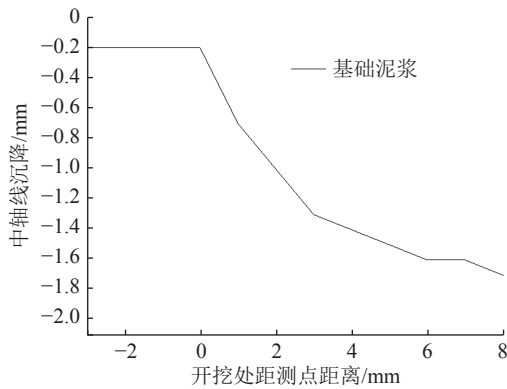


图 9 中轴线沉降随开挖进程变化

致的沉降量为 1 mm 左右, 几乎占总沉降的 50%, 可见注浆不饱满引起的地层损失会造成很大的地层沉降, 在施工时应避免这种情况. 此后沉降继续增大, 但增大的速度在逐渐减缓, 且各组数据在该阶段存在明显差异, 该差异是由泥浆的失水量不同导致的. 上方土体塌落至浆液上表面并与浆液发生直接接触, 浆液中的水大量渗透至地层中, 导致浆液体积减小, 上方土体进一步沉降. 泥浆失水量不同, 渗透量不同, 该阶段造成的沉降也不同.

图 10 为各实验最终的沉降曲线(沉降曲线的一侧).

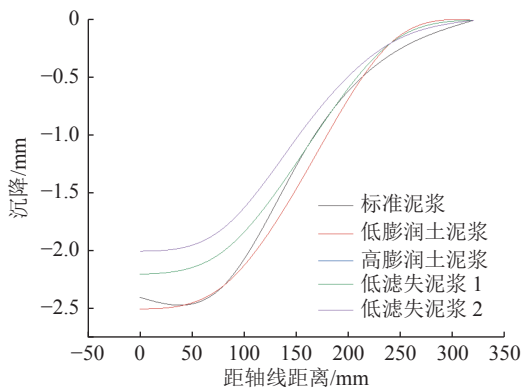


图 10 不同失水量泥浆最终沉降曲线(半边)

整体趋势符合 PECK 曲线(由于顶管是矩形且断面较大, 轴线附近沉降相对于 PECK 偏大). 最大沉降点位于管片中轴线, 其沉降值随失水量变化的关系见表 4.

表 4 泥浆失水量与最终沉降量关系

实验泥浆	泥浆黏度/(Pa·s)	失水量/mL	最终沉降量/mm
标准泥浆	38.2	16.0	2.4
低膨润土泥浆	34.6	18.0	2.5
高膨润土泥浆	46.6	12.5	2.2
低滤失泥浆 1	38.9	12.5	2.2
低滤失泥浆 2	40.2	8.0	2.0

由表 4 可知: 随着泥浆失水量的增加, 最终沉降

量随之增加(图 11).

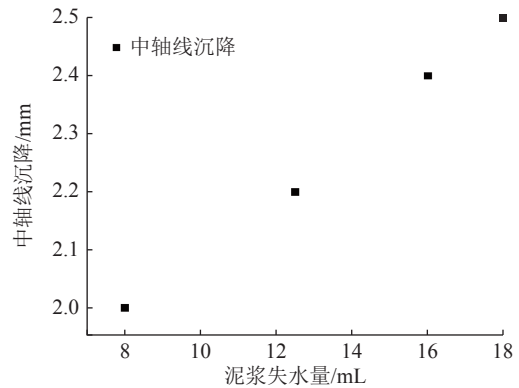


图 11 泥浆失水量与最终中轴线沉降量散点

同时对比第 3 和 4 组数据, 可以发现在相同失水量下, 泥浆黏度的变化对沉降没有影响.

值得关注的是第 2 和 5 组实验, 泥浆失水量相差 1 倍, 最终的沉降差异为 0.5 mm, 相当于现场 20 mm 的沉降. 可见当顶管顶进时没有补浆环节或者补浆的量不足时, 失水量的差异将会对最终地层沉降造成很大影响.

4 结论

本文通过离心模型实验与自主研发的顶管工程注浆模拟系统, 对不同黏度与失水量的泥浆进行顶进模拟, 并研究了泥浆性能对摩擦阻力和地层沉降的影响. 主要结论如下:

1) 在第 1 组实验中, 由于注浆不均匀、泥浆套太薄等原因导致泥浆套被阻断分割, 泥浆对顶管的浮力效果大幅削减, 泥浆只能减小摩擦阻力而不能提供浮力, 该泥浆套被称为“减阻泥浆套”. 在“减阻泥浆套”的作用下, 顶管底部会与土层接触产生管-土滑动摩擦, 另 3 面则是与泥浆产生管-浆流体摩擦, 而滑动摩擦往往远大于流体摩擦, 占总摩擦阻力的 98%, 决定着总摩擦阻力的大小. 顶管与土体间的滑动摩擦在有泥浆注入后表面被蒙脱石颗粒填充覆盖, 使得滑动摩擦为原来的 35.4%, 起到了很好的减阻效果.

2) 泥浆的黏度对摩擦阻力有影响. 泥浆的黏度越大, 流体摩擦越大, 但由于流体摩擦占比很小, 同时黏度的增加没有使滑动摩擦增加, 最终对总摩擦阻力的影响很小, 在实际应用中泥浆的黏度对摩擦阻力的影响几乎可忽略不计.

3) 泥浆的失水量和地层的最终沉降有着正相关的关系. 失水量越大, 泥浆失水阶段渗透损失越多, 造成的沉降也越大. 值得注意的是在注浆不充足或补浆不及时的情况下, 泥浆失水对地层沉降的影响进

一步放大, 在实验中2个失水量相差1倍的泥浆造成的最终沉降差高达20 mm, 在实际工程中应尽可能避免注浆不充足和补浆不及时等问题。

5 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, 25(6): 930
- [2] RINALDI V A, CLARIÁ JR J J. Time dependent stress-strain behavior of bentonite slurries; effect of thixotropy[J]. Powder Technology, 2016, 291: 311
- [3] AU P I, LEONG Y K. Rheological and zeta potential behaviour of kaolin and bentonite composite slurries[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 436: 530
- [4] 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): 04016016
- [5] JEONG S W. Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows[J]. Geosciences Journal, 2010, 14(4): 359
- [6] 王双, 夏才初, 葛金科. 考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩阻力计算公式[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 159
- [7] 丛茂强, 陈锦剑, 王建华. 基于注浆压力控制的混凝土顶管施工微扰动机理[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 867
- [8] XU T, BEZUIJEN A. Experimental study on the mechanisms of bentonite slurry penetration in front of a slurry TBM[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103052
- [9] XU T, BEZUIJEN A. Pressure infiltration characteristics of bentonite slurry[J]. Géotechnique, 2019, 69(4): 364
- [10] RAZI M M, RAZI F M. An experimental study of influence of salt concentration, mixing time, and pH on the rheological properties of pre-hydrated bentonite slurries treated by polymers[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2013, 34(6): 764

Influence of pipe jacking bentonite mud performance on stratum disturbance: an experimental centrifugal study

LIU Jian¹⁾ ZOU Yuxiang¹⁾ MA Xianfeng²⁾ LI Xianghong²⁾ CHEN Wei²⁾

(1) Zhongyifeng Construction, 215000, Suzhou, Jiangsu, China; 2) School of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract With widespread use of pipe jacking in recent years, requirements for disturbance control of pipe jacking method are increasing. Bentonite mud is the main disturbance reduction measure of pipe jacking method, but little is known about the influence of its own performance on disturbance control. Here we conducted a theoretical analysis of frictional resistance and formation settlement in the pipe jacking process. We did geotechnical centrifuge experiment. In a self-developed pipe jacking engineering grouting simulation system, different types of mud were used. We discovered the phenomenon of “friction reduction mud screen” and examined influence of mud viscosity and mud water loss on frictional resistance and formation settlement.

Keywords pipe jacking engineering; mud performance; viscosity; water loss; geotechnical centrifuge experiment; grouting simulation system

【责任编辑: 陆有忠】