

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202000744



本刊网刊

顶管注浆压力变化对地层沉降影响机理的离心模型试验

马险峰¹, 邹宇翔^{1*}, 李向红², 洪 斌²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200082; 2. 中亿丰建设集团股份有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘 要:顶管工程同步注浆是减小地层扰动和最终地层沉降的一种重要手段。为研究注浆压力与顶管工程最终地层沉降的关系, 在实际工程中选择合理的注浆压力和注浆量以减小顶管法对周围地层的扰动, 为顶管工程同步注浆技术改进提供理论和试验支持, 本文首先从土体颗粒和膨润土分子的结构特征角度对地层和泥浆的互相作用及沉降机理进行分析, 提出4个沉降阶段的理论假设; 然后, 使用岩土工程离心机和自主研制的顶管工程注浆模拟系统进行缩尺模型试验, 模拟现场不同注浆压力下的顶管顶进, 通过对各组试验沉降曲线对比分析, 验证理论分析部分的结论; 最后, 将试验中的注浆压力等相关参数应用于苏州东汇公园顶管工程, 并在现场布置沉降测点, 发现现场监测数据规律与试验结果吻合, 进一步验证了本文的结论。研究表明: 注浆后的沉降可分为土体塌陷阶段、渗透失水阶段、泥皮形成阶段和补浆抬升阶段, 其中: 土体塌陷阶段时间短, 沉降速度快; 渗透失水阶段持续时间长, 总沉降量大, 为地层沉降的主要部分; 泥皮形成阶段, 膨润土分子在泥浆-地层接触面堆积形成泥皮, 浆液不再大量向地层渗透, 使得地层沉降大幅减缓; 最后的补浆抬升阶段, 泥浆的注浆压力作用于泥皮, 对上覆土产生推力, 产生沉降补偿作用。注浆压力和注浆量的大小对最终地层沉降的影响很大, 过小的注浆压力和注浆量会增大土体塌陷和渗透失水造成的地层沉降, 而过大的注浆压力产生的过度沉降补偿作用甚至会使地表隆起。选择合理的注浆压力和注浆量对于控制地层沉降至关重要且效果显著, 可应用于现场各类顶管工程。

关键词:注浆压力; 地层沉降; 沉降机理; 岩土离心机试验; 注浆模拟系统

中图分类号:U455.47

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)05-0110-08

Centrifugal Model Test on the Influence Mechanism of Pipe Jacking Grouting Pressure on Formation Settlement

MA Xianfeng¹, ZOU Yuxiang^{1*}, LI Xianghong², HONG Bin²

(1. College of Civil Eng., Tongji Univ., Shanghai 200082, China; 2. ZYF Construction Group Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: Pipe jacking synchronous grouting is an important method to reduce formation disturbance and final settlement. In order to obtain the relationship between the grouting pressure and the final settlement, find out the reasonable grouting pressure and grouting amount in the actual project to reduce the disturbance of the surrounding stratum, and provide theoretical and experimental supports for the improvements of the synchronous grouting technology, the stratum-mud interaction and the mechanism of settlement from the perspective of the structural characteristics of soil particles and bentonite molecules were analyzed, theoretical assumptions for the four stages of settlement were put forward. Then, the geotechnical engineering centrifuges and self-developed pipe jacking projects were used to simulate the pipe jacking under different grouting pressures on-site. Through the comparative analyses of the settlement curves, the conclusions of the theoretical analysis part were verified. Finally, the relevant parameters such as the grouting pressure in the experiment were applied to the pipe jacking project in Suzhou Donghui Park and the settlement measurement points were arranged on-site, further verified the conclusions. Researches showed that the settlement after grouting can be divided into four stages: soil collapse stage, seepage loss stage, mud skin formation stage and grout uplift stage. The soil collapse stage was short

收稿日期:2020-08-31

作者简介:马险峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 岩土工程; 地下结构抗震及离心模型试验。E-mail: xf.ma@tongji.edu.cn

* 通信作者:邹宇翔, E-mail: lancer0112@tongji.edu.cn

网络出版时间:2021-08-30 10:31:00

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20210827.1402.001.html

and the settlement speed was fast. Seepage loss stage lasted for a long time and the total settlement was large, which was the main part of the formation settlement. At the mud skin formation stage, the bentonite molecules accumulated on the mud-stratum contact surface to form mud skin, and the slurry was not permeated into the stratum and the settlement of the stratum slowed down. Finally, at the grout uplift stage, the grouting pressure of the mud acted on the mud skin to push the overlying soil and produce settlement compensation. The size of grouting pressure and grouting amount had a great influence on the final settlement. Small grouting pressure and grouting amount would increase the settlement caused by soil collapse and seepage loss, while large grouting pressure would cause excessive settlement compensation effect, even could cause surface uplift. Selecting a reasonable grouting pressure and grouting amount was very important and effective for controlling stratum settlement. It could be used in various pipe jacking projects on-site.

Key words: grouting pressure; stratum settlement; settlement mechanism; geotechnical centrifuge experiment; grouting simulation system

顶管法是近年来被广泛使用的隧道暗挖工法,尤其是对于市政小直径隧道,但由于整个隧道直接顶进的特点,顶管法有相应的缺陷:1)顶管隧道与地层之间产生巨大的摩擦阻力,严重限制了顶管隧道的合理长度;2)隧道的顶进将产生很大的地层扰动(包括摩擦剪应力、地层沉降),进而给周围环境、构筑物带来安全隐患。顶管法应用和推广的关键就是要减少摩擦阻力和地层损失,而膨润土泥浆的使用就是一种至关重要的方法。通过将膨润土泥浆注入顶管隧道和周围地层之间,从而形成泥浆套,可避免顶管隧道与土层的直接摩擦,极大减小摩擦阻力和土层扰动;同时,泥浆套可填充开挖机头和后方的管片间的建筑空隙,对上方土体起到支撑的作用,从而很大程度上减小地层沉降。可以说,注浆工艺是顶管法应用和工程质量的关键,故对顶管法中注浆浆液与周围地层的相互作用,以及其影响周围地层沉降和变形的机理进行研究,是弥补顶进过程的缺陷,进一步提升顶管施工质量的重要举措。

顶管施工对地层沉降的影响研究方面,国内外学者已从顶管机土压力、土体损失、侧向摩擦阻力等因素进行了分析,已有较为成熟的研究成果^[1-9]。在顶管工程中应用膨润土泥浆方面:Victor等^[10]从膨润土分子结构的微观角度分析了膨润土泥浆的高溶胀性、高触变性;Au等^[11]利用理论分析和试验的方法发现,膨润土泥浆即使在低浓度下仍然有较高的黏度和屈服应力,呈现假塑性流体的性质;Mirarab^[12]、Jeong^[13]通过试验方法发现了泥浆不同参数对其流变性质的影响,为泥浆护壁的应用提供了重要依据,也为研究泥浆与地层的互相作用提供了重要的理论支撑。注浆研究方面:李方楠等^[14]等提出考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形的计算方法;魏纲等^[15]通过微观理论分析研究了顶管注浆过程减摩作用机理;Xu等^[16-17]利用模型试验方法研究了泥浆渗透机理和渗透特性;Cui^[18]、Min^[19]等通过模型试验对泥浆渗透过程进行研究,发现只有少量的膨润土分子进入土层,验证了泥饼的存在和形成机理;Wen^[20]、

王双^[21]等从理论角度分析,认为注浆压力的大小会施加在周围土层上,造成周围土层的变形和位移,并利用弹性力学半无限弹性体圆孔扩张理论计算出注浆压力造成的土层位移;丛茂强等^[22]通过数值模拟方法分析了在不同注浆压力作用下,顶管周围土体的扰动情况,并基于此提出衡量土体受扰程度的孔隙水压力变化率概念;贾远航等^[23]借助于FLAC3D软件建立矩形顶管法施工的数值仿真模型,发现随着注浆压力的提高,土体最大沉降值不断减小;黄宏伟等^[24]采用3维数值分析方法,对正面推力、地层损失、注浆压力等因素进行模拟,得出上述因素影响曲线变化规律;Namli等^[25]利用模型试验方法研究不同注浆压力对顶管摩擦阻力的影响,发现泥浆注入土层后会在土中渗透并形成泥皮,且注浆压力对摩擦阻力的影响不大。总体来说,注浆压力对顶管施工引起地层沉降的影响研究仅有一些理论分析和数值模拟方面的研究,较少涉及模型试验,尚未形成系统性的理论。基于此现状及顶管施工的实际需要,本文采用岩土离心模拟试验技术,通过自主研发的顶管注浆模拟系统,对顶管施工的顶进和注浆过程进行模拟,通过改变注浆压力研究顶管最终地层损失的规律,为顶管工程沉降影响控制方面提供理论和试验依据。

1 泥浆和地层的相互作用

1.1 泥浆与地层的性质

土体是由各种不规则形状的土体颗粒组成的集合体,这些土体颗粒的分布往往没有明显规律,颗粒之间存在大量孔隙,并通过内摩擦力和黏聚力(通常是黏土颗粒之间的分子间作用力和电荷力)维持土体的强度和形状。在饱和的情况下,土体中的孔隙会被水充满,并存在着孔隙水压力 γ_w 。顶管工程中使用的膨润土泥浆是一种由水、膨润土、少量添加剂构成的悬浊液,其中:膨润土是以中间为铝氧八面体、上下为硅氧四面体所组成的3层片状结构的蒙脱石晶体的形式存在;同时,因为晶片之间的结合能较低,有较强的离子交换能力,水分子很容易渗透进晶片

层之间,使整个晶体的体积扩大数倍,呈现出很强的吸水膨胀性。

1.2 泥浆地层互相作用与地层沉降

当以一定的压力将泥浆注入管片周围的建筑空隙,膨润土泥浆会与有着大量孔隙的地层表面直接接触;通过分析膨润土泥浆颗粒与土体表面的结构特性,结合现场注浆过程和沉降数据,可将两者的互相作用分为4个阶段:

1)土体塌陷阶段。由于顶管掘进机和后方顶管尺寸存在建筑空隙,上方土体在顶管刚顶进时失去顶管掘进机的支撑,同步注浆无法在短时间内充满建筑空隙以支撑土体,导致部分土体在自重的作用下发生塌陷,产生大量沉降。

2)渗透失水阶段。浆液充满部分土体塌陷后,剩余的 建筑空隙由于注浆压力 p 往往要大于孔隙水压力 γ_w (通常注浆压力 p 会大于上覆水土合算压力 γ),泥浆会通过土层表面孔隙大量渗透进土层。由于膨润土分子在水中有很强的膨胀性,同时,土体颗粒之间的孔隙很小,在渗透过程中只有泥浆中的自由水和少量蒙脱石颗粒进入孔隙,大部分蒙脱石颗粒和其附着水会留在土层表面。此阶段中,泥浆大量失水会导致体积大幅度减小,建筑空隙始终处于不饱和状态,失去了对土体的支撑作用,在自重的作用下,上方土体产生大量地层沉降。

3)泥皮形成阶段。随着渗透的进行,片状的蒙脱石颗粒在土层表面不断堆积,并在注浆压力的作用下不断压实挤密形成结构,最终在地层表面形成致密的、透水性很小的泥皮。泥皮的渗透系数非常小,在短时间内可忽略其渗透作用。这时注入的泥浆就会逐渐填充建筑空隙形成泥浆套,最终形成管片-泥浆-地层结构,使地层沉降趋于稳定。

4)补浆抬升阶段。泥浆套形成之后,如果注浆压力仍然存在并有足够的注浆量使浆液能始终充满建筑空隙并与地层接触,原本作为渗透动力的注浆压力将会作用于泥皮,并由泥皮传递到土骨架上,转换为对土体的有效应力;由于注浆压力 p 往往大于上方地层土压力 γ ,附加应力 $p-\gamma$ 会使上方土体发生变形和位移。

为验证上述理论分析,进一步了解其中的规律,总结膨润土泥浆对顶管施工效应的影响特征,采用离心模型试验进行多工况研究,并对结果进行深入分析。

2 试验原理和方法

2.1 岩土离心模拟试验基本原理

岩土工程中,土和结构相互作用的研究主要通

过试验手段或现场监测数据反馈。一般而言,全尺度的模型试验由于成本高和实施困难等缺陷而较少被用于分析复杂条件下的岩土工程问题。缩尺试验因为能够在试验室进行且工况和参数等便于控制,而被广泛应用于岩土工程的研究中。离心模型试验作为一种缩尺试验,将模型放置于离心机转臂末端的吊篮上,高速旋转过程中模型受到 Ng (N 为离心机全局相似比, g 为重力加速度)的离心力,弥补了模型缩小 $1/N$ 所导致的自重应力损失,使得模型中土体和构件能够重现实际工程中的应力水平,很好地模拟现场工况,从而获取的结果具有很大的参考意义。

2.2 离心机和相关参数

试验设备采用TLJ-150岩土离心试验机,如图1所示。

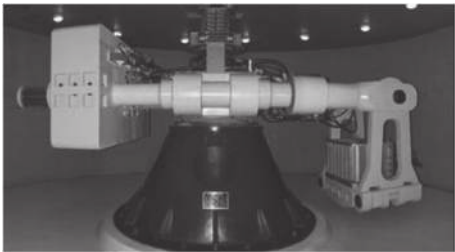


图 1 TLJ-150复合型岩土离心试验机

Fig. 1 TLJ-150 composite geotechnical centrifuge

试验模拟的工况为软黏土地区的矩形顶管开挖,顶管开挖段上覆覆土厚4 m,属于浅覆土地层开挖工况;顶管管片横截面尺寸为6.9 m×5.0 m;地下水水位与土层表面齐平;离心机全局相似比 N 取40(在40倍重力下进行试验),离心机全局相似比确认后,通过量纲分析法推导求解出试验相关的其他物理量如表1所示。

表 1 相关物理量相似比

Tab. 1 Similarity ratios of related physical quantities

物理量	相似比(模型:原型)
长度	1:40
密度	1
应力	1
应变	1
运动速度	1
摩擦系数	1
孔隙比	1
固结时间	1:1 600

2.3 顶管工程注浆模拟系统

顶管工程注浆模拟系统是一个较为复杂的试验系统,主要用于模拟现场顶管工程同步注浆的过程,如图2所示,主要由顶进开挖系统、同步注浆系统、测量系统3部分组成。

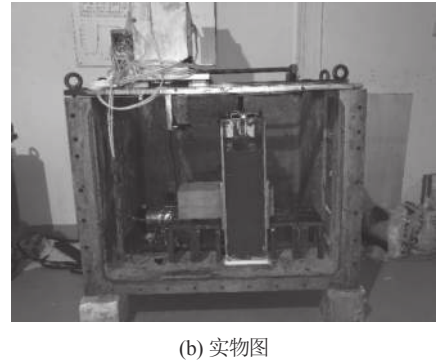
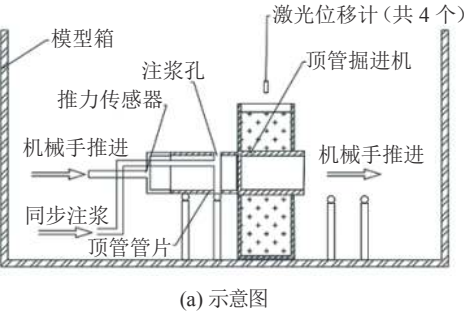


图 2 顶管工程注浆模拟系统

Fig. 2 Pipe jacking project grouting simulation system

顶进开挖系统由机械手、钛合金传力架、顶管模型组成。机械手为岩土离心机试验室专用设备, 可通过控制室控制面板在离心机运作时控制机械手推动或拉动模型箱内的物体。钛合金传力架为一个由钛合金制作的、重量轻(减小试验误差)、强度高(防止顶力过大破坏)的传力框架结构, 置于机械手和顶管模型中间, 其横截面尺寸能与顶管模型精密且完美地贴合, 将机械手产生的集中推力转换为在顶管截面上的均匀分布力, 精确还原顶管工程现场千斤顶给顶管管片施加的顶进力。顶管模型为两端矩形顶管, 为还原顶管管壁与泥浆之间的互相作用及摩阻力, 顶管模型为内嵌钢筋的混凝土现浇模型, 分为两段: 第1段截面封闭, 横截面尺寸稍大, 置于前方模拟顶管工程的开挖机; 第2段截面不封闭, 截面尺寸稍小, 用于模拟顶管管片。两段模型的横截面尺寸不同, 可以用于模拟顶管开挖机和后方顶进的顶管管片间的建筑空隙。试验中, 通过操控机械手顶进顶管管片, 此时前方顶管机段会被逐渐顶出模型箱, 模拟土层的开挖; 后方的顶管管片段则被顶进模型箱中的土层, 模拟顶管管片的顶进; 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。离心机气路为离心机内置通道, 能产生 0~1 MPa 压强的气体, 离心机将固定压强的气体与液缸的一端相连, 并将同步注浆使用的泥浆填充进液缸另一端。在中间设置电磁阀, 通过电磁阀的开关实现注浆的开始和结束, 并通过调整气体压强调整

注浆压力, 以减小误差, 使得注浆压力为气体压强。密封环模拟现场洞口防水卷材装置, 由固定的铁片、高弹性的硅胶板组成, 其被顶管管片模型顶进时会被弯曲而产生很强的弹力, 与顶管模型紧密贴合, 从而防止泥浆从建筑空隙中流出。

测量系统是在模型箱上端以隧道中线为轴, 向一边每隔一定的距离放置 4 个激光位移计, 全程记录土层表面沉降情况, 并形成隧道最终的沉降曲线。

2.4 试验操作方法

试验操作步骤可分为配制泥浆、预压固结、电机顶进、同步注浆、测量数据 5 个步骤, 总共进行 4 组试验, 具体参数见表 2。

表 2 注浆模拟试验参数

Tab. 2 Parameters of grouting simulation experiments			
试验编号	注浆压力/kPa	注浆量	沉降观测点
1	80	同步注浆, 最终达到浆液饱和为止	距中轴线 0、80、160、240 mm, 共设置 4 个
2	120		
3	160		
4	240		

为保证数据的可靠性, 将剔除个别明显异常的数据; 若数据样本整体发生异常, 将进行多次相同试验, 比较分析后取值。同时, 每组试验结果都与 PLAXIS 3D 数值模拟结果对比分析, 在数值和总体趋势相差不大的前提下采用本文的试验结果。

3 试验结果与分析

3.1 同步注浆过程与机理

试验中, 整个顶进过程持续 20 min, 前 15 min 管片顶进, 后 5 min 补浆稳定, 因此, 试验数据范围大。为使曲线更加清晰, 便于分析, 选取开挖至测点附近, 即顶进 430~570 s 时, 管片中轴线沉降和顶进时间的数据绘制成曲线, 如图 3 所示。

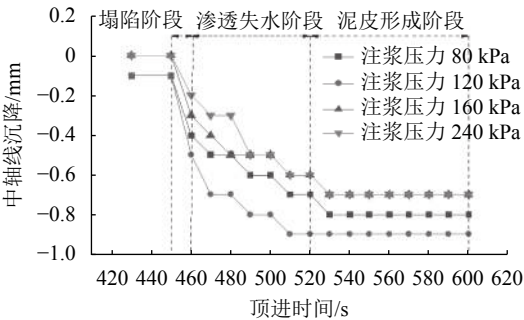


图 3 顶管中轴线沉降随顶进时间变化关系(开挖阶段)
Fig. 3 Change of the center axis settlement of the pipe jacking with the jacking time (excavation stage)

由图 3 可知: 开挖至测点前, 有 3 组试验数据已有 0.1 mm 的沉降, 这是由于已开挖部分地层沉降对测

点处有影响,但影响不大。当开挖至测点,即顶进时间450 s时,地层先是在短时间内发生大量沉降,且沉降量有所差异,这是由于开挖至新断面时,由于注浆需要一定的时间才能将建筑空隙填满,而上方土体在这段时间内失去支撑时发生一定量的塌陷,该段沉降为土体塌陷沉降。由于在不同注浆压力下,浆液注入速度也不同,所以注浆压力越大,浆液越早能填满间隙,起到支撑作用,上方土体塌陷沉降量越小。

顶进460~520 s期间,地层沉降以速度逐渐减小的趋势持续发生,该段沉降是由泥浆失水导致的。在泥浆填满建筑空隙后,泥浆与地层直接接触。由于注浆压力大于地层孔隙水压力,浆液将通过地层孔隙大量渗透,泥浆体积减小,地层随之发生沉降,该段沉降为渗透失水沉降。值得注意的是,泥浆失水造成的总沉降量很大,约0.4~0.5 mm(相当于现场的16~20 mm),该沉降主要是由于泥浆渗透体积减小的同时没有浆液补充或补浆量不够,可见施工时及时补浆会对沉降控制有一定的效果。

由于蒙脱石颗粒会在地层表面堆积,逐渐封堵渗流通道并最终形成泥皮,阻止泥浆继续向地层内渗透,故从数据上也可发现沉降的速度在逐渐减小并在520 s后基本停止沉降,该阶段为泥皮形成阶段。

在顶进15 min之后,开始对整个建筑空隙进行补浆,补浆阶段的轴线沉降和顶进时间的关系见图4。由图4可知:4组数据趋势差异大。试验1沉降基本不变;试验2~4都有不同程度的抬升,且注浆压力越大,地层抬升越大,试验4甚至抬升至地层隆起,该阶段为补浆抬升阶段。在形成泥皮停止渗透后,继续进行注浆,原来作为泥浆渗透动力的注浆压力将会作用于泥皮,并通过泥皮作用于土骨架,转换为对上方土体的应力;由于土体顶面为自由面,该应力使注浆区域上方土体发生压缩的同时使整个地层抬升,在土体不被注浆压力破坏的情况下,注浆压力越大,造成的抬升越大,补浆对地层的沉降补偿作用也越明显。

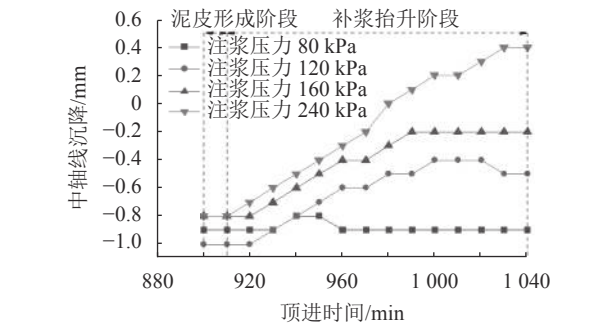


图 4 顶管中轴线沉降随顶进时间变化关系(补浆阶段)
Fig. 4 Change of the center axis settlement of the pipe jacking with the jacking time (filling stage)

3.2 注浆压力与地层沉降

图5为试验最终沉降(试验数据只有曲线的左半边,为使沉降曲线更直观,轴对称补全曲线右边边)。试验1曲线变化规律基本符合Peck曲线等常规沉降曲线;随着注浆压力上升,中轴线附近的注浆区域(± 85 mm之间)发生明显抬升,非注浆区域的抬升量不大,可见注浆的补偿作用只发生在注浆区域上方,对于沉降槽边缘部分效果不明显。提取各工况的注浆压力与轴线最大沉降值,并绘制成曲线,见图6(由于缩尺尺寸等问题无法实现快速补浆,导致泥浆失水阶段沉降过大,但不影响沉降规律),可见注浆压力对最终沉降影响较大,两者呈正相关非线性关系。

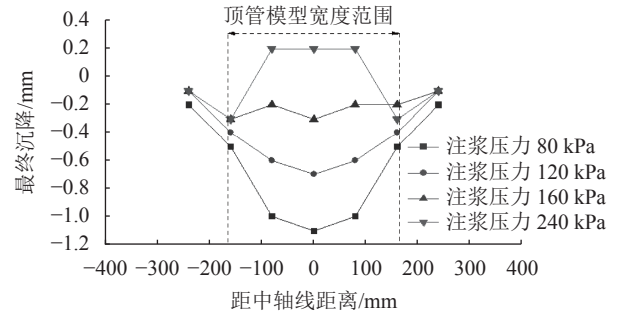


图 5 各注浆压力下地层最终沉降
Fig. 5 Final settlement of the formation under various grouting pressures

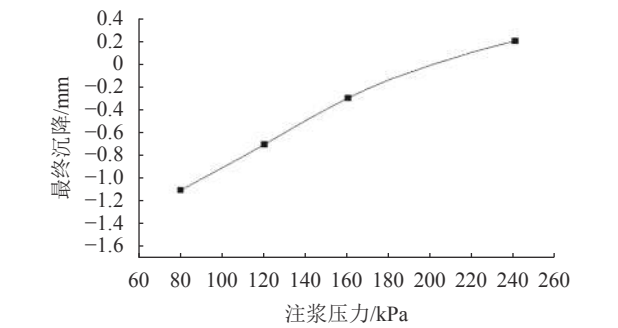


图 6 中轴线最终沉降随注浆压力变化关系
Fig. 6 Relationship between central axis final settlement and grouting pressure

3.3 注浆压力与注浆量

表3为各工况的注浆压力和注浆量关系。
表 3 注浆压力和注浆量关系

Tab. 3 Relationship of grouting pressure and grouting volume			
注浆压力/kPa	注浆压力:覆土压力	注浆量/mL	注浆量:建筑空隙
80	1.0	710	1.58
120	1.5	860	1.91
160	2.0	1 020	2.27
240	3.0	1 270	2.82

由表3可知:由于泥浆渗透作用,在各种注浆压

力下, 注浆量远大于建筑空隙体积; 注浆压力大时, 注浆量几乎接近建筑空隙的3倍。试验的注浆方式为持续注浆, 由上述分析可知注浆量不充足会导致上方地层坍塌、泥浆失水、无法发生沉降补偿作用等, 对地层沉降造成不利影响。上述试验数据可供现场施工参考。

4 现场数据对比

试验依托苏州东汇公园顶管工程, 并在现场布置设备进行沉降测量, 便于将理论试验与现场数据进行研究对比。现场为矩形顶管, 尺寸为6.9 m×5.0 m, 每节管片长1.5 m, 土层为黏土地层, 覆土高度4 m。现场注浆方式为同步注浆并间断补浆, 注浆压力为300 kPa (约为上覆土压力的3倍), 最终管片中轴线地层沉降随顶进长度的关系曲线如图7所示。由图7可知: 当顶管机开挖到测点处, 地层在顶进距离为8.1~18.5 m时, 逐渐发生沉降, 即图7中土体塌陷阶段和失水渗透阶段, 土体塌陷沉降速率快, 沉降量大, 持续时间短, 曲线负斜率较大; 土体塌陷之后, 发生持续的失水渗透, 沉降速率变缓并逐渐形成泥皮, 为图7中曲线负斜率较小且不断变小的一段, 并逐渐过渡到泥皮形成阶段, 停止渗透和沉降; 顶进30 m后, 该段注浆已形成泥皮, 此时, 持续的高注浆压力补浆使得注浆压力通过泥皮作用于上方土层, 使地层发生明显抬升, 最终导致地层隆起约15 mm, 过大的注浆压力使沉降产生了过度的补偿, 这与试验中结论一致。

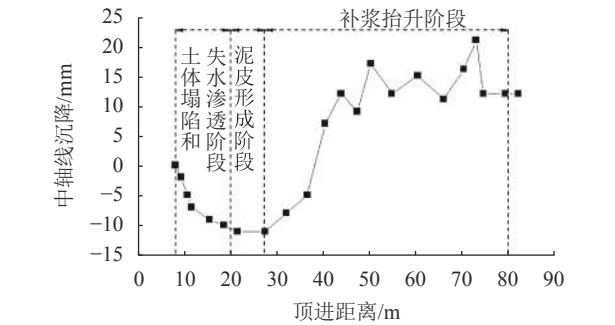


图 7 现场中轴线地层沉降随顶进长度的关系曲线
Fig. 7 Relationship between the center axis formation settlement and the jacking length

图8为各项顶进距离时的沉降曲线。由图8可知: 从开挖至测点到顶进30 m这一时间段, 各测点均发生了一定的沉降。在补浆之后, 也就是最终沉降曲线, 补浆区域(±3.45 m)附近发生明显抬升, 并最终隆起约15 mm; 同时, 非补浆区域影响不大, 即注浆沉降补偿作用只发生在注浆区域附近, 验证了试验的结论。工程最终总注浆量为160 m³, 建筑空隙为53.37 m³, 注浆量为建筑空隙的3倍。

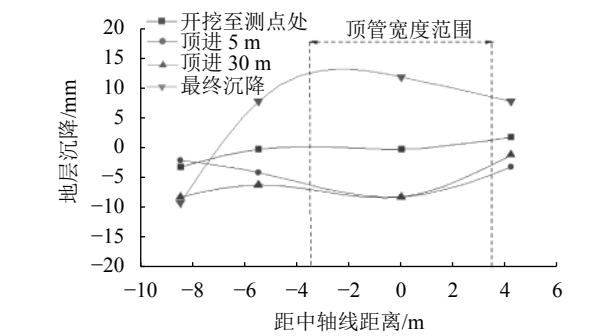


图 8 现场各项顶进距离时的沉降曲线
Fig. 8 Settlement curves at each jacking distance on site

5 结 论

本文采用岩土工程离心机设备和自主研发的顶管工程注浆模拟系统, 对矩形顶管工程在不同注浆压力下的地层沉降进行了模拟试验, 对地层沉降的过程和机理进行了研究, 发现注入的泥浆与地层存在的相互作用可分为土体塌陷阶段、渗透失水阶段、泥皮形成阶段和补浆抬升阶段。土体塌陷阶段, 土体失去下方支撑发生塌落, 在短时间内造成大量沉降; 渗透失水阶段, 泥浆中自由水大量渗透进土层发生大量沉降; 泥皮形成阶段, 渗透速率不断减小, 并最终形成泥皮, 停止渗透; 补浆抬升阶段, 注浆压力转换为对上方土体的应力, 使地层抬升, 起到沉降补偿作用。

注浆压力对地层的最终沉降影响很大。注浆压力越大, 在最后补浆抬升阶段的沉降补偿作用就越大, 最终的地层沉降就越小, 过大的注浆压力甚至会出现过度补偿作用。在本文的离心机试验和现场数据中, 注浆压力为覆土压力的3倍时, 都已出现过补偿地层的隆起现象。注浆造成的沉降补偿作用只作用在注浆区域附近, 对注浆区域之外的沉降影响不大。

不同注浆压力下, 对应的注浆量也有很大的变化。由于泥浆渗透作用, 注浆量远大于建筑空隙的体积, 在3倍覆土压力的注浆压力下, 注浆量达到了建筑空隙体积的近3倍。在施工中, 要进行充足的注浆和及时的补浆, 否则, 在泥浆渗透失水阶段会产生大量沉降, 对沉降控制造成不利影响。

在进行离心机试验的同时, 将试验中的参数运用到现场施工中, 并进行沉降测量, 通过对比发现, 现场的沉降趋势和最终的沉降曲线均与试验结果吻合, 进一步验证了本文提出的沉降机理和沉降补偿作用理论。今后可进一步深化该理论的现场应用, 用现场反馈不断完善修正, 并得出扰动最小的理想注浆压力和注浆量。

参考文献:

- [1] Wei Gang, Wu Huajun, Chen Chunlai. Prediction of settlement induced by ground loss during pipe jacking construction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 359–363. [魏纲, 吴华君, 陈春来. 顶管施工中土体损失引起的沉降预测[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2): 359–363.]
- [2] Wei Gang, Chen Chunlai, Yu Jianying. Study on calculating methods of soil vertical deformation induced by pipe jacking construction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 619–624. [魏纲, 陈春来, 余剑英. 顶管施工引起的土体垂直变形计算方法研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3): 619–624.]
- [3] Lee K M, Rowe R K. Analysis of three-dimensional ground movements: The Thunder Bay tunnel[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1991, 28(1): 25–41.
- [4] Luo Xiaobo, Zhou Jian. Computation of ground settlement induced by the pipe jacking using multivariate linear regression method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 130–134. [罗筱波, 周健. 多元线性回归分析法计算顶管施工引起的地面沉降[J]. *岩土力学*, 2003, 24(1): 130–134.]
- [5] Feng Haining, Gong Xiaonan, Xu Riqing. Finite element analysis of influence of pipe-jacking construction on environments[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(7): 1158–1162. [冯海宁, 龚晓南, 徐日庆. 顶管施工环境影响的有限元计算分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(7): 1158–1162.]
- [6] Wang Ridong. Calculating methods of soil deformation induced by rectangular pipe jacking construction[J]. *Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition)*, 2014, 32(5): 711–714. [王日东. 矩形顶管施工引起的土体变形计算方法研究[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(5): 711–714.]
- [7] Wen Suolin. A study of environmental influence caused by large section rectangular pipe jacking construction[J]. *China Municipal Engineering*, 2011(5): 37–39. [温锁林. 大断面矩形顶管施工对环境影响研究[J]. *中国市政工程*, 2011(5): 37–39.]
- [8] Deng Changmao, Peng Jimin, Shen Guohong. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1002–1007. [邓长茂, 彭基敏, 沈国红. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 1002–1007.]
- [9] Feng Haining, Wen Xiaogui, Gong Xiaonan. 2-D element analysis of environmental effect caused by pipe jacking[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2003, 37(4): 432–435. [冯海宁, 温晓贵, 龚晓南. 顶管施工环境影响的二维有限元计算分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2003, 37(4): 432–435.]
- [10] Victor A R, Clariá J J. Time dependent stress-strain behavior of bentonite slurries; effect of thixotropy[J]. *Powder Technology: An International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems*, 2016, 291: 311–321.
- [11] 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: 530–541.
- [12] Mirarab 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: 764–770.
- [13] Jeong S W. Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows[J]. *Geosciences Journal*, 2010, 14(4): 359–369.
- [14] Li Fangnan, Shen Shuilong, Luo Chunyong. Prediction approach of ground deformation induced by pipe jacking construction grouting pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1): 204–208. [李方楠, 沈水龙, 罗春泳. 考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形计算方法[J]. *岩土力学*, 2012, 33(1): 204–208.]
- [15] Wei Gang, Xu Riqing, Shao Jianming, et al. Research on mechanism of reducing friction through injecting slurry in pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 930–934. [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): 930–934.]
- [16] 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: 1–10.
- [17] Xu T, Bezuijen A. Pressure infiltration characteristics of bentonite slurry[J]. *Géotechnique*, 2018, 69(4): 364–368.
- [18] Cui W, Liu D, Song H F, et al. Development and experimental study on environmental slurry for slurry shield tunneling[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 216: 416–423.
- [19] Min Fanlu, Du Jiarui, Zhang Nan, et al. Experimental study

- on property change of slurry and filter cake of slurry shield under seawater intrusion[J].Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research,2019,88:290–299.
- [20] Wen Kai,Hideki Shimada,Zeng Wei,et al.Frictional analysis of pipe-slurry-soil interaction and jacking force prediction of rectangular pipe jacking[J].*European Journal of Environmental and Civil Engineering*,2020,24(6):814–832.
- [21] Wang Shuang,Xia Caichu,Ge Jinke.Formula for calculating the frictional resistance of pipe jacking with different forms of mud jacket[J].*Rock and Soil Mechanics*,2014,35(1):159–166.[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):159–166.]
- [22] Cong Maoqiang,Chen Jinjian,Wang Jianhua.Micro disturbance mechanism of concrete pipe-jacking with slurry pressure control[J].*Journal of Shanghai Jiaotong University*,2013,47(6):867–871.[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):867–871.]
- [23] Jia Yuanhang,Zhu Zhengguo,Ding Xiang.A study of the effect of the construction parameters of a rectangular pipe-jacked tunnel on the deformation of its surrounding earth bodies[J].*Traffic Engineering and Technology for National Defense*,2020,18(6):38–42.[贾远航,朱正国,丁祥.矩形顶管施工参数对变形的影响研究[J].*国防交通工程与技术*,2020,18(6):38–42.]
- [24] Huang Hongwei,Hu Xin.3D numerical analysis on construction mechanics effect of pipe-jacking[J].*Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2003,22(3):400–406.[黄宏伟,胡昕.顶管施工力学效应的数值模拟分析[J].*岩石力学与工程学报*,2003,22(3):400–406.]
- [25] Namli M,Guler E.Effect of bentonite slurry pressure on interface friction of pipe jacking[J].*Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice*,2016,8(2):1–9.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Ma Xianfeng,Zou Yuxiang,Li Xianghong,et al.Centrifugal model test on the influence mechanism of pipe jacking grouting pressure on formation settlement[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(5):110–117.[马险峰,邹宇翔,李向红,等.顶管注浆压力变化对地层沉降影响机理的离心模型试验[J].*工程科学与技术*,2021,53(5):110–117.]