

文章编号: 1005-0523(2024)04-0010-11



深基坑开挖对邻近地下管线影响数值分析

孙欣¹, 胡文辉^{2,3}, 徐鑫洋^{2,3}, 康文翰^{2,3}, 张海娜^{2,3}, 余玲^{2,3}

(1. 江西赣粤高速公路工程有限责任公司, 江西 南昌 330006; 2. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为明确深基坑开挖对邻近地下管线位移变化的影响。【方法】依托南昌四号线某深基坑工程, 采用FLAC 3D软件对基坑动态施工全过程进行模拟, 分析内支撑条件下不同管材、管径、埋深、埋距对管线位移的影响, 并利用现场变形监测数据进行对比验证。【结果】研究表明, 内支撑在基坑施工过程中对邻近管线的位移起到良好的限制作用。基坑开挖过程中, 管材和管径的变化主要影响管线的沉降。【结论】不同类型管材刚度不同, 刚度越大, 管线抵抗土体变形能力越强。管线的沉降变化量与管径变化量呈负相关。管线的埋深对管线的水平位移影响显著, 管线的水平位移随埋深增加呈现先增大后减小的非线性变化, 并在管线埋深接近1/2基坑设计深度时达到最大。在遵循单一变量的原则下, 埋距不同的管线在位移影响范围上存在差异, 相较于管线沉降, 基坑开挖对邻近管线的水平位移影响范围更大。

关键词: 深基坑; 地理管线; 内支撑; 数值模拟; 管线位移

中图分类号: TU470

文献标志码: A

本文引用格式: 孙欣, 胡文辉, 徐鑫洋, 等. 深基坑开挖对邻近地下管线影响数值分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 11-20.

Numerical Analysis of the Influence of Deep Foundation Pit Excavation on Adjacent Underground Pipelines

Sun Xin¹, Hu Wenhui^{2,3}, Xu Xinyang^{2,3}, Kang Wenhan^{2,3}, Zhang Haina^{2,3}, Yu Ling^{2,3}

(1. Jiangxi Ganyue Expressway Engineering Co., Ltd., Nanchang 330006, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】In order to study the displacement variation law of adjacent underground pipelines during the excavation of deep foundation pits. 【Method】Based on a deep foundation pit project of Nanchang No.4 line, FLAC 3D software is used to simulate the whole process of dynamic construction of foundation pit, and the influence of different pipe materials, pipe diameter, buried depth and buried distance of internal support on pipeline displacement is analyzed. And the field deformation monitoring data are used for comparison and verification. 【Result】The results show that the internal support plays a good role in limiting the displacement of the adjacent pipeline during the construction of the foundation pit. In the process of foundation pit excavation, the change of pipe material and pipe diameter mainly affects the settlement of pipeline. 【Conclusion】The stiffness of different types of pipes is different. The greater the stiffness, the stronger the pipeline's ability to resist soil de-

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 江西省国家级高层次人才创新创业项目(2022S001); 江西省交通运输厅科技项目(2022H0027); 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室项目(2021BCD42011)

formation. The settlement variation of the pipeline is negatively correlated with the variation of the pipe diameter. The buried depth of the pipeline has a significant effect on the horizontal displacement of the pipeline. The horizontal displacement of the pipeline increases first and then decreases with the increase of the buried depth, and reaches the maximum when the buried depth of the pipeline is close to 1/2 of the design depth of the foundation pit. Under the principle of following a single variable, there are differences in the influence range of displacement of pipelines with different buried distances. Compared with pipeline settlement, foundation pit excavation has a greater influence range on the horizontal displacement of adjacent pipelines.

Key words: deep foundation pit; buried pipeline; internal support; numerical simulation; pipeline displacement

Citation format: SUN X, HU W H, XU X Y, et al. Numerical analysis of the influence of deep foundation pit excavation on adjacent underground pipelines[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 10–20.

【研究意义】随着城市化进程的深入发展,地下空间被不断开发利用,由此产生了大量深基坑工程和地下管线工程。而深基坑在开挖过程中,不可避免地会对邻近地下管线及周边构筑物设施造成破坏,影响人们的正常出行和生活。因此有必要就基坑开挖对邻近地下管线的影响进行分析,从而达到指导施工、保护管线的目的^[1-3]。

【研究进展】针对深基坑施工对邻近管线及建筑物的影响问题,国内外学者主要采用理论研究、现场监测和数值模拟等方法进行了一系列的研究。在理论研究方面,弹性地基梁模型作为一种理论模型,在研究地下管线变形问题中得到了广泛运用。姜峰^[4]依据弹性地基梁模型提出基坑施工引起管线变形,并推导了相应的内力解析式。Zhang等^[5]基于Mindlin^[6]解和Winkler弹性地基梁理论提出了用于分析基坑施工对邻近管线影响的两阶段简化理论法。何小龙等^[7]在考虑管土分离影响下,依据弹性地基梁理论和管-土分离计算模型推导了基坑施工诱发邻近管线产生变形的计算解析解。然而,上述基于传统弹性地基梁模型的研究中存在忽视内部微观结构之间非局部长程相互作用力的缺陷,目前针对非局部效应问题,已有学者作出了相关研究^[8-10]。如Ke等^[11]利用建立的非局部Timoshenko梁模型研究了压电纳米梁的非线性振动问题。张大鹏等^[12]基于非局部Euler梁理论和Hamilton原理建立黏弹性基体中压电纳米梁的热-机电振动特性分析模型。此类研究为解决传统地基梁忽视非局部效应的问题提供了指导,使得考虑非局部效应的精准模型的建立成为了可能。在现场监测方面,刘红

岩等^[13]利用现场地表沉降曲线对基坑施工范围内的邻近管线进行了位移计算,以现场监测方法解决了工程实际问题。韩焯等^[14]通过对大量地下管线监测数据的分析,提出了在连续管线的位移和内力预测上进行刚度修正。邹森等^[15]以西安某地铁站项目为工程背景,基于现场监测数据分析了基坑开挖与邻近地下管线之间的响应情况。王立峰等^[16]结合地铁深基坑管线实测数据,研究了基坑施工对邻近地下管线的变形影响规律。在数值模拟研究方面,由于工程施工的一次性特点,大多数学者热衷于用数值模拟的方式探究管线在基坑开挖中不同管线因素条件下的位移变化规律^[17]。

杜金龙等^[18]通过用FLAC 3D模拟基坑施工,分析了管线直径对管-土接触面的影响,提出了深基坑施工过程中小管径变形受力的计算评估方法。王冬至等^[19]用FLAC3D模拟基坑的施工工况,研究了基坑施工过程中诱发管线损伤的影响因素,得出不同工况下管线的损伤级别,为地下管线是否发生损伤泄漏提供了判据。王洪德等^[20]采用FLAC3D建立管线-土层-基坑三维有限差分模型,探究了围护结构模量、管线因素以及管线位置在基坑施工过程中对邻近地下管线的力学、变形行为规律。

【创新特色】综上所述,国内外学者针对单一地质条件下的小型基坑开挖对邻近管线的相关影响有着较为丰富的研究,但对于地下连续墙+不同内支撑复合支护体系下基坑开挖对邻近既有管线位移变化的影响研究较少,已有的研究也未成体系。因此,本文以南昌市地铁四号线某深基坑工程为背

景,在数值模拟上采用 Beam 单元+Interface 单元 (Interface 单元用来考虑土体与地下连续墙之间的接触特性)的组合模拟支护结构的支撑作用,针对复杂地质条件下大型深基坑开挖和地下连续墙+不同内支撑复合支护体系下基坑开挖对邻近既有管线的影响开展研究。**【关键问题】**本文基于基坑中部剖面建立三维数值计算模型,采用 FLAC 3D 软件对基坑动态施工全过程进行模拟,分析内支撑条件下不同管材、管径、埋深、埋距对管线位移的影响。同时,结合现场监测数据,利用管线的位移结果验证了现场所选择支撑结构体系的合理性,并为基坑开挖过程中邻近地理管线的重点监测和保护提供了指导,在深基坑开挖方案的安全分析上具有一定的指导意义。

1 工程概况

南昌市地铁四号线某车站为地下二层岛式车站,车站主体结构净长 495.6 m,标准段净宽 18.3 m,基坑深度 17.0~18.9 m。为确保基坑范围内的开挖安全,车站主体基坑采用地下连续墙加 3 道内支撑

的围护方案,其中地下连续墙基本墙幅 6.0 m,墙厚 800 mm,接头采用工字钢接头。第一道为钢筋混凝土支撑(断面尺寸 800 mm×1 000 mm,间距约 9 m),其余支撑为直径 609 mm、厚 16 mm 的钢管支撑,标准段结构剖面见图 1。车站土层情况及基坑周围管线分布情况如图 2 所示,车站场地的工程地质情况复杂,基坑开挖范围内存在素填土、粉质黏土、淤泥质黏土、强风化泥质粉砂岩及中风化泥质粉砂岩 5 种土体,并且基坑边坡范围内的层段土体以素填土、粉质黏土和淤泥质黏土为主,其自立性较差。淤泥质黏土只有少部分位于车站东侧端头地面,所以建模时不考虑该土层。基坑范围内水文情况同样复杂,存在上层滞水、第四系松散岩类孔隙水和碎屑岩类裂隙孔隙水三种地下水。并且为保证基坑顺利开挖,项目现场采取了坑外载、排水施工以及基坑内排水等一系列措施。但由于水文情况复杂,地下水的考虑不利于分析基坑开挖对邻近管线的影响,所以建模时不考虑地下水的影响,认为地下水降至地表以下 18 m。此外,基坑周围管线为给水管线、燃气管线、雨水管线和污水

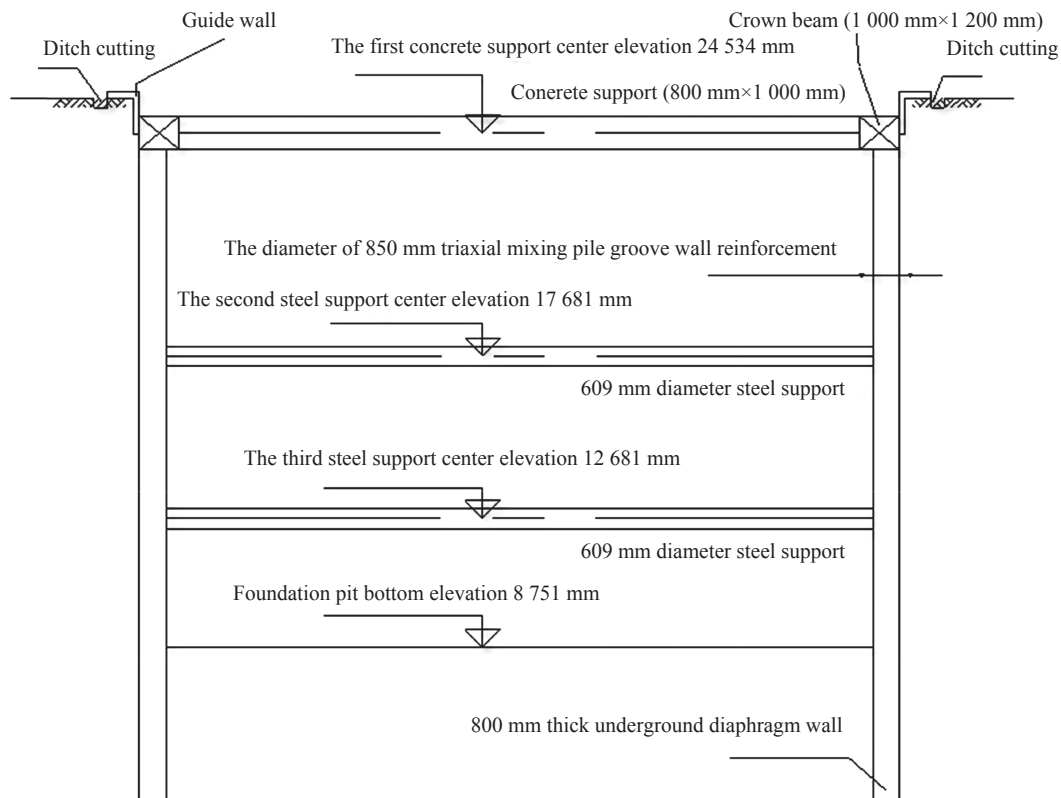


图 1 基坑支撑结构剖面

Fig. 1 Supporting structure section of foundation pit

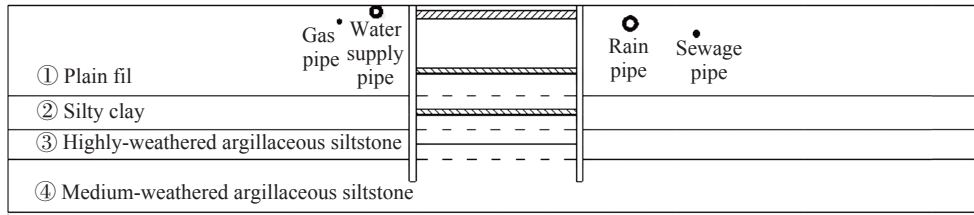


图2 地层、支撑结构以及邻近管线示意
Fig. 2 Stratum, supporting structures and adjacent pipelines

管线。

2 三维有限元模型的建立

2.1 计算模型与边界条件

基坑的开挖深度为16.934 m,宽度19.7 m。由理论分析可知,基坑邻近地下管线的最大变形发生在基坑中部的剖面^[21]。本文基于平面应变理论,选取基坑中部剖面进行深入分析。为消除边界的相关影响,现选取计算宽度120 m、深度40 m以及单位长度作为厚度建立模型。模型由地层、围护结构以及管线组成,其中围护结构是地下连续墙和3道内支撑,管线则分别是给水管线、燃气管线、污水管线以及雨水管线。

2.2 模型的计算参数

根据前期的南昌地区土工试验结果^[22]及《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)确定岩土体参数,岩土体采用以摩尔-库伦屈服条件为破坏准则的理想弹塑性模型,各土层物理力学参数指标见表1。

根据实地监测资料以及市政管线相关规范,地下管线的相关计算参数见表2。

2.3 基坑施工阶段模拟

根据实际施工阶段,设置以下施工工况。

工况1:基坑开挖前进行前先进进行初始地应力的平衡计算,获取土体的初始应力场;位移清零。

工况2:破除路面,整体清除表层土方,挖至地表以下1.581 m,在地表以下1.081 m处施做第一道混凝土支撑。

表1 岩土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rock-soil body

Rock-soil body	Layer thickness/m	Gravity/(kN/m ³)	Elasticity modulus/MPa	Shear elasticity/MPa	Bulk modulus/MPa	Cohesion/kPa	Angle of internal friction/(°)
Plain fill	11.065	19.60	20	7.41	22.22	10.00	10.00
Silty clay	4.100	19.12	25	9.62	20.83	31.69	14.00
Highly-weathered argillaceous siltstone	3.600	20.00	120	47.62	83.33	40.00	25.00
Medium-weathered argillaceous siltstone	21.235	26.30	390	3 329.37	5 826.39	1 600.00	38.03

表2 地下管线参数

Tab.2 Parameters of underground pipeline

Pipeline name	Pipe material	Wall thickness/mm	Pipe diameter/mm	Buried depth/m	Burial distance/m	Density/(kg/m ³)	Elasticity modulus/GPa	Poisson's ratio
Water supply pipe	Nodular cast iron	18.4	1 200	1.30	Distance from the main body envelope 2.3 m	7 300	180.00	0.28
Gas pipe	PE	18.2	200	2.00	Nearest pit 7.5 m	960	1.07	0.38
Rain pipe	Concrete	100.0	1 500	2.91	Nearest pit 4.05 m	2 500	25.00	0.17
Sewage pipe	Steel tape wound bellows	5.0	500	3.67	Nearest pit 10.85 m	1 500	2.26	0.35

工况3:开挖至地表以下5.081 m。

工况4:开挖至地表以下8.434 m,在地表以下7.934 m处施作第一道钢支撑。

工况5:开挖至地表以下13.434 m,在地表以下12.934 m处施作第二道钢支撑。

工况6:开挖至地表以下16.943 m,施作防水垫层并浇筑底板。

3 数值模拟计算结果分析

基坑采用地下连续墙加3道内支撑的围护方案,这对于保证基坑侧壁稳定以及减小邻近管线的位移具有重要作用。为了深入探讨内支撑结构在基坑开挖过程中对邻近管线位移的限制作用,下面在相同工况下对基坑开挖过程中有、无内支撑时的管线位移进行对比分析。

3.1 不同支撑方案下管线沉降数值模拟计算结果分析

图3为基坑邻近管线在有、无内支撑条件下的沉降曲线,通过对比发现,基坑内支撑的存在对邻近管线的沉降具有显著的限制作用。由图3(a)可知,在无内支撑的情况下,管线的沉降变化量与管线距基坑边缘的距离变化量表现为负相关性,基坑邻近各管线的沉降量随着基坑开挖深度的增加逐渐增大,整体表现为给水管线>雨水管线>燃气管线>污水管线,其中给水管线处沉降最大,沉降为-266 mm。通过对比管线变形规范,给水管线的最大沉降量超过管线变形允许范围,可能导致管线破坏;图3(b)为基坑在有内支撑时的管线沉降曲线,各邻近管线沉降量随着基坑开挖的进行逐渐增大并在接近基坑开挖至设计深度的1/2位置处达到峰值,随着开挖的进行,管线的沉降趋近于稳定。此外,管线的沉降整体表现为燃气管线>雨水管线>给水管线>污水管线,管线的最大沉降量较于无内支撑时显著减小,同样以给水管线为例,管线在有内支撑条件下的最大沉降量仅为无内支撑时的1%。

3.2 不同支撑方案下管线水平位移数值模拟计算结果分析

图4为基坑周边管线在有、无内支撑条件下的水平位移曲线,通过对比发现,基坑内支撑的存在对邻近管线的水平位移同样具有显著的限制作用。由图4可知,基坑在无内支撑的条件下,各邻近管线的水平位移量均随着基坑开挖的进行逐渐增

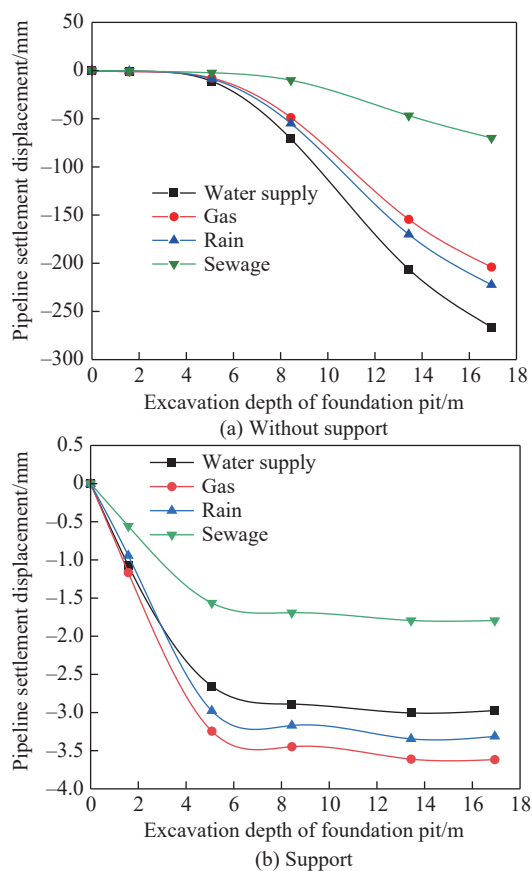


图3 管线在有、无内支撑条件下随基坑开挖深度变化的沉降曲线

Fig. 3 The settlement curve of the pipeline with and without internal support varies with the excavation depth of the foundation pit

大,基坑两侧的地下管线均向基坑方向产生水平位移。按照水平位移量进行分析,整体表现为给水管线>雨水管线>燃气管线>污水管线,其结果符合距离基坑位置越近,水平位移量越大的规律。但从水平位移的变化情况分析发现:各工况之间的水平位移差量随着开挖深度的增加逐渐增大,位移曲线的曲率则随着开挖深度的增加逐渐减小,出现这种现象的主要原因是基坑开挖引起了基坑结构的位移变形。图中近乎重叠的曲线为管线在有内支撑条件下的水平位移,经过分析可知,管线水平位移量随着基坑开挖的进行逐渐增大,整体表现为燃气管线>雨水管线>给水管线>污水管线,并在基坑开挖至设计深度的1/2位置附近达到峰值,随着后续开挖的进行,基坑邻近所有管线的水平位移量也逐渐趋近稳定,最终均稳定在2 mm的范围以内,不会发生破坏。

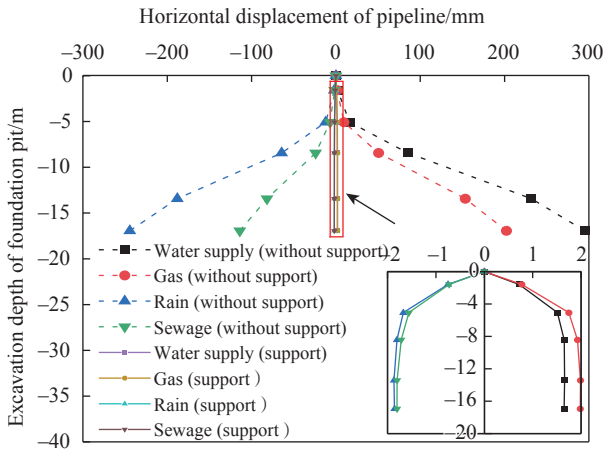


图4 管线在有、无内支撑条件下随基坑开挖深度变化的水平位移曲线

Fig. 4 The horizontal displacement curve of the pipeline with and without internal support varies with the excavation depth of the foundation pit

3.3 数值模拟与监测结果验证分析

前人在不同开挖时间和空间上进行了数值模拟计算,并与实际监测结果进行对比,分析了深基坑开挖过程中邻近管线的时空效应^[23-26]。图5为基坑中部剖面的现场实测沉降曲线和数值模拟沉降曲线,由图中可知,两种沉降曲线的变化规律以及沉降量的变化范围基本相符,并且管线的沉降量不大,均符合规范要求。由于模拟基坑开挖的过程中,数值模型未能考虑基坑施工过程中对土体扰动及基坑周边部分的动荷载作用,导致管线在部分工况下的实测值大于模型的计算值,但管线的最终实测沉降量与计算沉降量数值接近,像给水管线、燃气管线、雨水

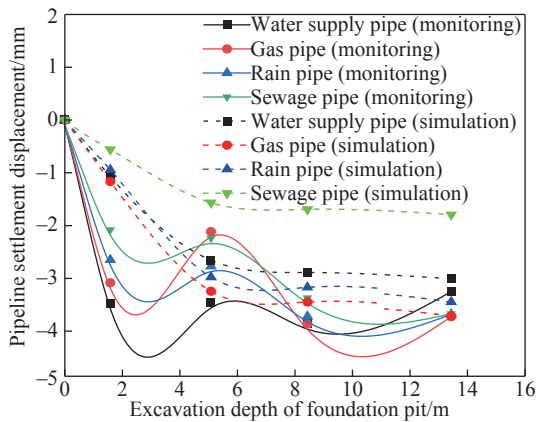


图5 不同工况下管线沉降监测值与实测值对比曲线
Fig. 5 The comparison curve of pipeline settlement monitoring value and measured value under different working conditions

管线的最终模拟沉降量与实测位移量的相差值分别为0.45,0.47,0.05 mm,对于模拟效果不明显的污水管线,实测值与计算值的差值也保持在1.5 mm以内。以上结果说明数值模拟计算结果比较可靠,其规律可以为现场施工起到很好的参考作用^[27]。

4 管线因素对管线位移的影响

为明确深基坑开挖诱发既有管线变形的影响因素,本文选取不同材质、埋深、直径及埋距等因素,分别建立三维数值模型,分析其对管线沉降及水平位移的影响。

4.1 不同管线材质

选取4种不同材质管线(球墨铸铁管、PE管、钢筋混凝土管和钢带波纹管),对不同材质管线在直径1 000 mm、埋深3 m、距离基坑边缘6 m条件下的沉降和水平位移进行分析,研究其变形情况。

由图6可知,管线的沉降量随着基坑开挖的进行先增加后趋于稳定,最终沉降表现为钢带波纹管>PE管>钢筋混凝土管>球墨铸铁管,其原因是各个管线具有不同的材料性质以及弹性模量。材料的弹性模量决定材料的刚度,在管-土的组合体系中,管线的刚度反映管线对土体变形抵制能力,管线刚度越大,管线对土体发生变形的约束作用越强。结果中钢带波纹管与PE管的强度差别较小,同时表现出相近的最大沉降,说明二者具有相近的抵抗土体变形能力。由图7可知,随着基坑开挖的进行,不同材质管线的水平位移量逐渐增大,并且相应的4条水平位移曲线十分接近,最终水平位移

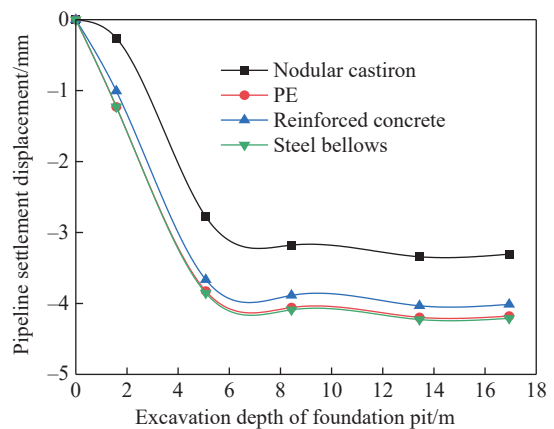


图6 不同管线材料随基坑开挖深度变化的沉降曲线
Fig. 6 Settlement curves of different pipeline materials with the change of excavation depth of foundation pit

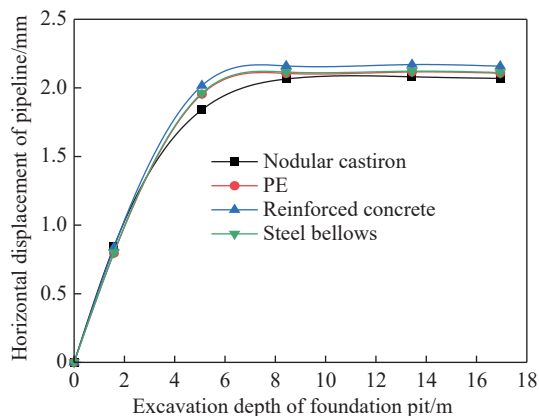


图7 不同管线材料随基坑开挖深度变化的水平位移曲线
Fig. 7 Horizontal displacement curves of different pipeline materials with the change of excavation depth of foundation

规律也基本相同,得出管线材质对于基坑开挖过程中管线的水平位移几乎没有影响。

4.2 不同管线直径

选定距离基坑边缘6 m、埋深3 m条件下的混凝土管进行分析,研究管线管径分别为200, 500, 800, 1 000, 1 200, 1 500 mm时的变形情况。

由图8,图9可知,管线的沉降量和水平位移量随着基坑开挖深度的增加先增大,后趋于稳定。管线的沉降变化值和管径变化表现为负相关性,即随着管径的增大,管线的沉降量逐渐减小,相较于管材在基坑开挖过程中对管线沉降的影响,管径对管线沉降的影响更为显著。出现此类结果的原因主要是管线的截面面积直接影响到管线惯性矩的大

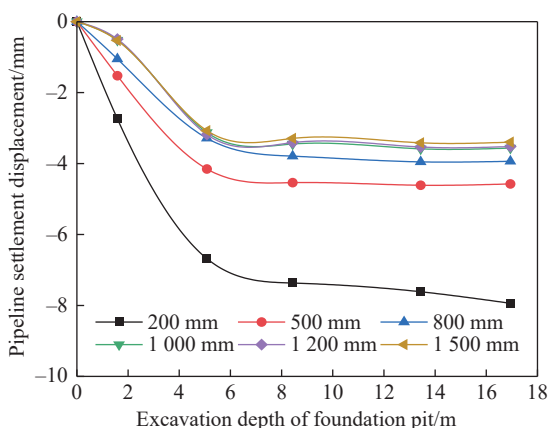


图8 不同混凝土管径随基坑开挖深度变化的沉降曲线
Fig. 8 Settlement curves of different concrete pipe diameters with the change of excavation depth of foundation pit

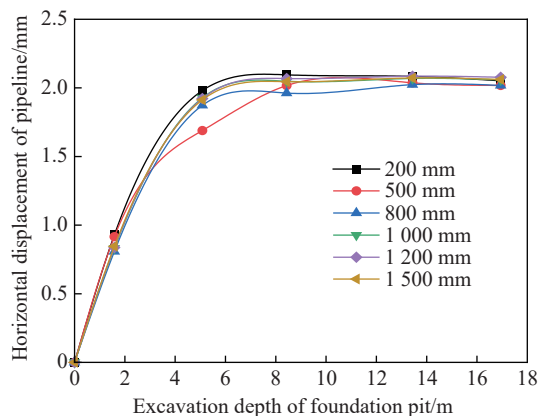


图9 不同混凝土管径随基坑开挖深度变化的水平位移曲线
Fig. 9 Horizontal displacement curves of different concrete pipe diameters with the change of excavation depth of foundation pit

小,截面面积越大,管线的惯性矩越大,管线所能抵抗的变形越大。对于管线的水平位移,随着基坑开挖的进行,管线的水平位移量逐渐增大,同样在接近基坑设计开挖深度1/2位置处达到最大,随着开挖深度的进一步增加,管线的水平位移逐渐趋于稳定。其中各管径的管线位移曲线近乎重叠且其位移量均小于沉降量,得出管径的改变在基坑开挖过程中对邻近管线的水平位移影响微小,并且较管线沉降而言,改变管径对管线沉降的影响效果更为显著。

4.3 距地表不同埋深

选定管径为1 000 mm、距离基坑边缘5 m条件下的混凝土管进行分析,保持其他因素不变,研究管线在埋深分别为2, 4, 6, 8, 10, 12, 16 m时的变形情况。

由图10可知,随着基坑的开挖进行,管线埋深位于2~8 m范围时管线的沉降先增大,并在基坑开挖至设计深度的1/3位置处达到峰值,随着开挖深度的进一步增加,管线的水平位移趋近于稳定;管线埋深位于10~16 m范围时,管线的沉降均趋近于零,说明管线埋深在基坑设计深度以下1/2部分范围时,不同开挖工况对管线的沉降基本无影响。由图11可知,随着基坑的开挖进行,管线的水平位移逐渐增大并在接近基坑开挖至设计深度的1/3位置处达到最大,随着开挖深度的进一步增加,管线的水平位移趋近于稳定。由图11和图12可知,随着管线埋深的逐步增大,管线的水平位移先增大后减小,在管线埋深大概位于基坑设计深度的1/2位置

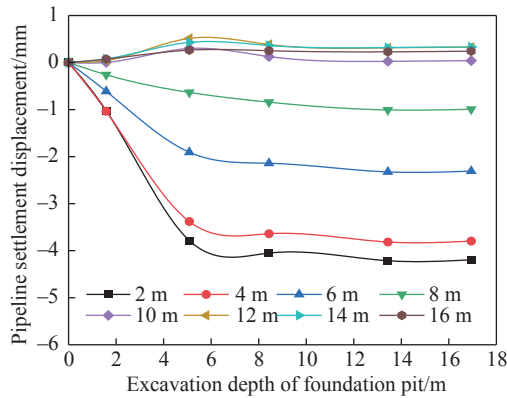


图10 混凝土管在不同埋深时随基坑开挖深度变化的沉降曲线

Fig. 10 The settlement curve of concrete pipe with the depth of foundation pit excavation at different buried depths

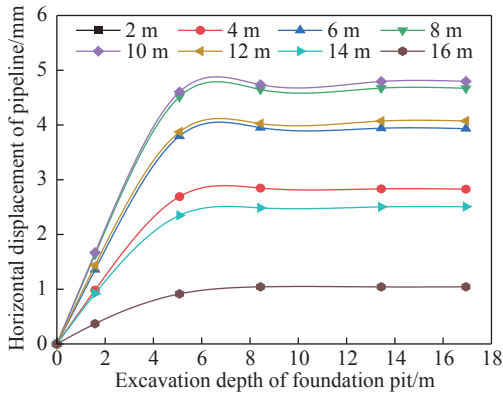


图11 混凝土管在不同埋深时随基坑开挖深度变化的水平位移曲线

Fig. 11 The horizontal displacement curve of concrete pipe with the change of excavation depth of foundation pit at different buried depths

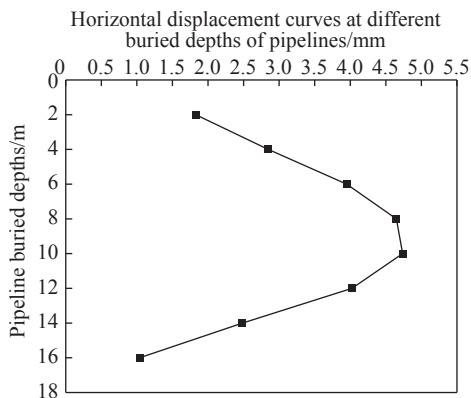


图12 基坑开挖深度为8.43 m时,不同管线埋深的管线水平位移曲线

Fig. 12 When the excavation depth of the foundation pit is 8.43 m, the horizontal displacement curves of pipelines with different buried depths of pipelines are shown

处达到最大。由此可以推测,埋深在邻近1/2基坑设计深度时,地下连续墙接近形变的至高点,需要加强相关的监测与保护。

4.4 距基坑边缘不同距离

选定管径为1 000 mm、埋深3 m条件下的混凝土管进行分析,保持其他因素不变,研究管线在距基坑边缘距离分别为2,4,6,8,10,12,16,20 m时的变形情况。从图13和图14可知,随着基坑的开挖进行,管线的沉降量和水平位移量逐渐增大,并在接近基坑设计开挖深度1/3位置处达到最大,随着基坑开挖深度的进一步增加,管线的水平位移和沉降都逐渐趋于稳定。此外,管线的沉降与水平位移

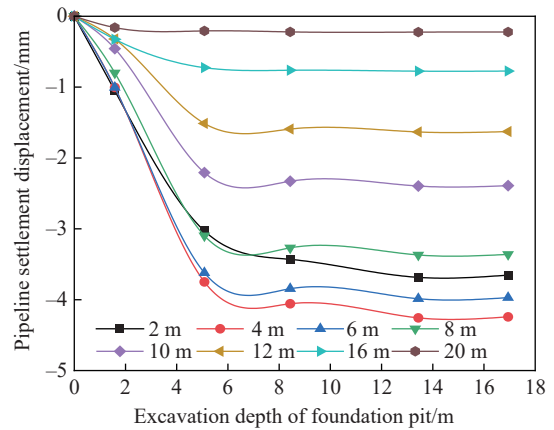


图13 混凝土管在不同埋距时随基坑开挖深度变化的沉降曲线

Fig. 13 The settlement curve of concrete pipe with the change of excavation depth of foundation pit at different buried distances

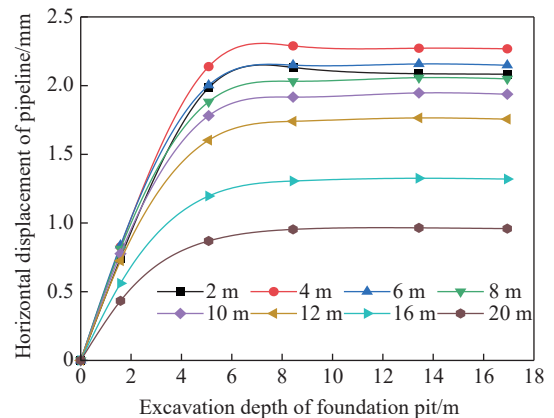


图14 混凝土管在不同埋距时随基坑开挖深度变化的水平位移曲线

Fig. 14 The horizontal displacement curve of concrete pipe with the change of excavation depth of foundation pit at different buried distances

变化趋势存在相似的规律,即二者数值随着管线到基坑边缘距离的增加而减小,并且随着基坑开挖深度的增加趋势愈发明显。管线在距离基坑边缘为4 m时沉降达到最大值4.25 mm,20 m时趋近于0;管线的水平位移在管线距离基坑边缘4 m时同样达到最大值2.268 mm,20 m时趋近为1 mm。基于管线在距离基坑20 m处依然存在近1 mm的水平位移,得出基坑开挖对邻近管线的水平位移有着更大的影响范围。

5 结论

本文通过对基坑中部剖面所建立的数值模型进行分析,基于实测数据重点讨论了深基坑开挖对邻近管线的影响问题,并分析了内支撑条件下不同管线因素对管线位移的影响,得出主要结论如下。

1) 通过对比有、无内支撑条件下的邻近管线位移发现,内支撑的存在能够有效地减小管线位移。以发生最大位移的给水管线为例,管线在无内支撑时管线的最大沉降量与水平位移量达到266 mm和295 mm,而在有内支撑条件下管线的最大沉降量与水平位移量仅达到3.6 mm和2 mm。

2) 基坑开挖过程中,在其他因素不变的情况下,管材和管径的变化主要影响管线的沉降。不同类型管材刚度不同,刚度越大,管线抵抗土体变形能力越强。管线的沉降变化量与管径变化量呈负相关,管径越大,管线沉降量越小。

3) 管线的埋深对管线的水平位移影响显著,随着管线埋深的逐渐增大,管线的水平位移呈现先增大后减小的非线性变化,并在管线埋深接近1/2基坑设计深度时达到最大。

4) 在遵循单一变量的原则下,管线在距离基坑20 m处的沉降趋近于0,但依然存在近1 mm的水平位移。由此可知,相较于管线沉降,基坑开挖对邻近管线的水平位移影响范围更大。

参考文献:

- [1] 施有志,葛修润,李秀芳,等. 地铁深基坑施工对周边管线影响数值分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(6): 83-93.
SHI Y Z, GE X R, LI X F, et al. Numerical analysis on the influence of deep metro excavation construction on adjacent pipelines[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2017, 56(6): 83-93.
- [2] 程涛,许万辉,胡仁杰,等. 深基坑开挖引起邻近管线位移影响的数值分析[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(6): 16-21.
CHENG T, XU W H, HU R J, et al. Numerical analysis for the displacements of the adjacent pipeline caused by a deep foundation pit excavation[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(6): 16-21.
- [3] 邵新军,段鹏辉,王磊. 基坑开挖对邻近管线变形影响及控制措施研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(5): 66-71.
GAO X J, DUAN P H, WANG L. The influence of foundation pit excavation on deformation of adjacent underground pipelines and control measures[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(5): 66-71.
- [4] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 362-368.
JIANG Z. Theoretical analysis on deformation of pipeline caused by adjacent foundation pit excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 362-368.
- [5] ZHANG Z, ZHANG M, ZHAO Q. A simplified analysis for deformation behavior of buried pipelines considering disturbance effects of underground excavation in soft clays[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8: 7771-7785.
- [6] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.
- [7] 何小龙,杨天鸿,周云伟,等. 考虑管-土分离的基坑开挖引起邻近地下管线位移分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 9-16.
HE X L, YANG T H, ZHOU Y W, et al. Analysis of pipeline displacement induced by adjoining foundation pit excavation considering pipeline-soil separation[J]. Chinese Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 9-16.
- [8] 徐长节,丁海滨,童立红,等. 基于非局部Biot理论下饱和土中深埋圆柱形衬砌对平面弹性波的散射[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1563-1570.
XU C J, DING H B, TONG L H, et al. Scattering waves generated by cylindrical lining in saturated soil based on nonlocal Biot theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1563-1570.

- [9] 陈玲, 沈纪苹, 李成, 等. 梯度型非局部高阶梁理论与非局部弯曲新解法[J]. 力学学报, 2016, 48(1): 127-134.
CHEN L, SHEN J P, LI C, et al. Gradient type of nonlocal higher-order beam theory and new solution methodology of nonlocal bending deflection[J]. Journal of Mechanics, 2016, 48(1): 127-134.
- [10] DING H B, TONG L H, XU C J, et al. Dynamic responses of shallow buried composite cylindrical lining embedded in saturated soil under incident P wave based on nonlocal[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 40-56.
- [11] KE L L, WANG Y S. Thermo-electric-mechanical vibration of piezoelectric nanobeams based on the nonlocal theory[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(2): 025018.
- [12] 张大鹏, 雷勇军. 基于非局部理论的黏弹性基体中压电纳米梁热-机电振动特性[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(6): 142-149.
ZHANG D P, LEI Y J. Thermo-electro-mechanical vibration analysis of piezoelectric nanobeams embedded in viscoelastic medium based on nonlocal elasticity theory[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(6): 142-149.
- [13] 刘红岩, 李厚恩, 黄好诗, 等. 基于实测地表位移的基坑开挖引起邻近地下管线位移的计算[J]. 工业建筑, 2011, 41(10): 72-74.
LIU H Y, LI H E, HUANG Y S, et al. Displacement calculation of nearby underground pipeline caused by deep excavation based on field test ground displacement[J]. Industrial Architecture, 2011, 41(10): 72-74.
- [14] 韩焯, 雷崇红, 张鹏. 隧道开挖引起管线沉降计算的刚度修正法[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 21-27.
HAN X, LEI C H, ZHANG P. A modified stiffness approach to predict tunnelling-induced deformation and force of pipelines[J]. Civil and Environmental Engineering, 2012, 34(3): 21-27.
- [15] 邹森, 吴禄源, 王磊. 某地铁站深基坑开挖对邻近管线的影晌分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(3): 106-111.
ZOU M, WU L Y, WANG L. Impact analysis of deep metro foundation pit excavation on adjacent underground pipelines [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(3): 106-111.
- [16] 王立峰, 陈巧红, 冯利坡. 地铁站基坑开挖的管线变形研究[J]. 科技通报, 2019, 35(10): 166-170.
WANG L F, CHEN Q H, FENG L P. Research on pipeline deformation of subway foundation pit excavation[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(10): 166-170.
- [17] 袁小平, 刘红岩, 吕淑然. 深基坑开挖对双层地下管线影响的有限元分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(S1): 771-775.
YUAN X P, LIU H Y, LV S R. Numerical analysis of double-decked underground Pipelines nearby affected by deep excavation[J]. Industrial Buildings, 2011, 41(S1): 771-775.
- [18] 杜金龙, 杨敏. 深基坑开挖对邻近地埋管线影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3015-3020.
DU J L, YANG M. Influence analysis of excavation of deep pit on adjacent buried pipelines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3015-3020.
- [19] 王冬至, 彭功勋, 魏立新, 等. 基坑开挖对地下管线损伤评估的研究[J]. 科技创新导报, 2014, 11(23): 95-98.
WANG D Z, PENG G X, WEI L X, et al. Research on damage assessment of underground pipeline by foundation pit excavation[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 11(23): 95-98.
- [20] 王洪德, 肖杨. 深基坑开挖对邻近地埋管线扰动影响分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 769-775.
WANG H D, XIAO Y. Influence of soil disturbance on adjacent buried pipelines due to excavation of deep foundation pit[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2018, 37(5): 769-775.
- [21] 吕淑然, 刘红岩, 袁小平. 基坑开挖对邻近地下管线运行状态影响分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1): 686-689.
LV S R, LIU H Y, YUAN X P. Numerical analysis of underground pipelines nearby affected by excavations [J]. Industrial Architecture, 2010, 40(S1): 686-689.
- [22] 管凌霄. 盾构隧道斜下穿开挖对既有管道影响的理论研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
GUAN L X. Theoretical study on the effect of existing pipeline caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [23] 焦宁, 丁建文, 吉锋, 等. 土岩复合地层中深基坑开挖对邻近管线变形影响分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 229-236.
JIAO N, DING J W, JI F, et al. Analysis on influence of

deep foundation pit excavation in soil-rock composite stratum on deformation of adjacent pipelines[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2022, 52(2): 229-236.

- [24] 吴峥, 姚黎芳, 陈学良, 等. 基坑开挖对下卧管线竖向变形影响的数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2843-2849.

WU Z, YAO L F, CHEN X L, et al. Numerical analysis on the influence of the foundation pit excavation on the vertical deformation of subjacent pipelines[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2843-2849.

- [25] 徐宏增, 石磊, 王振平, 等. 深基坑开挖对邻近大直径管线影响的优化分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 714-719.

XU H Z, SHI L, WANG Z P, et al. Optimization analysis of Influence of deep foundation pit excavation on adjacent large-diameter pipelines[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 714-719.

- [26] 金祎, 柯磊, 胡方剑, 等. 深基坑开挖对近邻大直径管线的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 790-796.

JIN Y, KE L, HU F J, et al. Influence of deep foundation pit excavation on the adjacent large-diameter pipeline[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 790-796.

- [27] 丁士龙, 孙志浩, 张恒志, 等. 风井深基坑开挖对抗角外浅基础建筑物的影响[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38

(6): 1-10.

DING S L, SUN Z H, ZHANG H Z, et al. Influence of deep foundation pit excavation of subway wind tunnel on shallow foundation buildings outside the pit corner[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 1-10.



第一作者: 孙欣(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为公路工程管理。E-mail: 710888614@qq.com。



通信作者: 张海娜(1992—), 女, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为边坡工程。E-mail: 2639757649@qq.com。

(责任编辑: 姜红贵)