

顶管对道路沉降影响可视化模型研究与分析

钟旭浩,张徐杰

(上海奉贤建设发展集团市政公路工程有限公司,上海市 201400)

摘要:市政给排水管道工程通常位于城市中心或城市周边区域,由于土层、地质、传统施工方式等因素对周边环境造成影响较大,而采用非开挖的顶管技术能够更直观、有效地选择最佳的方案,降低因道路沉降给周边环境造成的不利影响。以上海南桥污水泵站进站管道迁建工程为背景,通过 ABAQUS 有限元软件建立三维模型,开展了非开挖顶管法施工的不同工况、土体类别和顶管管径对土层沉降规律的模拟及可视化分析,提出合理的顶管施工方案,减少道路不均匀沉降的影响,为顶管技术在上海市奉贤区市政给排水工程的推广应用奠定基础。

关键词:非开挖顶管技术;市政工程;ABAQUS;道路沉降;管道工程

中图分类号: TU990.3;U418

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0271-05

0 引言

顶管法采用推力将混凝土管段推进土层,是一种高效的非开挖管道安装技术,由于不需要开挖地表,尤其适用于穿越城市中心的给排水管道^[1-2]。相对于开挖沟槽的线性施工,顶管施工(点式施工)只需开挖工作井,对周围居民的生活和地面设施不会带来严重影响,具有施工成本较低、施工效率高和对施工环境有利等特点。因此,在市政管道工程项目中得到了广泛应用^[3-4]。然而,在市政给水和排水管道施工中应用顶管技术时,新管道顶进施工难免会对周边土体产生扰动,若附近土层存在密集的管线,将对既有管线产生不均匀位移和变形等不利影响^[5]。

基于此,工程施工方不仅需要掌握顶管施工技术流程,还需要对施工周边土体的变形沉降采取有效的控制措施。本文以上海南桥污水泵站进站管道迁建工程为背景,依据实际工程场地的勘察数据,通过理论及有限元分析,探究采用顶管技术施工时不同工况、土体类别及顶管管径对土层沉降的影响规律,并提出顶管施工要点及建议。

1 工程概况

1.1 工程背景

上海奉贤区南桥污水处理厂改建为污水提升泵

站,根据排水中心改造需求,需将污水提升泵站搬迁至排水中心东北角。本项目局部采用非开挖顶管施工技术,涉及迁建管线选用 DN800F 型钢承口钢筋混凝土管,埋深 6.00~6.50 m,长约 183 m。场地地基复杂程度等级为中等复杂场地。

1.2 地质条件

现场勘察查明,地基土从上往下依次由填土、淤泥质土、黏性土、粉性土组成。本工程顶管施工影响范围主要涉及②粉质黏土、③淤泥质粉质土、④砂质粉土及⑤淤泥质土。其中,②的上方为①填土,平均厚度为 1.60 m;③和④夹层二层土性差异较大,对管道产生较大的不均匀沉降。场地各层地基土的物理力学性质指标见表 1。

2 数值模型建立

2.1 基本假定

由于实际工程场地情况复杂,为简化模型并准确模拟顶管推进过程中土层的沉降情况,本文采用以下基本假定:

(1)假定各土层满足各向同性的 Mohr-Coulomb 理论要求。

(2)假定各土层的分布是均匀的。

(3)模拟不考虑地下水的影响。

(4)选取 12 m 顶管段为算例,土层厚度选取情况为:①杂填土 1.60 m,②粉质黏土 2.00 m,③淤泥质粉质土 2.00 m,④砂质粉土 1.8 m,⑤淤泥质土 5 m。管道中轴线位于④层截面中心位置,各土层水平范围选取开挖直径 5 倍(即 4 m),如图 1 所示。

收稿日期:2024-01-16

作者简介:钟旭浩(1974—),男,本科,工程师,从事市政及公路工程施工工作。

通信作者:张徐杰(1995—),男,本科,工程师,从事市政及公路工程施工工作。电子信箱:Jimmy163@outlook.com

表 1 各层地基土的物理力学性质指标

土层	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 C/kPa	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	承载力特征值 K/kPa	压缩模量 E/MPa	容重 $G/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	平均厚度 /m
①	—	—	—	—	—	19.0	1.60
②	21	17.5	18.8	80	5.06	18.8	2.07
③	11	17.5	17.7	50	3.10	17.7	2.02
④	5	30.5	18.7	90	10.22	18.7	1.82
⑤	12	10.5	16.9	55	2.23	16.9	5.07

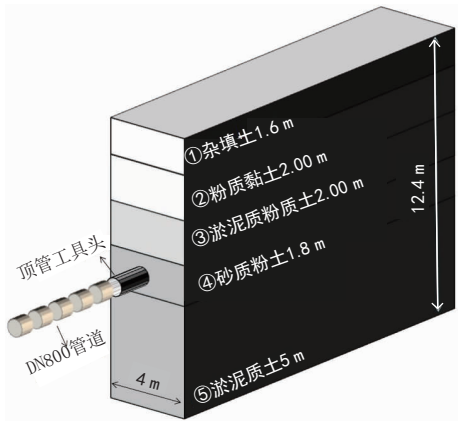


图 1 简化的工程模型示意

2.2 模型的建立

单元定义:土体、顶管工具头及管道均采用 C3D8R 实体单元。土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,参数见表 1。顶管工具头和管道的刚度远大于土体,因此,顶管工具头和管道可视为弹性模型。

边界条件:在实际环境中,土层间的边界条件较为复杂。为方便计算,将模型的边界条件进行简化,各土层间的相互作用采用绑定连接。管道及顶管工具头与④土层之间的接触方式采用面面接触,其中,法线方向采用硬接触,切线方向采用考虑相对滑移的摩擦接触,摩擦系数取 0.1。有限元模型各部件的相互作用详情见图 2。

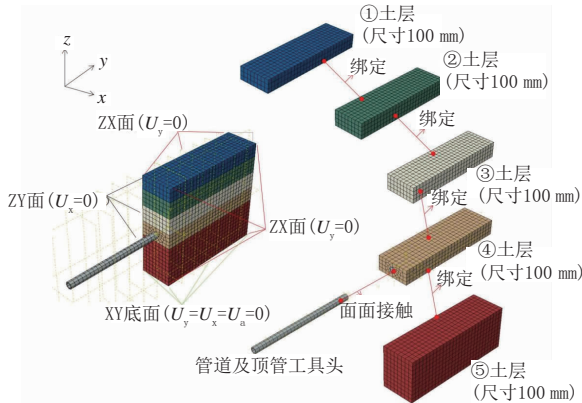


图 2 有限元模型相互作用示意

工况的定义:在 ABAQUS 有限元软件中,采用“生死单元法”可以很好地模拟顶管施工的实际工况。首先要把管道单元“杀死”,然后通过逐步“激活”

管道单元来模拟管道的推进过程。同理,也可以通过“杀死”土体单元来模拟开挖的土体。本工程共设置七个分析步替代六个施工工况,详见表 2。

表 2 模拟施工工况的分析步定义

分析步	分析步内容
顶进前准备	赋予土体地应力,将顶管工具头设置在土层中,并施加重力
工况一	杀死距开挖面 2 m 的土体单元,随之对土体内壁进行支护(施加支护力),激活并顶进顶管工具头和第一节管道(2 m),撤销支护力
工况二	杀死距离工作井开挖面 4 m 的土体单元,对土体内壁施加支护力,激活并顶进第二节管道,撤销支护力
工况三	杀死距离工作井开挖面 6 m 的土体单元,对土体内壁施加支护力,激活并顶进第三节管道,撤销支护力
工况四	杀死距离工作井开挖面 8 m 的土体单元,对土体内壁施加支护力,激活并顶进第四节管道,撤销支护力
工况五	杀死距离工作井开挖面 10 m 的土体单元,对土体内壁施加支护力,激活并顶进第五节管道,撤销支护力
工况六	杀死距离工作井开挖面 12 m 的土体单元,对土体内壁施加支护力,激活并顶进第六节管道,撤销支护力

2.3 理论计算

目前国内对外对地表沉降计算理论的研究较成熟,Sagaseta^[6]假定土体损失体积为均匀的圆柱体,在不考虑土体排水及固结的情况下,地表沉降体积与土体损失体积相等,提出了以位移为变量的地表沉降计算公式。Lee 等^[7]引入等效土体系数(g)和地层损失率(η),对土体损失体积的计算公式进行了修正,修正后的地表沉降计算公式如式(1)~式(3)所示。

$$S_{z=0} = \frac{V_{\text{loss}}}{2\pi} \frac{h}{y^2 + h^2} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}} \right) \quad (1)$$

$$V_{\text{loss}} = \pi \left(Rg - \frac{g^2}{4} \right) \quad (2)$$

$$g = 2R(1 - \sqrt{1 - \eta}) \quad (3)$$

式中: g 为等效土体系数; η 为地层损失率,本模型取值 2.2%^[8]; R 为管道外径; V_{loss} 为单位长度土体损失量, m^3/m ; x 为顶进方向离挖面的水平距离, m ; y 为离管道轴线的横向水平距离, m ; h 为管道轴线埋深, m 。

为了验证有限元模型建立方法的合理性,本文将地表沉降模拟值与地表沉降理论值进行对比,地

表沉降测点分布如图3所示。通过上述公式的计算和有限元模拟,获得了不同工况下X方向测点沉降的理论值和模拟值(见图4)。可以发现,在顶管推进过程中,测点距工作井开挖面越近,地表沉降量越大,且随着顶管管节前进位移增大,各测点的地表沉降量也逐渐增加;不同工况下X方向测点沉降模拟曲线和理论曲线规律基本一致,二者的最大沉降量分别为2.035 mm和2.048 mm,误差为0.66%。因此,本文提出的建模方法是合理的。

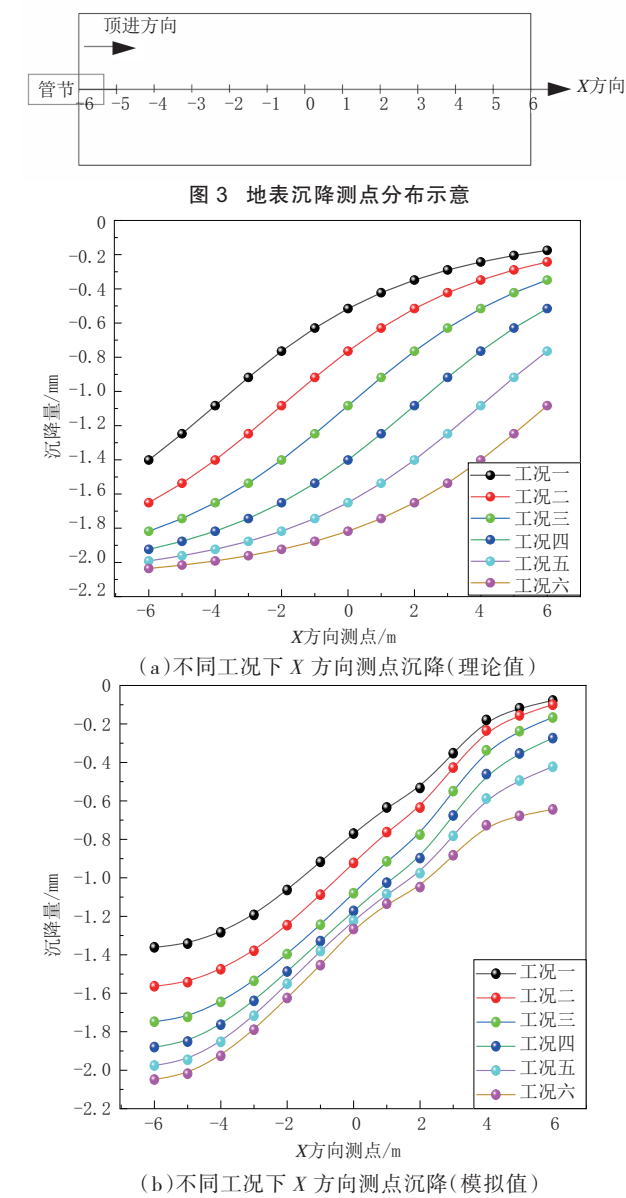


图4 不同工况下的测点沉降

3 结果分析

3.1 不同工况对地表沉降的影响

不同工况下土体、管道及顶管工具头的竖向位移云图如图5所示,从图5(a)至(d)可以看出,当第一节管道顶进土体时,开挖面上方相邻土层首先出

现沉降,并逐渐呈倒三角锥的形式延伸至地表。在图5(e)至(f)中容易发现,随着管节的逐步推进,顶管工具头正上方的土层逐渐发生沉降,离工作井挖面越近的土体沉降量越大。因此,顶管施工过程需重点做好监测和支护工作,防止工作井开挖面的周边土体沉降过大甚至失稳。

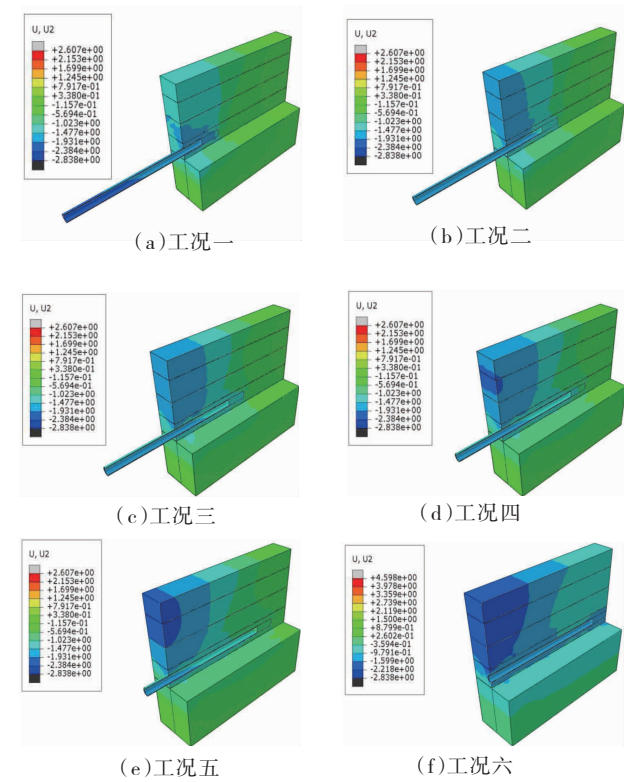
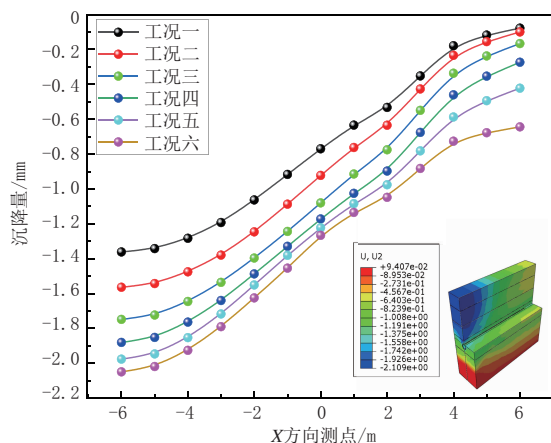


图5 不同工况下的竖向变形云图

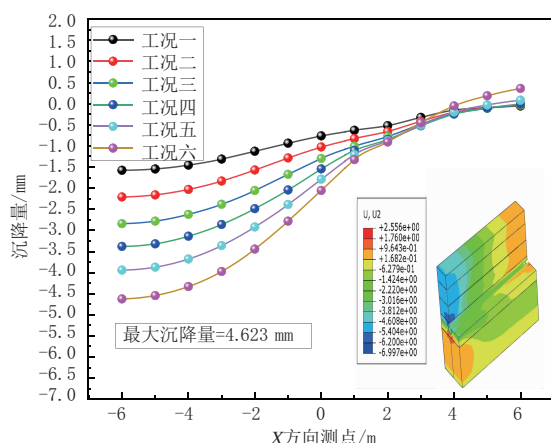
3.2 不同土体类别对地表沉降的影响

本文主要以管道与土体间的摩阻力和土体内摩擦角为参数,探究在不同土体条件下的顶管施工对地表沉降的影响规律。不同管道与土体间的摩阻力对地表沉降的影响规律如图6所示。容易发现,当管道与土层间的摩阻力增大时,工作井周边土体沉降量显著增大,且随着顶管工况进入工况五后,顶节前方的地表出现了明显的隆起。在实际顶管施工技术中,管节的偏移及注浆量过少等情况均会造成管道与土层间的摩擦阻力增大。一般地,对管节表面注浆可以有效调整管道与土层间的摩擦阻力,降低顶管施工对周边土体的扰动。因此,在施工时应确定合适的注浆量。通常注浆量设定为理论计算值的1.5~2.0倍。

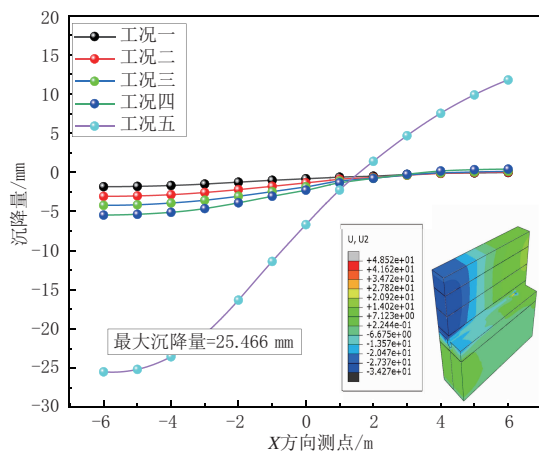
土层内摩擦角是反映土体抗剪强度的重要指标。为研究顶管施工在不同土层开挖情况下对地表沉降的影响,选取内摩擦角为5°、15°和25°的土体进行对比分析。不同内摩擦角对地表沉降的影响规律如图6(a)、图7(a)和(b)所示。由图可知,在不同



(a)标准模型(摩阻力取值 0.1、内摩擦角取值 5°、管径取 DN800)



(b)摩阻力取值 0.2



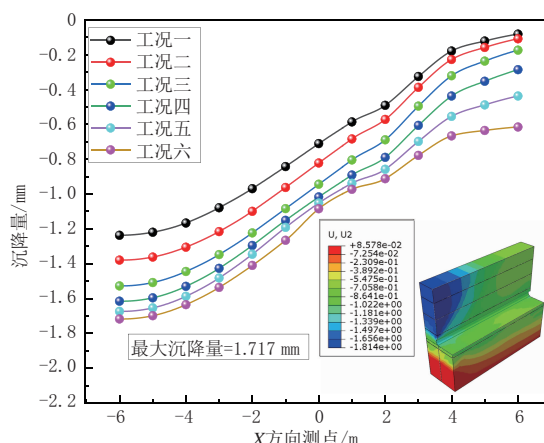
(c)摩阻力取值 0.3

图6 不同摩阻力对地表沉降的影响规律

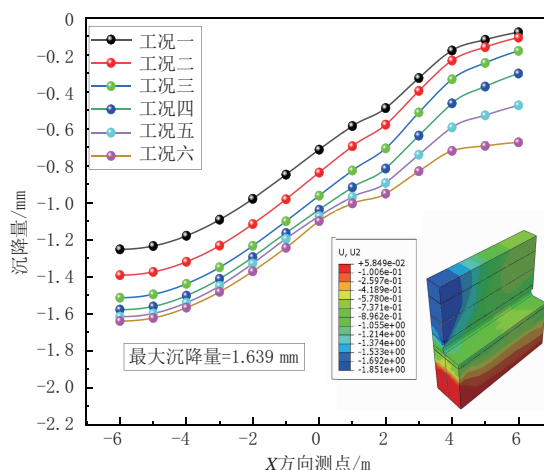
内摩擦角的土层开挖对地表沉降的影响规律基本一致,且当土体内摩擦角越大时,地表最大沉降量减小不明显,说明开挖面的土体类别对地表沉降的影响不显著。

3.3 不同顶管管径对地表沉降的影响

采用不同管径的管节施工对地表沉降的影响规律如图 6(a)、图 8(a)和(b)所示。当管节分别采用为 DN600 型、DN800 型和 DN1000 型时,地表沉降量分



(a)开挖土层内摩擦角取值 15°



(b)开挖土层内摩擦角取值 25°

图7 不同摩擦角对地表沉降的影响规律

别为 1.391 mm、2.035 mm 及 2.730 mm,即顶管管径越大,对周边土体扰动越大,地表沉降越明显。因此,在沉降允许值及使用要求下,应当选取合适管径的管节。

4 结 语

本文通过 ABAQUS 有限元软件建立了顶管施工有限元模型,通过对比地表沉降理论计算值与有限元沉降模拟值,验证了建模方法的合理性,并探究了顶管技术施工中不同工况、土体类别及顶管管径对土层沉降的影响规律,可以得到以下结论:

(1)在顶管推进过程中,地表沉降量与顶管顶进位移有关,随着顶管管节前进的位移增大,地表沉降量显著增加。工作井挖面周边土体沉降量较大,需做好基坑支护和实时监测变形工作。

(2)管道与土层间的摩阻力、管节管径对地表沉降量的影响显著。管道与土层间的摩阻力越大,工作井周边土体沉降量显著增大,且顶节前方的地表可能会出现隆起现象。管节管径越大,对周边土体扰动

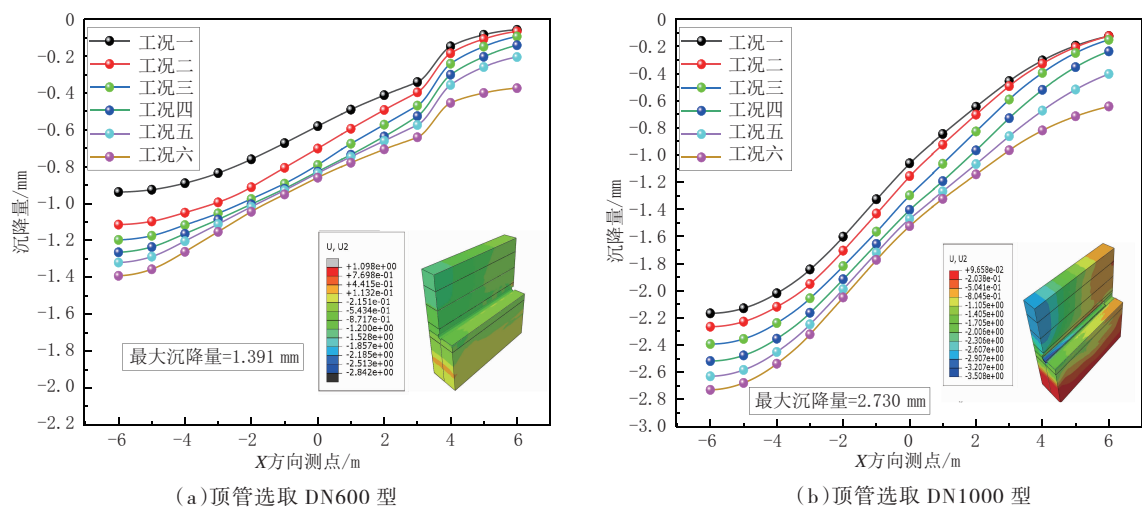


图 8 不同管径对地表沉降的影响规律

越大,地表沉降越明显。

参考文献:

[1] 宋涛.非开挖技术在排水工程中的应用研究[J].建设科技,2023(4): 47-50.

[2] 仲旭东.非开挖顶管施工技术在市政管网工程中的应用研究[J].工程技术研究,2023,8(8):89-91.

[3] 林朝进.顶管施工技术在城市给排水管道工程中的应用[J].江苏建材,2022(6):65-66.

[4] 李晓虎.非开挖顶管技术在市政给排水管道施工中的应用[J].石材,2023(11):71-73.

[5] 赵崇.顶管工程地表与开挖面变形控制研究[D].郑州:郑州大学,2019.

[6] Sagaseta C.Author's reply to Schmidt [J].Geotechnique,1988,38(4): 647-649.

[7] 李江莉.顶管施工对地表和电力隧道变形影响的三维有限元分析[J].隧道与轨道交通,2020,1(1):51-54.

[8] 景路,袁聚云,袁勇.顶管工程中的地层损失参数和土体变形计算[J].岩土力学,2013,34(增刊1):173-178.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com