

DOI: 10.11779/CJGE2022S2027

大断面浅覆土矩形顶管模型试验研究

潘羽擎^{1, 2}, 甄亮³, 蒋海里³, 李晓军^{1, 2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要: 在顶管隧道施工中,同步注浆是控制地表变形和顶力控制的关键环节。目前对于传统的同步注浆研究主要局限于浆液材料,摩擦系数的研究,而对浆液本身流动及其填充机理的研究涉及很少。通过建立顶管-浆液-土体系统和模型试验装置,在考虑相似律的情况下,介绍了大断面矩形顶管同步注浆的室内缩尺模型试验研究结果,研究了传统触变浆液(由膨润土、羧甲基纤维素和纯碱组成)和HS-3复合浆液和聚丙烯酰胺复合浆液对泥浆套质量影响效果。试验中测量了土层的竖向位移变化、顶进力的大小,以观察同步注浆对地面位移和顶力的影响。探究了浅覆土大断面矩形顶管隧道同步注浆对地面位移和顶进力的大小影响规律。试验发现,在注浆情况下,顶进力可以减少40%左右。

关键词: 模型试验; 顶管-浆液-土体系统; 同步注浆; 矩形顶管

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0125-05

作者简介: 潘羽擎(1995—),男,硕士,主要研究顶管施工参数优化。E-mail: panyuqing@tongji.edu.cn。

Model tests on large-section and shallow soil rectangular pipe jacking

PAN Yu-qing^{1, 2}, ZHEN Liang³, JIANG Hai-li³, LI Xiao-jun^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Technical Center, Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: During the construction of pipe jacking tunnels, the simultaneous injection is a key in controlling the surface deformation and jacking force. At present, the traditional researches on the simultaneous injection are mainly limited to those on the slurry materials and the friction coefficient, while the researches on the flow of the slurry itself and its filling mechanism are rarely involved. By establishing the pipe-slurry-soil system and the model test platform, the results of a laboratory reduced-scale model test on the simultaneous injection of slurry of super-large rectangular pipe jacking are introduced. It is shown that different slurries have different effects on the quality of the protective slurry screen, which contains the traditional thixotropic slurry (consisting of bentonite, CMC (carboxy methyl cellulose) and soda ash) and HS-3 compound slurry and polyacrylamide compound slurry. The settlements of different parts of soils and the pipe jacking forces are measured to observe the influences of the protective slurry screen on the ground settlements and the pipe jacking forces. The effects of the simultaneous injection on the ground displacements and the jacking forces of a large-section rectangular pipe-jacking tunnel with shallow overburden are explored. The test results show that the jacking forces can be reduced by about 40% under the simultaneous injection.

Key words: model test; pipe-slurry-soil system; simultaneous injection; pipe jacking

0 引言

随着城市地下空间的不断发展和隧道工程项目的不断增多,城市地下空间的可用性在不断减少。因此,矩形顶管隧道因其优越的空间利用率而受到人们的关注。矩形顶管法在管道和通道施工建设过程中采用特殊的施工技术,对地表尽量小开挖、少开挖,使得对城市地下的破坏降低到最小程度^[1]。但矩形顶管隧道施工控制难度较大,引起的地层变形不易控制,尤其是在软弱土层地区。其中同步注浆是通过同步注浆系

统在管片上的注浆孔,在顶管顶进过程中同时进行的。浆液在顶管机和管片之间的间隙形成泥浆套从而使周围土体获得支撑,可以有效控制地表变形,并大大降低顶进过程中的摩阻力。所以说在顶管隧道施工过程中,同步注浆对于控制变形和降低摩阻力非常关键。大多数与同步注浆相关的试验是以浆液材料为研究对象,分析材料参数,包括浆液选型以及材料配合比等

参数的确定^[2-4]。也有学者通过室内试验,研究了泥浆套对于顶力和地表变形和土体劈裂的影响^[5]。也有部分学者通过压力传感器检测同步注浆过程中管片所受的压力,分析研究盾尾空隙内浆液压力的分布规律及消散过程、浆液的流动路径及扩散方式,验证同步注浆流动扩散模型的合理性^[6],有学者通过利用有机玻璃材料制作类矩形盾构隧道等缩尺模型进行同步注浆过程的可视化模拟试验,为类矩形盾构注浆压力模型的建立提供了重要依据^[7]。

有学者通过三维模型试验,模拟了粉砂层顶管隧道在不注浆液和同步注浆条件下的顶进力和地面沉降变化,研究了传统的触变泥浆(膨润土、CMC(羧甲基纤维素)和纯碱)和HL复合浆液对于减少摩擦阻力和地面沉降的影响。然后根据不同的浆液微观结构特征,利用电子显微镜对其力学性能进行了研究。试验分析表明:应更多地关注浆体参数^[8]。

但是矩形顶管隧道由于其形状的特殊,浆液在管壁与土体间隙的充填受到一定影响,容易在隧道的顶部与底部产生浆液淤积^[9],因此对矩形顶管隧道同步注浆的研究尤为重要,其中浆液性质、注浆压力和注浆量是同步注浆的关键参数,为主要研究对象。

本试验依托于陆翔路顶管隧道工程,对其缩尺模型进行同步注浆试验,通过对注浆压力数据的采集,对注浆压力的变化规律进行了分析,并结合顶进力的变化以及地表变形情况分析了注浆压力和注浆量对地表变形和顶进力的影响。

1 相似系统和相似关系

由于顶管顶进过程是一个非常复杂的过程,实质上是管片与土体、浆液之间相互作用的过程,给理论分析带来了很大的困难,而相关的模型试验则给顶管的地层适应性研究提供了很好的平台。因此本文将顶管、浆液与土体作为一个系统即“顶管-浆液-土体系统”进行研究,根据相似理论,采用MLT(质量、长度和时间)表示的基本量纲系统,可以得出同步注浆试验系统所涉及的全部物理参量如下^[6]。

(1) 空隙厚度 $d[\text{L}]$, 顶管自重 $G[\text{M}]$ 。

(2) 土壤特性: 单轴抗压强度 $\sigma_1[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 凝聚力 $C_1[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 内摩擦角 $\varphi_1[\text{l}]$, 重度 $\gamma_1[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 压缩模量 $E[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 孔隙比 $e[\text{l}]$, 泊松比 $\nu[\text{l}]$, 含水率 $w[\text{l}]$ 。

(3) 浆液特性: 动切力 $\tau[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 触变性 $p[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 滤失率 $\psi[\text{l}]$ 。

(4) 顶管—注浆系统: 顶管推进速度 $v[\text{LT}^{-1}]$, 浆液压力 $P[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 单位时间注浆量(浆液流量) $q[\text{L}^3\text{T}^{-1}]$, 重力加速度 $g[\text{LT}^{-2}]$ 。

(5) 因变量: 土体内部应力 $\sigma[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$, 土体变形量 $\delta[\text{LT}^{-2}]$ 。

由于模型与原型处于相同重力场中,因而重力加速度是相等的,利用量纲分析法和相似理论第2定理,最终得到各物理参量相似比之间的关系:

$$\begin{aligned} C_H &= C_l, \quad C_D = C_l, \quad C_d = C_l, \quad C_G = C_E C_l^2, \quad C_{C_l} = C_E, \\ C_{C_l} &= C_E, \quad C_{\varphi_l} = 1, \quad C_E = C_{\gamma_1} C_l = C_{\gamma_2} C_l, \quad C_e = 1, \quad C_\mu = 1, \\ C_\rho &= 1, \quad C_\tau = C_E, \quad C_\varphi = 1, \quad C_\eta = C_l^{3/2}, \quad C_t = \sqrt{C_l}, \\ C_v &= \sqrt{C_l}, \quad C_p = C_E, \quad C_q = (\sqrt{C_l})^5, \quad C_p = C_E, \quad C_\sigma = C_E, \\ C_\delta &= C_l. \end{aligned}$$

上式中: C_l 为原型与模型的几何形似比 ($C_l = 20$); C_E 为原型土与模型土的压缩模量相似比; 其余的都可以推导出来。

从上式可以看出,只要选定 C_l 和 C_E ,其实理论上来说 C_l 与 C_E 是相等的,但是在模型土配置的时候,很难做到绝对相似,所以只要满足近似相似就可以,可以先假定一个近似 C_E 与 C_l 接近,然后不断调整,就可以确定其他物理参量的相似比。

2 模型土与模型浆液的配制

2.1 模型土的配制

模型试验参照的地层为上海的软土地层,根据勘测报告,选取顶管穿越的土层以及上覆土层,按照厚度加权平均得到原型土的4项性能指标。经过大量的尝试,最终确定选用重晶石粉、双飞粉、膨润土、原状土、洗衣粉、细沙、水。按照一定的配比,搅拌均匀后,分层填到模型箱,加压处理后,得到性能稳定的人工模型土。原型土与模型土的4项性能指标见表1。

此时, $C_{C_l} \approx C_E \approx C_l$ 近似相等,由于绝对相似是做不到的,只要主要的相似关系能够满足,就可以认为模型土与原状土是相似的^[10]。

2.2 模型浆液的配制

模型浆液主要针对目前顶管隧道中普遍使用的膨润土减摩泥浆。配制模型浆液所用的原材料与原型浆液完全一样,浆液1包含膨润土、cmc、纯碱和水;浆液2包含膨润土、聚丙烯酰胺、HS-3和水;浆液3包含膨润土、cmc、纯碱、HS-3和水。综合比较后,选取了失水率、触变性、动切力3个指标作为描述浆液特性的参考量,原型浆液的性能指标通过现场测量,经过大量的尝试后,得到近似满足要求的模型浆液。浆液3包含膨润土、cmc、纯碱、HS-3和水。综合比较后,选取了失水率、触变性、动切力3个指标作为描述浆液特性的参考量,原型浆液的性能指标通过现场测量,经过大量的尝试后,得到近似满足要求的模型浆液。

表 1 土体力学参数及相似比
Table 1 Mechanical parameters and similarity ratios of soils

土体种类	λ_l (kN·m ⁻³)	C_{γ_l}	φ_l (°)	C_{φ_l}	C_l /kPa	C_{C_l}	E /MPa	C_E
原型土	17.2		15.0		11.0		2.9	
模型土	17.9	0.96	15.8	0.95	10.7	1.03	0.3	9.7

表 2 模型浆液 1 参数指标及相似比

Table 2 Mechanical parameters and similarity ratios of Slurry 1

浆液种类	参数指标及相似比				
	$\psi / 1$	C_ψ	τ / Pa	C_τ	p / Pa
原型浆液 1	0.044	1.07	12.3	9.5	4
模型浆液 1	0.041		1.3		0.38
					10.5

表 3 模型浆液 2 参数指标及相似比

Table 3 Mechanical parameters and similarity ratios of Slurry 2

浆液种类	参数指标及相似比				
	$\psi / 1$	C_ψ	τ / Pa	C_τ	p / Pa
原型浆液 2	0.027	0.68	42.4	11.5	9.7
模型浆液 2	0.040		3.7		0.92
					10.5

表 4 模型浆液 3 参数指标及相似比

Table 4 Mechanical parameters and similarity ratios of Slurry 3

浆液种类	参数指标及相似比				
	$\psi / 1$	C_ψ	τ / Pa	C_τ	p / Pa
原型浆液 3	0.021	0.75	52.1	10.2	12.6
模型浆液 3	0.029		5.1		1.1
					11.5

3 模型试验设备和试验方法

模型试验设备主要由五部分组成: 模型箱、顶进系统、注浆系统、可视化系统和测量系统(见图 1)。

3.1 模型箱和模型管片

本次试验模型箱的前后左右面由 30 mm 厚透明亚克力板制作组装而成, 底面由加固钢板构成, 在箱体四周用角钢加固, 保证箱体的安全稳定, 可以安全承受土体和加压荷载, 其尺寸为 2500 mm×1500 mm×1500 mm(长×高×宽)。

模型管片也是由透明亚克力制作而成, 为了模拟顶管机在开挖过程中形成的与实际管片的壁后间隙, 模型管片包含前后管片(见图 2, 3), 前管片的设计尺寸比后管片要大出一个“模拟间隙”, 根据相似比, 大约有 1 mm 至 1.5 mm, 在本次试验中, 前管片预先埋置在土体中, 通过密封胶条与箱外后管片连结, 来模拟实际工程中的顶管机, 后管片来模拟实际管片, 其具体尺寸为 500 mm×408 mm×1500 mm×20 mm(宽×高×长×厚)。

3.2 顶进系统

本次试验采用了电动伺服千斤顶, 最大顶力为 6 吨, 最大顶程为 1000 mm, 速度最低可以设置为 0.001 mm/s, 并且配备实时显示屏, 可以读取顶进距离、顶进压力和顶进速度, 在本次试验中根据相似比和实

际工程顶进速度, 分别设置为 0.046 mm/s 和 0.15 mm/s 两种工况(见图 4)。

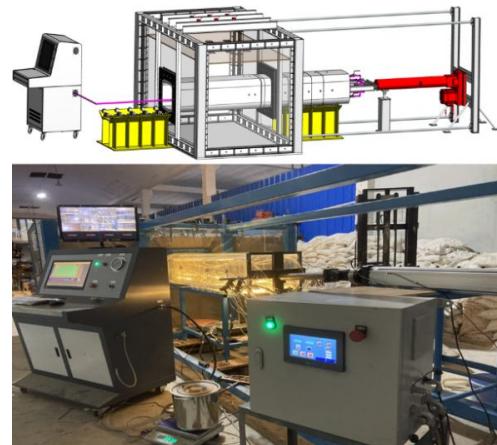


图 1 模型试验装置整体图

Fig. 1 Overall layout of test system



图 2 后管片

Fig. 2 Back pipe



图 3 前管片

Fig. 3 Front pipe



图 4 顶进系统

Fig. 4 Loading system

3.3 注浆系统

注浆系统由注浆泵和注浆管路组成(见图 5, 6),

关于注浆孔的布置，既考虑了实际工程中注浆孔位的布置，也考虑了模型管片尺寸，最后决定在顶部布置 2 个注浆孔位，侧面各布置 1 个注浆孔位，底面布置 1 个注浆孔位。在本试验中主要通过控制注浆量和注浆速率两个指标在进行注浆，因为在实际工程中难以通过注浆压力来指导注浆，并且注浆泵处显示的注浆压力也会因为注浆管道长短不同和摩擦阻力等因素，难以等同于注浆孔处的注浆压力，所以注浆泵处的压力值仅作参考，试验中的注浆压力会通过后面的监测设备中的土压力计进行采集。



图 5 注浆系统

Fig. 5 Injecting system



值，用千斤顶处的测力值与耐创传感器测力值相减就可以得出后管节在有注浆情况下的摩阻力值，在一次推进过程中就可以得出浆液的减摩效果。



图 7 可视化系统

Fig. 7 Visual system



图 8 位移监测系统

Fig. 8 Displacement monitoring system



图 6 注浆管路

Fig. 6 Injecting pipeline

3.4 可视化系统

模型管片之所以采用亚克力透明管片，就是为了观察在注浆过程中浆液的流动情况，在后管片中选择了 3 个断面，每个断面分别在上下左右面中心处布置摄像头，总共 12 个摄像头，可以全覆盖整个后管片，记录浆液的流动与扩散，并结合由土压力采集到的浆液压力分析浆液流动扩散规律（见图 7）。

3.5 监测系统

监测系统主要包括 3 部分：位移监测、浆液压力监测、顶力监测（见图 8~10）。其中位移监测部分包含 30 个竖向位移计，分布在顶管经过土体周围；浆液压力监测部分包含 22 个土压力微型传感器，安装在后管片的 5 个断面上，每个面中心布置一个；顶力监测部分包含千斤顶上面的总顶力监测和前后管节处的顶力监测设备，上海耐创 S 型传感器连接前后管节，可以测出前管节在顶进过程中无减摩泥浆的受力变化



图 9 S型传感器

Fig. 9 S-type sensor



图 10 土压力计传感器

Fig. 10 Miniature soil pressure gauges

3.6 试验方法与工况

将模型土分层填进模型箱中然后压实处理，然后将前管节放置在模型箱中，再继续填土，达到相应埋深后，进行堆载加压处理，通过管节上的土压力计判断堆载时间，然后将前后管节密封连接，管节与箱体

处的密封处理, 检查各系统设备无误后, 就可按照原有设计工况进行试验。

表 5 试验工况

Table 5 Test conditions

工况	浆液种类	埋深/cm	顶进速度/(mm·s ⁻¹)	注浆率/%
工况 1	浆液 1	35	0.150	300
工况 2	浆液 2	35	0.150	300
工况 3	浆液 3	35	0.150	300
工况 4	浆液 2	25	0.150	300
工况 5	浆液 2	25	0.046	300
工况 6	浆液 2	25	0.150	200
工况 7	浆液 2	25	0.046	200

4 结 论

图 11 是选取顶进距离从 500~1500 mm 的顶进过程中, 通过千斤顶的测量数据和 S 型传感器的数据, 从而得出前管片和后管片的摩阻力, 进而得出在不同工况下的顶进力的对比情况, 从图 11 可以看出:

(1) 相比未注浆情况下, 注入传统减摩泥浆可以将管土间的摩阻力平均降低 55%左右; 注入改良后的减摩泥浆 2 和减摩泥浆 3 可以将管土间摩阻力平均降低 65%至 70%左右; 相比传统减摩泥浆, 优化后的减摩泥浆在降低管壁摩阻力上的表现有一定的提升。

(2) 其中减摩泥浆 2 和减摩泥浆 3 对于降低摩阻力的效果相近, 只不过减摩泥浆 3 在注浆初期对摩阻力的影响变化较大, 随着泥浆套的逐渐形成, 摩阻力的降低逐渐稳定, 并且效果变优。

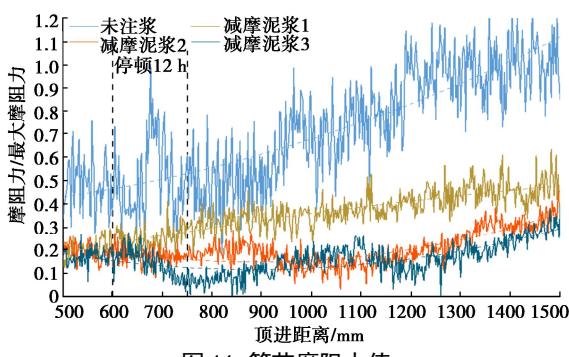


图 11 管节摩阻力值

Fig. 11 Friction values of pipe jacking

参考文献:

- [1] 彭立敏, 王哲, 叶艺超, 等. 矩形顶管技术发展与研究现状[J]. 隧道建设, 2015, 35(1): 1~8. (PENG Li-min, WANG Zhe, YE Yi-chao, et al. Technological development and research status of rectangular pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(1): 1~8. (in Chinese))
- [2] REILLY C C, ORR T L L. Physical modelling of the effect of lubricants in pipe jacking[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 44~53.
- [3] 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. (WANG Chun-ting, 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): 106~111. (in Chinese))
- [4] 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): 182~189. (WANG Ming-sheng, LIU Da-gang. Test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182~189. (in Chinese))
- [5] 罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 6~9. (LUO Ting, CHEN Han, YAO Yang-ping, et al. Analysis of water migration characteristics of pot-cover effect[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 6~9. (in Chinese))
- [6] 张莎莎, 戴志仁, 白云. 盾构隧道同步注浆浆液压力分布规律模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 43~53. (ZHANG Sha-sha, DAI Zhi-ren, BAI Yun. Model test research on distribution law of grout pressure for simultaneous backfill grouting during shield tunneling[J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 43~53. (in Chinese))
- [7] DING W Q, DUAN C, ZHU Y H, et al. The behavior of synchronous grouting in a quasi-rectangular shield tunnel based on a large visualized model test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 409~424.
- [8] ZHOU S, et al. Experimental study on the effect of injecting slurry inside a jacking pipe tunnel in silt stratum[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 466~471.
- [9] 丁文其, 段超, 赵天驰, 等. 类矩形盾构同步注浆压力分布与影响试验分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(增刊 1): 209~215. (DING Wen-qi, DUAN Chao, ZHAO Tian-chi, et al. Experimental study on pressure distribution and influence of synchronous grouting of quasi-rectangular tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(S1): 209~215. (in Chinese))
- [10] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (XU Qian-wei. Study on the Simulated Model Test of Shield Machine's Working Parameters Applicable to Different Strata and Its Theoretical Investigation[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)