

DOI: 10.11779/CJGE2020S2043

# 矩形管廊顶管施工对邻近管线的影响研究

张治成<sup>1</sup>, 林 思<sup>1</sup>, 王金昌<sup>\*1</sup>, 钱 晖<sup>2</sup>, 刘敬亮<sup>2</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 杭州市城市建设发展集团有限公司, 浙江 杭州 310020)

**摘 要:** 顶管施工引起的地层移动造成邻近管线产生不均匀沉降甚至破坏, 而以往研究顶管、土体与邻近管线相互作用的有限元方法大多借鉴盾构的模拟方式, 未考虑土体变形受到掘进机约束以及顶推的持续扰动作用的影响, 造成计算结果不准确。基于 Plaxis 3D 平台建立管廊、土体及邻近管线相互作用的三维有限元模型, 通过土体收缩率模拟地层损失带来的影响, 并结合实测数据提出了适用于顶管施工特点的土体收缩率的确定方法。在此基础上, 对顶管掘进参数进行敏感性分析, 总结出施工的最优掘进参数。结果表明, 基于土体收缩率模拟顶管施工的计算结果与实测数据吻合良好, 模拟可靠。与既有研究相比, 考虑了顶管施工过程中掘进机约束作用以及顶推持续扰动的作用, 这与实际工程更加接近。

**关键词:** 顶管施工; 地层损失; 三维有限元; 土体收缩; 小应变土体硬化模型; 地下管线

**中图分类号:** U 455.47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S2-0244-06

**作者简介:** 张治成(1977—), 男, 副教授, 博士, 桥梁施工控制及结构检测、桥梁结构维修加固、桥梁结构振动、人行桥舒适性研究。E-mail: jszcc@zju.edu.cn。

## Influences of pipe-jacking of rectangular utility tunnels on adjacent pipelines

ZHANG Zhi-cheng<sup>1</sup>, LIN Si<sup>1</sup>, WANG Jin-chang<sup>1</sup>, QIAN Hui<sup>2</sup>, LIU Jing-liang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Hangzhou Municipal Construction and Development Co., Ltd., Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** The ground motion caused by pipe jacking will induce uneven settlement and even damage on the adjacent pipelines. However, most previous finite element studies on pipelines-soil-tunnel interaction have used shield modeling as a reference without considering the influences of the restraint effects of the tunneling machine and continuous disturbance in the construction process of pipe jacking, resulting in inaccurate calculated results. The three-dimensional finite element model for pipelines-soil-tunnel interaction is established by using the Plaxis 3D software. The influences caused by formation loss is simulated by soil contraction, and based on the measured data, a method for determining the soil contraction suitable for pipe jacking is proposed. Then, the sensitivity analysis of the influencing factors of pipe jacking construction is carried out to summarize the optimal driving parameters of construction. The results of this study show that the calculated results are in good agreement with the measured data and the simulation is reliable. Unlike the previous researches, in this study the influences of the restraint effects of the tunneling machine and continuous disturbance in the construction process of pipe jacking are considered, which is closer to the real projects.

**Key words:** pipe jacking; formation loss; three-dimensional finite element; soil contraction; hardening-soil small model; underground pipeline

## 0 引 言

城市地下综合管廊的建设能够减少道路重复开挖, 保证城市交通畅通。然而, 管廊施工不可避免穿越地下管线, 即使采用顶管法仍会引起邻近管线产生附加变形, 因此在施工前必须评估管廊开挖对邻近管线产生的影响。而顶管掘进问题是一个大型三维非线性土-结构相互作用问题<sup>[1]</sup>, 目前有限元法作为研究该类问题最常用且最有效的手段, 能够考虑复杂的顶管

掘进过程, 但是为了简化模型, 有限元模拟时主要考虑开挖面支撑力和地层损失这两种因素<sup>[2]</sup>。开挖面支撑力通常假设为均布面荷载, 施加在开挖面土体上, 但随着计算机及传感器的发展, 现今多采用现场实测数据<sup>[3]</sup>。地层损失通常采用等效强度或等效模量法来代替注浆层, 以此填充掘进机与管片之间的空隙。赖

收稿日期: 2020-08-07

\*通信作者 (E-mail: wjc501@zju.edu.cn)

金星等<sup>[2]</sup>通过在间隙位置设置间隙单元来模拟<sup>[4]</sup>。邴风举等<sup>[5]</sup>和张文瀚等<sup>[6]</sup>采用等代层来模拟。杨金虎等<sup>[7]</sup>通过对开挖土体置空,在顶管到达时置换开挖土体为顶管和泥浆材质来模拟。Yin 等<sup>[8]</sup>考虑了掘进机的开挖空隙和尾部空隙引起的地层损失,但是仍采用等代层方式模拟注浆层。Li 等<sup>[3]</sup>采用等效强度法模拟豆砾石不同平均含量的力学效应。以上模拟方式在评价或获取等代层的模量和厚度存在一定难度。此外,等代层的模量一般通过经验取值或者通过现场实测数据反分析得到,是一个平均意义上的定值,而注浆层代表隧道周围土体与浆液的混合体,其模量的取值应与土层性质相关,统一的模量无法反映这一特征。

目前,Plaxis 软件通过定义隧道断面线收缩来反模拟盾构隧道施工工程。Lin 等<sup>[9]</sup>依据盾构机的几何尺寸设置掘进机的断面收缩值,同时在盾尾施加注浆压力,实现对盾构施工的有限元模拟。该方法较符合盾构施工的物理过程,但是应用于顶管工程的研究较少,且没有对土体收缩率的确定方式展开相关的探讨和分析。

本文基于杭州德胜路综合管廊顶管穿越三污干管的工程背景,基于 PLAXIS 3D 平台对管廊穿越三污干管的掘进过程进行仿真分析;考虑顶管施工过程中土体变形受到掘进机约束和顶进引起的持续扰动作用的影响,结合实测数据对土体收缩规律进行了合理的分析,以得到适用于顶管工程的土体收缩率确定方法。在此基础上对顶管施工影响因素进行敏感性分析,总结出施工的最优掘进参数。

## 1 工程概况

杭州市德胜路综合管廊需要下穿两条平行污水管,如图 1 所示,两者夹角为  $30^\circ$ ,管廊采用土压平衡盾构式顶管法施工。管廊分为左右两条,间距为 3 m,长度均为 106.5 m,单节长 1.5 m,外轮廓尺寸为  $7.5\text{ m} \times 5.4\text{ m}$ ,厚度为 0.55 m,钢筋混凝土设计强度为 C50。管廊上部的污水管为预应力钢筒混凝土结构(简称 PCCP 管),内径约为 2.2 m,壁厚约为 0.22 m,两者最小间距为 4.25 m,污水管位于黏质粉土和砂质粉土中,管廊位于砂质粉土和粉砂夹粉土层中,如图 2 所示。

顶管施工采用的掘进机尺寸为  $7.52\text{ m} \times 5.42\text{ m}$ ,施工顺序为先左后右。为了监控顶管施工过程中污水管的变形行为,根据顶管施工土体扰动影响区<sup>[10]</sup>确定监测范围(距离顶管轴线约 24.2 m),沿污水管长度方向布置沉降监测点,测点间距约 3 m。如图 1 所示。平行双线隧道贯通后最大沉降点一般位于两隧道中心

线上<sup>[9]</sup>,即东侧污水管 SE 和西侧污水管 SW(图中灰色标记)。

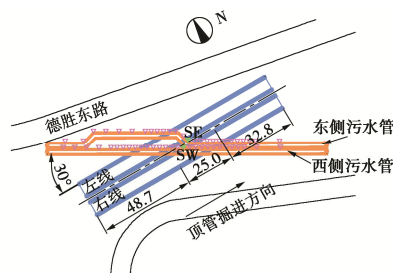


图 1 管廊与污水管平面相对位置关系及监测点分布

Fig. 1 Horizontal relative position between utility tunnel and sewage pipes, and plan of monitoring

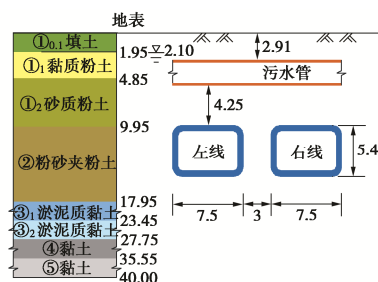


图 2 管廊与污水管纵断面相对位置关系及地层分布

Fig. 2 Vertical relative position between utility tunnel and sewage pipes, and geological profile

## 2 三维有限元分析

### 2.1 有限元模型的建立

如图 3 所示。模型计算宽度为 5 倍管径;模型的计算长度取顶管长度;结合实际工况以及土层分布情况,尺寸设置为  $106.5\text{ m} \times 90\text{ m} \times 40\text{ m}$  ( $x \times y \times z$ )。模型共划分为 173410 个节点,112915 个单元。

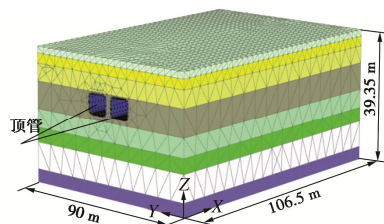


图 3 三维网格划分

Fig. 3 3D FEM mesh

如图 4 所示,管廊管片及掘进机采用板单元模拟,各向同性线弹性材料。掘进机弹性模量为 206 GPa;管片弹性模量为 34.5 GPa,厚度为 0.55 m,重度为  $24\text{ kN/m}^3$ 。设置界面单元表示掘进机、管片与土体相互作用,界面单元的强度折减因子取 0.67<sup>[11]</sup>。假设管片连续连接;有限元模拟时不考虑土体时间效应,只考虑顶进和开挖空间距离的变化<sup>[12]</sup>。

污水管采用嵌入梁单元。一方面污水管的受力情

况与梁近似, 且采用梁单元模拟减小了实体网格, 便于计算; 另一方面嵌入梁单元不仅反映污水管与土体之间的相互作用, 还能模拟梁、土之间的界面剪切力, 并遵循与法向应力有关的库伦准则。数值计算时, 污水管简化为均匀混凝土管, 外径 2.64 m, 内径 2.2 m, 重度为 25.2 kN/m<sup>3</sup>, 弹性模量取 23.33 GPa。模型的边界条件: 模型上表面采用自由边界, 下表面限制  $x$ ,  $y$ ,  $z$  3 个方向的位移, 其余各表面都限制法向位移。

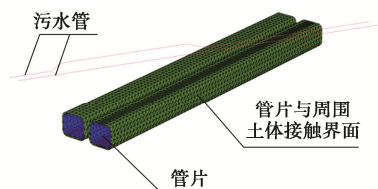


图 4 管廊及污水管模型图

Fig. 4 Model for utility tunnel and sewage pipe

## 2.2 土体模型及计算参数

土体采用实体单元, 选用 HSS 本构模型。模拟时假设土层均匀分布, 厚度取平均厚度。刚度参数选用替代参数压缩指数  $C_c$  和回弹指数  $C_s$  [11]; 有效黏聚力  $c'$  和有效内摩擦角  $\varphi'$  则借鉴其他文献中的试验结果进行取值 [13-14]; 其余参数含义及取值参考文献 [11]。  $m$  为刚度应力水平相关幂指数, 砂土和粉土一般取 0.5; 对于黏性土, 取 0.5~1。  $R_f$  表示破坏比, 建议取 0.9。  $p^{ref}$  为参考围压, 取 100 kPa。  $K_0$  为静止侧压力系数, 采用公式  $(1 - \sin \varphi')$ 。加卸载泊松比  $\nu_{ur}$  取 0.2。对于砂土,  $\varphi' > 30^\circ$  时  $\psi$  取  $(\varphi' - 30^\circ)$ ,  $\varphi' < 30^\circ$  时  $\psi$  取  $0^\circ$ ; 对于黏性土,  $\psi$  一般取为  $0^\circ$ 。  $\gamma_{0.7}$  建议取值  $2 \times 10^{-4}$ 。

最终确定土层参数见表 1。

## 2.3 施工过程仿真分析

顶管施工时先左后右。左线施工时为了避免发生流砂、管涌等危害, 采用边降水边顶推的方式, 之后通过注浆孔向土体中注入膨润土减小沉降。仅有污水管的累计沉降的实测数据作为分析依据, 不足以支撑进行左线精细化分析, 且不利于分析顶管施工引起的污水管的变形规律, 故而主要针对右线展开顶管施工引起污水管的变形研究。根据现场施工情况设置计算工况, 共分为 4 个阶段: ①平衡地应力; ②既有污水管的开挖; ③左线顶管开挖; ④右线顶管开挖。本文对右线顶管施工进行详尽地仿真模拟, 掘进步长 1.5 m。顶管施工时, 管片拼装在工作井中而不在掘进机尾部, 故而在模拟时掘进机与后续管片为连续连接, 这与盾构模拟方式 [9] 有所区别。

根据现场施工实测值在开挖面施加荷载来模拟支护压力, 最大为 101.5 kPa, 增长梯度为 6.5 kPa/m。

地层损失通过 Plaxis 平台提供的土体收缩率来模拟 [11]。根据地层损失主要与掘进机尾部空隙有关, 并且受到掘进机的约束作用, 故而针对土体收缩率变化的位置设置 2 个模拟方案: ①从掘进机头部设置渐变段; ②从掘进机尾部设置渐变段。前者基于掘进机四周不能注浆减摩, 在掘进机穿过土层时周围土层会在摩擦力作用下受到扰动而引起土体变形; 后者基于掘进机与后续管片的管径差引起的地层损失所占比重大, 且掘进机刚度较大, 可忽略掘进机范围内的土体变形。此外, 根据顶管机与后续管片之间的管径差计算得到土体收缩率为 0.6%, 将土体收缩率设置为  $0.6\% \pm 0.1\%$ ; 根据掘进机长度为 6 m, 设置渐变段长度  $6\text{ m} \pm 1.5\text{ m}$ 。如图 5 所示。

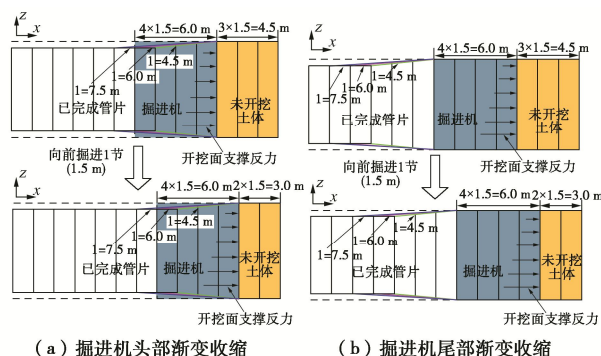


图 5 顶管施工逐步掘进示意图

Fig. 5 Schematic illustration of step-by-step excavation sequence for new pipe-jacking

## 2.4 有限元模拟结果分析

如图 6 所示, 方案 1 计算结果明显大于实测结果; 同时发现当土体收缩率一定时, 随着渐变段长度的减小, 测点的最大累计变形越大; 测点的累计沉降随着土体收缩率的增加也在增大。如图 7 所示, 方案 2 的测点变形变化规律与方案 1 相似, 但是, 可以明显发现方案 2 的计算结果更接近于实测值, 其中开挖至 60 m 时, SE 测点的实测值为 -4.33 mm, 方案 2 的  $6\text{ m}+0.6\%$  计算值为 -4.60 mm; SW 测点实测值为 -9.79 mm, 方案 2 的  $6\text{ m}+0.6\%$  计算值为 -9.29 mm, 所以依据管径差设置土体收缩率, 依据掘进机长度设置渐变段长度是可行的。

在方案 2 (渐变区域长 6 m, 最大土体收缩率为 0.6%) 基础上预测右线贯通后污水管的变形。如图 8 所示。对比计算值与实测值, 可以发现实际施工时, 在顶管穿出某一断面后, 后续管节依然在千斤顶作用下持续穿过该断面, 使得该断面也受到顶管施工带来的持续扰动作用, 引起沉降进一步增加, 而计算结果没有该情况。



表 1 各土层土体参数取值表

Table 1 Soil parameters											
土体名称	$\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$e$	$w$ /%	$c'$ /kPa	$\phi'$ ( $^{\circ}$ )	$C_s$	$C_s$	$E_{50}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	$G_0^{\text{ref}}$ /MPa
①01 素填土	—	—	—	6	28	—	—	8	8	24	40
①1 黏质粉土	19.1	0.809	28.1	2	28	0.0574	0.008	8.85	7.08	45.72	90.64
①2 砂质粉土	19.5	0.704	25.5	0	28	0.0443	0.005	10.92	8.73	69.64	102.7
②粉砂夹粉土	19.5	0.733	24.8	0	28	0.0337	0.0044	13.73	10.98	75.7	114.33
③1 淤泥质黏土	17.6	1.22	42.7	7	26	0.2575	0.0808	2.26	1.81	5.18	40
③2 淤泥质黏土	17.6	1.215	42.6	7	26	0.2575	0.0808	2.24	1.79	5.15	40
④1 黏土	18.9	0.901	31.3	4	28	0.0755	0.0134	5.7	5.7	28.5	57
⑤黏土	19.0	0.704	31.9	4	28	0.0809	0.0145	5.4	5.4	27	54

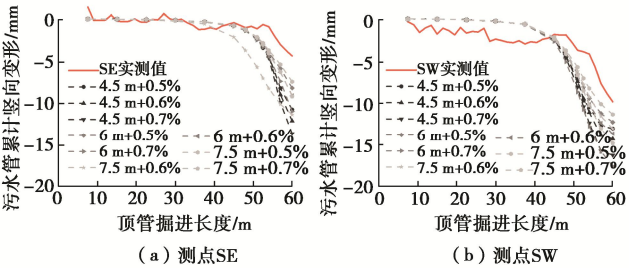


图 6 开挖至 60 m 时方案 1 计算值与实测值对比图

Fig. 6 Comparison between calculated and measured values for scheme No. 1 after excavation of 60 m

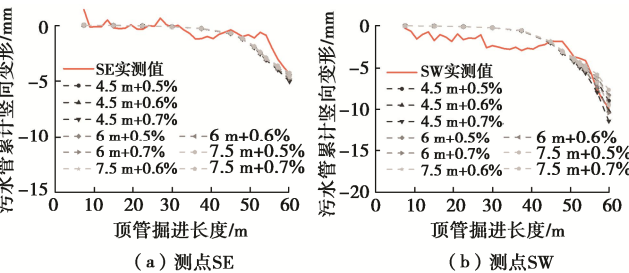


图 7 开挖至 60 m 时方案 2 计算值与实测值对比图

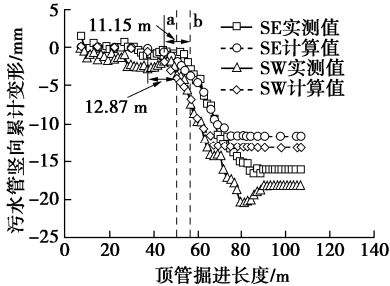
Fig. 7 Comparison between calculated and measured values for scheme No. 2 after excavation 60 m

在图 8 结果上通过设置不同持续扰动区的土体收缩率 (0.7%, 0.8%, 0.9%, 1.0%) 探究持续扰动对应的土体收缩率大小。如图 9 所示, 测点 SE 和测点 SW 土体收缩率分别为 0.9%和 1.0%时计算值与实测值较为接近; 但是持续扰动区的计算结果比实测结果增长速率不一致, 这可能由于计算时持续扰动的土体收缩率固定不变, 而实际施工时应逐步增加到某一数值。在持续扰动段设置累加长度后, 即持续扰动区长度设置为 25 m (下穿区域长度), 土体收缩率 1.0%进行预测。如图 10 所示, 设置累加长度后计算值与实测值吻合, 说明设置累加长度为下穿区域长度合理。

3 顶管掘进参数优化分析

3.1 开挖面支撑力

通常开挖面支撑力过大引起前方土体发生隆起, 过小引起前方土体发生沉降。以污水管最大沉降点为以实测值  $p_0$  (101.5 kPa) 为基准, 分别计算掌子面支撑力为  $0.1 p_0$ ,  $0.5 p_0$ ,  $1.5 p_0$ ,  $2 p_0$ ,  $2.5 p_0$ ,  $3 p_0$  时



注: a 代表顶管到达测点 SW 所在断面、b 代表顶管到达测点 SE 所在断面。

图 8 右线贯通时污水管计算值与实测值对比图  
Fig. 8 Comparison between calculated and measured values after completion of right line

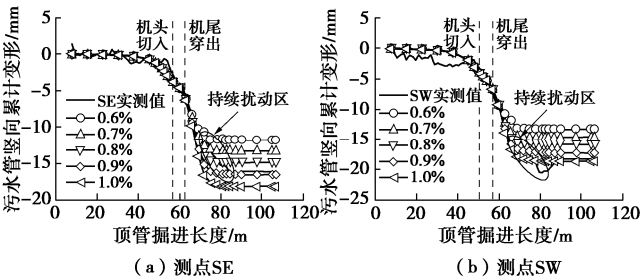


图 9 添加持续扰动作用的计算值与实测值对比图  
Fig. 9 Comparison between calculated and measured values after adding continuous disturbance

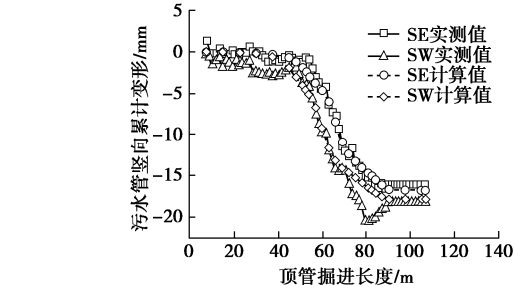


图 10 设置累加长度的计算值与实测值对比图  
Fig. 10 Comparison between calculated and measured values after setting cumulative length

顶管施工对污水管的影响。如图 11 所示, 随着开挖面支撑力的增加, 污水管的沉降都呈减小的趋势, 且斜率也逐渐减小, 在  $2 p_0$  后曲线接近水平, 说明当开挖面支撑力大于  $2 p_0$  之后再增加支撑力, 沉降减小效果不佳, 因此选用开挖面支撑力为  $2 p_0$  为最佳支撑力。

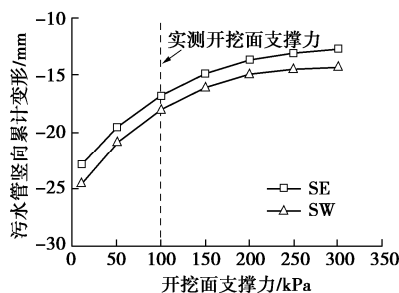


图 11 污水管竖向累计变形随开挖面支撑力变化曲线

Fig. 11 Accumulated settlements of sewage pipes under different face supporting pressures

基于该开挖面支撑力，探究其施加在下穿前（顶管掘进 45~51 m）、下穿中（51~60 m）、下穿后（66~72 m）的改善效率。如图 12 所示，以测点 SE 为例，将最佳支撑力分别施加在测点 SE 下穿前、中、后 3 个位置，发现施加在下穿前测点 SE 的累计沉降明显减小，而施加在下穿中、后测点 SE 的累计沉降几乎没有减小，由此可见，在穿越污水管之前将支撑力提升至 2 倍实测掌子面支撑力时改善效率最佳。

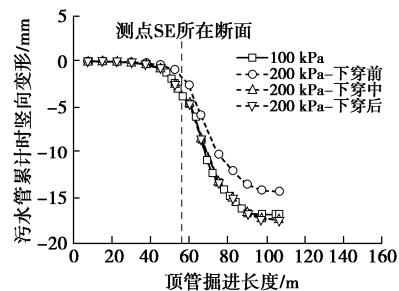


图 12 污水管竖向累计变形随开挖面支撑力位置关系曲线

Fig. 12 Accumulated settlements of sewage pipes at different positions of face supporting pressure

3.2 土体收缩率

为了探究土体收缩率与污水管竖向变形之间的关系，计算不同土体收缩率为 0.2%~1.0%时污水管的沉降（为了简便计算此阶段不考虑持续扰动）。如图 13 所示，以测点 SE 为研究对象，顶管距离测点所在断面较远时，污水管变形较小，且随着土体收缩率的增加变化不大；当顶管逐渐穿过测点 SE 所在断面时，

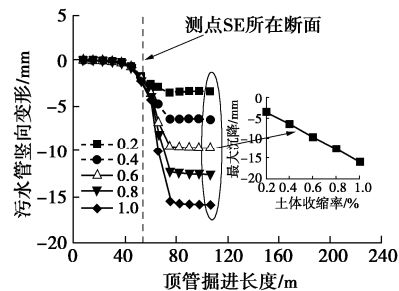


图 13 顶管逐步掘进过程中污水管竖向累计变形随土体收缩率变化曲线

Fig. 13 Accumulated settlements of sewage pipes during

step-by-step excavation under different soil contraction

污水管的变形随着土体收缩率的增加呈线性增加，增长率大致为土体收缩率每增加 0.1%，污水管最大沉降增长 1.66 mm 因此，在顶管穿越污水管阶段，应严格控制出土量，做好同步注浆措施，一方面弥补因管径差引起的地层损失，另一方面减小摩阻力，降低顶管顶进过程中的持续扰动，最终使污水管变形满足相关规范要求。

4 结 论

本文基于 Plaxis 3D 平台建立三维有限元模型，结合实测数据提出了适用于顶管施工特点的土体收缩率的确定方法。与既有研究相比，考虑了顶管施工过程中掘进机约束作用以及顶推持续扰动的作用，这与实际工程更加接近。根据计算结果，可以得出以下结论。

(1) 针对具有注浆孔的矩形顶管工程，基于土体收缩率和开挖面支撑力的有限元模拟方式对于模拟顶管施工对邻近管线的影响是可行的。

(2) 结合现场实测数据，土体位移受到掘进机约束的范围大致为掘进机长度，最大土体收缩率可通过掘进机与后续管片的管径差求得，持续扰动的影响范围大致为顶管与地下管线相交区域的长度。

(3) 开挖面支撑力不合适时会引起邻近管线隆起或沉降，且随着开挖面支撑力越小，引起沉降增加的斜率越大。根据减小沉降的效果，确定最佳支撑力为 2 倍开挖面土压力大小，且施加在穿越污水管之前效果最佳。

(4) 位于顶管与污水管相交区域的变形受到土体收缩率的影响较大，随着土体收缩率的增加，污水管竖向变形呈线性增加，因此顶管施工过程中应严格控制出土量，防止超挖引起土体收缩率增加；同时做好尾部注浆减摩措施，降低因持续扰动引起的土体收缩率的增加量。

参考文献:

[1] MROUEH H, SHAHROUR I. A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 38 - 45.

[2] 赖金星, 王开运, 侯丹丹, 李锋宁. 砂土地层顶管施工土体变形规律三维数值分析[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(4): 450 - 457. (LAI Jin-xing, WANG Kai-yun, HOU Dan-dan, et al. 3D numerical analysis on displacement regularity of pipe jacking sewer in sand soil stratum[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015,

- 35(4): 450 - 457. (in Chinese))
- [3] LI C, ZHONG Z L, HE G N, et al. Response of the ground and adjacent end-bearing piles due to side-by-side twin tunnelling in compound rock strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **89**: 91 - 108.
- [4] 魏 纲, 朱 奎. 顶管施工对邻近地下管线的影响预测分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 825 - 831. (WEI Gang, ZHU Kui. Prediction for response of adjacent pipelines induced by pipe jacking construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 825 - 831. (in Chinese))
- [5] 邴凤举, 王 新, 习 宁, 等. 顶管施工三维数值模拟及土质适用性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(6): 1209 - 1215. (BING Feng-ju, WANG Xin, XI Ning, et al. 3D numerical simulation of pipe jacking and its soil applicability study[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(6): 1209 - 1215. (in Chinese))
- [6] 张文瀚, 谢雄耀, 李 攀. 浅层顶管隧道施工对路基变形影响数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(增刊 2): 1619 - 1624, 1652. (ZHANG Wen-han, XIE Xiong-yao, LI Pan. Numerical analysis of deformation of highway roadbase caused by shallow underground pipe jacking in sand soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(S2): 1619 - 1624, 1652. (in Chinese))
- [7] 杨金虎, 陈卫兵, 张 莉, 等. 双层顶管隧道施工引起的土体竖向变形规律研究[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(29): 274 - 279. (YANG Jin-hu, CHEN Wei-bing, ZHANG Li, et al. Study on vertical deformation of soil caused by construction of double layers of pipe jacking tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14**(29): 274 - 279. (in Chinese))
- [8] YIN M L, JIANG H, JIANG Y S, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **78**: 245 - 258.
- [9] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **89**: 78 - 90.
- [10] 魏 纲, 徐日庆, 屠 玮. 顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 476 - 482. (WEI Gang, XU Ri-qing, TU Wei. Testing study and analysis on soil disturbance induced by pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 476 - 482. (in Chinese))
- [11] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis Material Models Manual[M]. Netherlands: Delft, 2006.
- [12] 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. (FENG Hai-ning, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Finite element analysis of influence of pipe-jacking construction on environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(7): 1158 - 1162. (in Chinese))
- [13] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1766 - 1774. (WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1766 - 1774. (in Chinese))
- [14] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 269 - 278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 269 - 278. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)