

文章编号: 1674—8247(2023)02—0094—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 02. 019

复杂地质条件下矩形顶管下穿管线影响分析

李兴龙 蔺文帅

(中铁二院北方勘察设计有限责任公司, 济南 250000)

摘要:为研究矩形顶管施工对邻近管线的影响,以某铁路出入口顶管工程为依托,建立三维数值模型对矩形顶管近接下穿管线过程中管线和地表变形规律进行研究,并结合现场实测数据进行分析。研究表明:(1)矩形顶管施工引起的地表变形以沉降为主,隧道上方土体产生了向隧道中心靠拢的趋势,地表沉降最大值16.3 mm,位于隧道中间位置,沉降影响范围为20 m;(2)受接收井的临空开挖面和施加在始发井的顶推力影响,开挖结束后接收井和始发井地表产生隆起,隆起最大值达到1.95 mm;(3)受土体挤压,管线水平位移最大值达到0.64 mm;在控制好管线沉降变形同时,也要注意对其施加水平约束,避免水平位移过大导致破坏;(4)管线变形和变形速率均在安全控制指标之内,数值模拟的管线变形规律与实测数据大致相同,数值模拟的地表和各管线变形规律是可信的。

关键词:矩形顶管; 地铁车站; 地下管线; 数值模拟; 影响分析

中图分类号: U455 文献标识码: A

Impact Analysis for Rectangular Pipe Jacking with Underpass Pipeline Under Complex Geological Conditions

LI Xinglong LIN Wenshuai

(China Railway Eryuan North Survey and Design Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: In order to study the impact of rectangular pipe jacking on adjacent pipelines, a three-dimensional numerical model was established in this paper based on a case of pipe jacking at the portals of a railway, to study the deformation law of the pipeline and the ground surface during the process of rectangular pipe jacking approaching the underpass pipeline, and analyze it in combination with the measured data on-site. The results show that: (1) The surface deformation caused by rectangular pipe jacking is mainly settlement, and the soil above the tunnel tends to approach the center of the tunnel. The maximum surface settlement is 16.3 mm in the middle of the tunnel, and the settlement impact range is 20 m. (2) Affected by the free excavation face of the receiving shaft and the jacking force applied to the launching shaft, the surface of the receiving shaft and the launching shaft uplifts after excavation, with the maximum uplift reaching 1.95 mm. (3) The maximum horizontal displacement of the pipeline reaches 0.64 mm due to soil extrusion. While controlling the settlement and deformation of the pipeline, attention should also be paid to applying horizontal restraints to avoid damage caused by excessive horizontal displacement. (4) The deformation and deformation rate of the pipeline are within the safety control index, the deformation law of the pipeline simulated by the numerical method is roughly the same as the measured data, and

收稿日期: 2022-01-03

作者简介: 李兴龙(1986-),男,高级工程师。

基金项目: 陕西省科技厅社会发展项目(2018SF-382)

引文格式: 李兴龙, 蔺文帅. 复杂地质条件下矩形顶管下穿管线影响分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 94-100.

LI Xinglong, LIN Wenshuai. Impact Analysis for Rectangular Pipe Jacking with Underpass Pipeline Under Complex Geological Conditions [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 94-100.

the deformation law of the surface and each pipeline simulated by the numerical method is credible.

Key words: rectangular pipe jacking; metro station; underground pipeline; numerical simulation; impact analysis

随着城市轨道交通的快速发展,地下空间与周边环境的矛盾日益突出。矩形顶管技术因其施工速度快、对周边环境影响小等优点,被广泛应用于地铁车站出入口和过街通道工程中^[1]。

目前,国内外学者开展了大量关于顶管施工的研究,主要有:喻军等^[2]通过改变数值模拟中参数值的大小,对地表沉降进行了研究;张文瀚等^[3]采用有限元模拟了粉土地层圆形顶管的施工,研究了浅埋顶管施工中路基的变化规律;赖金星等^[4]采用数值模拟考虑了多种因素对土体变形的影响,认为引起土体沉降是顶推力和地层损失共同作用的结果;郝小红等^[5]基于郑州市某超大断面矩形顶管工程,采用数值模拟和现场测试探究了施工过程中地层的变化规律;黄吉龙等^[6]和张建安^[7]通过研究顶管与周围土体的力学效应,得到了顶管施工的影响范围和变化规律;温锁林^[8]研究了大尺寸顶管施工过程对地层及周围建筑物的影响,考虑了土体应力、水平位移及超孔隙水压力的影响;邓长茂等^[9]通过软土地区顶管施工的现场监测数据,对引起的地表沉降机理进行了研究,提出了相应的控制措施;王宁等^[10]对矩形顶管隧道群施工过程进行了研究分析,得到了矩形顶管隧道群施工对土体的扰动规律;贺善宁等^[11]和韩占波等^[12]通过理论计算和现场试验分别对浅埋顶管施工过程中的顶推力和地表变形规律进行了研究;景路等^[13]基于理论分析和现场测试,研究了顶管施工过程中地层损失对地表变形的影响规律。

综上所述,目前研究主要集中在圆形顶管和顶管与土体的力学行为方面,而对矩形顶管在含粘性土粗砂地层(尤其是富水地段)的近接下穿管线的研究较少。本文依托某铁路出入口顶管工程,对矩形顶管施工过程进行了数值模拟,重点研究了顶管顶进过程中既有管线的变形和地面沉降规律。研究成果可为复杂环境条件下矩形顶管的施工提供指导和帮助。

1 土体扰动及管线变形的机理分析

1.1 土体扰动分析

造成地层损失有3个主要原因:开挖面处前方土体向刀盘位移或背刀盘位移产生的地层损失使土体沉降或隆起;施工过程中顶管姿态调整纠偏、管周间隙和管节侧摩阻力的影响都会造成地层损失,管尾处的间隙不利于减阻泥浆的封堵,易造成较大地层损

失;隆起区地层变形主要由注浆压力以及管节安装时施加在土体上的顶推力引起的,管节与土体间的摩擦力是造成地层沉降的主要原因^[14]。

顶管顶进中,土体不断被切削排出,加上管片与土体间的摩擦力和注浆压力,原有应力平衡状态被打破,地层损失产生,从而引起地表沉降或隆起^[15]。

1.2 地下管线变形分析

矩形顶管施工引起的地层损失和扰动是管线变形的主要原因。顶管开挖前管线上方所受土压力与下部土体承载压力相等,处于平衡状态;顶管施工后下部土体卸载,上、下土压力不相等,平衡状态被打破,管线发生变形^[16]。土体变形包括水平方向的弯曲变形、竖向的沉降变形和净空收敛变形。变形严重时会导致管线开裂、渗漏和断裂等情况,严重影响管线安全。

2 工程概况

2.1 工程简介

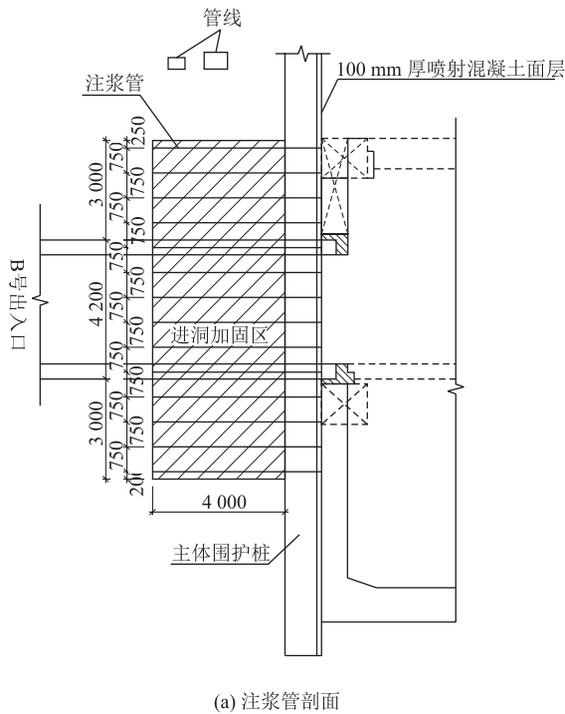
劲松四路站为地下两层岛式站台车站,车站沿阳西路东西向设置。劲松四路站B号出入口采用矩形顶管施工,是青岛地区首例矩形顶管法通道。顶管通道主要穿越粉质粘土和含粘性土粗砂地层,其中粗砂地层具有强透水性,顶管覆土厚度为8.3 m。矩形顶管结构尺寸为6.9 m×4.3 m,采用壁厚0.45 m、长1.5 m的钢筋混凝土预制管节,顶管穿越长度40 m。

顶管通道上部既有管线沿车站纵向布置,分布5根地下管线,其中3根为矩形管线,2根圆形管线,均为钢筋混凝土结构。管线距通道顶部最小垂直距离仅为1 m。始发井靠近车站主体结构,接收井位于出口处,从始发井到接收井为水平通道。由于靠近接收井位置处的管线地表无加固条件,采用洞内水平加固方式对接收端土体进行加固,于主体结构侧墙施作前进行加固。注浆采用管径50 mm刚性袖阀管后退式分段注浆。注浆加固区域如图1所示。

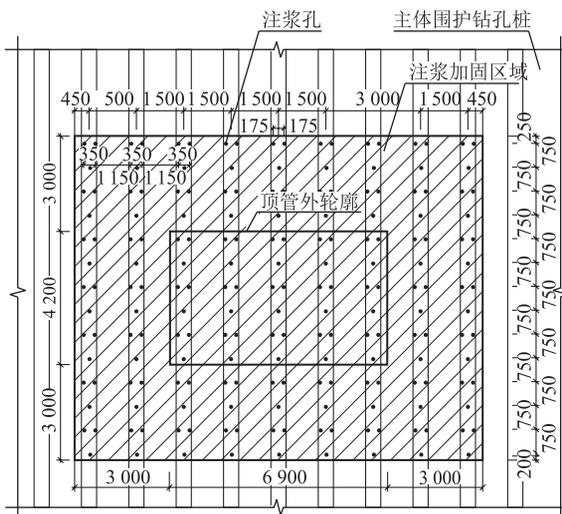
隧道顶部距地下管线最小垂直距离仅为1 m,为避免既有管线变形过大影响管线正常使用。根据GB 50911-2013《城市轨道交通工程监测技术规范》和管线部门的要求,确定本次本近接施工工程变形控制值标准,如表1所示。

2.2 水文地质条件

劲松四路站场地主要为绿化带,地形平坦。下穿



(a) 注浆管剖面



(b) 注浆管横断面

图 1 注浆管布置图(mm)

表 1 安全控制指标值表

环境类型	沉降		差异沉降
	累计值/mm	变化速率/(mm/d)	
混凝土管	20	2	0.3% Lg
钢管	30	2	0.25% Lg

注: Lg 为管节长度

施工地层由上到下为杂填土、粉质黏土、含粘性粗砂、强风化花岗岩和中等风化花岗岩。顶管隧道纵断面如图 2 所示。施工前通过设置降水井对下穿地层进行降水。

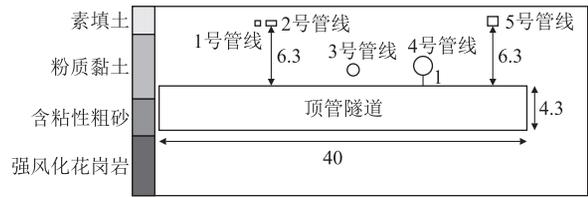


图 2 顶管隧道纵断面图(m)

3 数值仿真模型

3.1 模型概况

顶管隧道为矩形断面,尺寸为 6.9 m × 4.3 m,长 40 m,隧道上表面距离地表 8.3 m,管节厚 450 mm。隧道顶部距地下管线垂直距离最小为 1 m。考虑到盾构施工引起的边界效应,水平方向尺寸取盾构隧道位置深度的 3~5 倍、竖向取 2~4 倍^[17-18],模型尺寸长 × 宽 × 高为 100 m × 50 m × 30 m。模型上表面边界设置为自由边界,底面约束其全位移,侧向约束其法向位移。土体采用修正摩尔-库仑模型,地下管线及顶管结构构件采用弹性本构。有限元模型如图 3 所示。

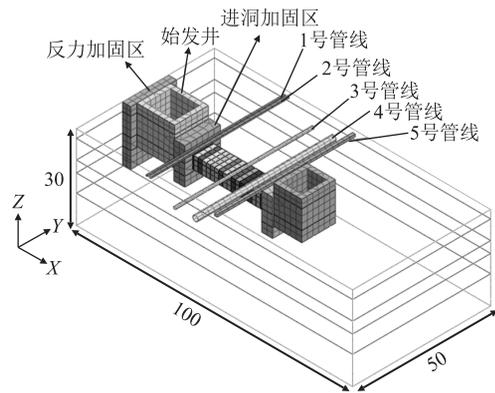


图 3 三维有限元模型图(m)

3.2 参数选取

根据岩土工程勘察报告和顶管设计资料,模型参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 土层物理力学参数表

材料名称	弹性模量 Es/MPa	容重 γ/(kN/m ³)	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
素填土	20	18.5	0.3	18	10
粉质粘土	10.4	19.6	0.25	22	18
含粘性粗砂	22.5	19	0.25	34	3
强风化花岗岩	32.6	23	0.21	33	33
中等风化花岗岩	55.8	24.7	0.22	31	40

表 3 材料力学参数表

材料名称	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 μ	容重 γ /(kN/m ³)
顶管管节	2.76×10^4	0.30	25
地下管道	2.55×10^4	0.30	22
注浆体	1.7	0.25	20

3.3 施工过程模拟

采用 Midas GTS NX 有限元软件对顶管顶进过程模拟, 模拟步骤为:

(1) 激活土层、地下管线和混凝土加固区等网格组, 添加自重及约束, 位移清零, 模拟顶管施工前的应力状态。

(2) 施加顶推力, 根据顶管埋深及土层物理力学参数理论计算荷载大小, 结合工程经验对其进行修正。模型中对土体开挖面施加 532 kPa 的均布荷载模拟顶推力, 顶推力方向与顶进方向相同。

(3) 开挖土体, 激活管节, 在矩形顶管外表面施加 0.3 kPa 的摩阻力, 与顶管顶进方向相反。注浆压力取 0.2 MPa, 均匀地施加在管节外表面。

4 数值模拟结果分析

4.1 地表沉降分析

地表位移由施工过程、方法和支护结构决定, 是隧道施工扰动的重要指标, 分别取距离始发井为 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m 处断面隧道沿纵轴方向地表沉降进行分析, 沉降曲线如图 4 所示。

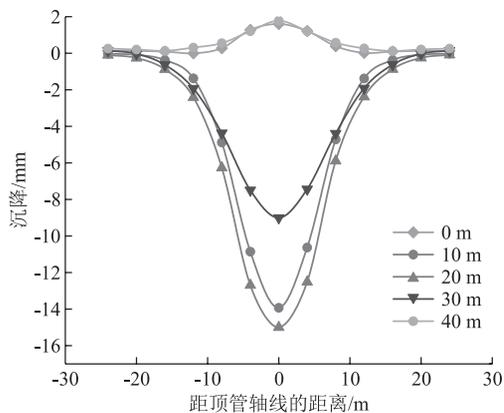


图 4 隧道施作完成后各断面地表沉降图

由图 4 可知, 隧道中部地表沉降呈“V”字型分布, 沉降最大值出现在隧道中轴线正上方, 沉降向两侧逐渐减小; 在始发井和接收井位置处出现地表隆起; 在 20 m 断面处地表沉降最大值达到 15.2 mm, 原因可能为隧道中部管节顶进的过程中与土体发生摩擦, 土体流失较多, 背土效应影响明显, 地层损失严重; 另外,

各断面的地表沉降横向影响宽度为 20 m 左右, 背土效应没有导致更大范围的地层损失。

顶管隧道施工完成后引起的地表位移如图 5 所示。

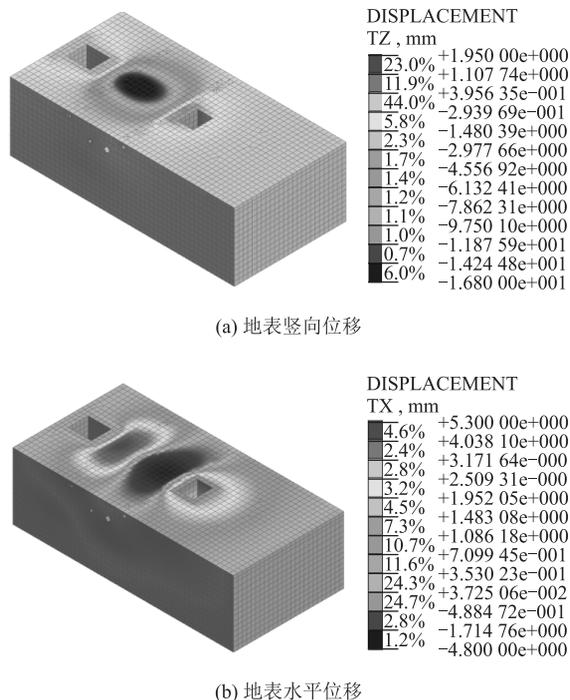


图 5 地表位移云图

由图 5 可知:

(1) 顶管施工导致的地表沉降最大值出现在隧道中间, 为 16.8 mm; 接收井和始发井地表均出现隆起, 隆起最大值为 1.95 mm; 顶管掘进中管片安装时所施加顶推力全部作用于始发井, 随着顶管隧道的掘进, 所需施加的顶推力也逐渐增大, 最终引起地表隆起。同时, 接收井出现的临空开挖面改变了该区域土层的应力分布; 注浆压力相同时, 开挖断面的顶推力和顶管机的侧摩阻力引起的地表隆起也大于其他区域。因此, 顶管施工前应对始发井和接收井周围土体进行局部加固。

(2) 地层水平位移最大为 5.3 mm, 隧道上方土体均产生了向顶管隧道中心靠拢的趋势, 盾构施工破坏了土层原有的应力状态, 土体的三向应力状态转变为两向应力状态; 同时, 隧道施工改变了原有的土压力分布, 隧道上方土层产生靠向隧道的水平位移。

从地层的整体变形可以看出, 地层变形主要集中在隧道中间上方, 以沉降为主, 始发井和接收井周围土体均产生隆起, 顶管施工过程中应加强对隧道中间部位、始发井和接收井地表位移的监测。

4.2 地下管线变形分析

运用有限元软件对顶管施工各个阶段进行模拟, 可直观地分析各个工况下管线的变形以及受力的规律差异。选取隧道施工一半和施工完成后两种典型工况下管线的变形进行分析, 位移云图如图 6 和图 7 所示。

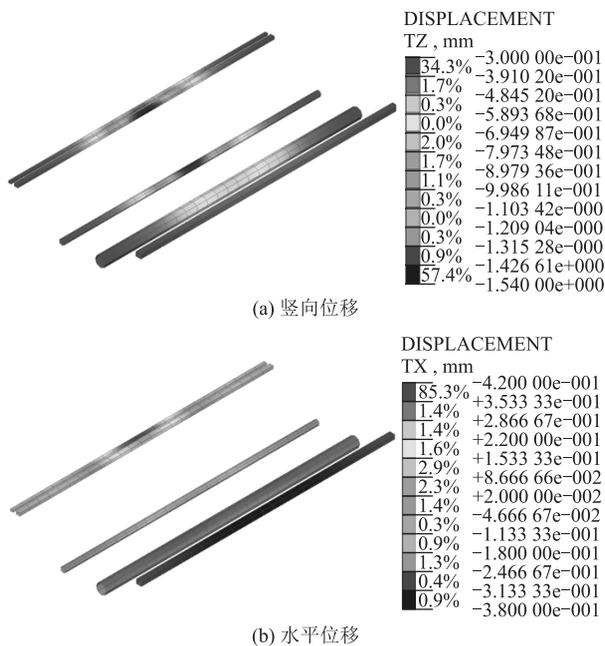


图 6 隧道施工一半时管线位移云图

由图 6 可知, 隧道开挖通过管线到达模型中部时, 由于 3 号管线与顶管的垂直距离仅有 1 m, 3 号管线受影响最大, 最大沉降量达到 -1.54 mm。水平方向, 隧道中部土体的沉降变形改变了两侧土体的受力状态, 使其产生向中间移动的趋势, 管线也在土体挤压力的作用下产生水平位移。水平位移最大值出现在 1 号管线中间部位, 为 0.42 mm。

从图 7 可知, 隧道开挖完成后管线沉降趋于稳定, 沉降最大值为到 -3.39 mm, 在隧道轴线上管线变形最大, 并依次向两边减小; 管线两端发生微小隆起, 最大隆起值为 0.2 mm, 这是由于管线整体为弹性体, 中部下沉, 两端微小隆起; 此外, 顶管施工引起的背土效应导致 1 号、2 号和 3 号管线的变形远大于 4 号和 5 号。

隧道下穿完成后, 管线水平位移的整体趋势为轴线左侧管线向右移动, 右侧管线向左移动, 管线在隧道轴线发生挤压变形; 同时, 接收井的临空开挖面和施加在始发井的顶推力导致开挖过程中地表产生隆起, 进一步加剧了 1 号管线和 5 号管线水平位移, 水平位移最大值在 0.64 mm 左右, 位于 1 号管线中间部位。顶管开挖对管线水平位移和竖向位移均产生一定影响, 因此, 在开挖过程中除了对地表变形监测, 也

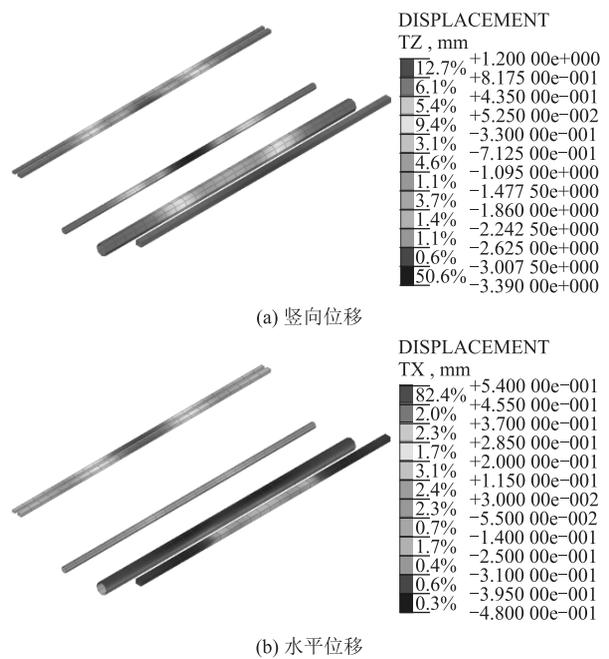


图 7 隧道施工结束后管线位移云图

应加强对管线变形的监测, 特别是 1 号、3 号和 5 号管线的变形。

5 现场监测数据分析

5.1 现场监测方案

为控制顶管施工过程中地层损失引起的管线变形, 在现场对管线布设监测点, 如图 8 所示。每条管线设置一个监测断面, 分别为 H1、H2、H3、H4 和 H5, 每个断面设置 5 个监测点, 间距为 5 m。将实测数据与数值模拟数据进行对比, 以此来验证本文数值模拟的合理性。

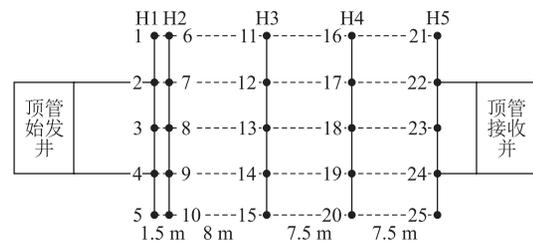
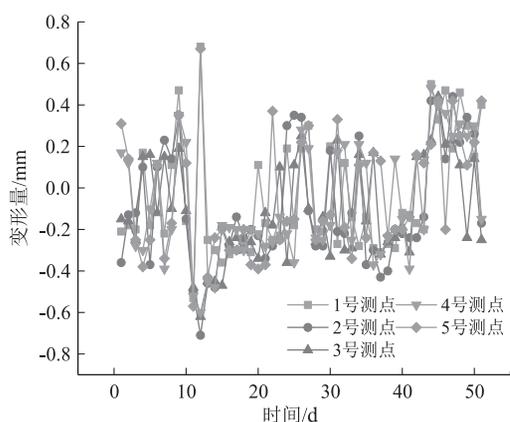


图 8 管线变形监测点平面布置图

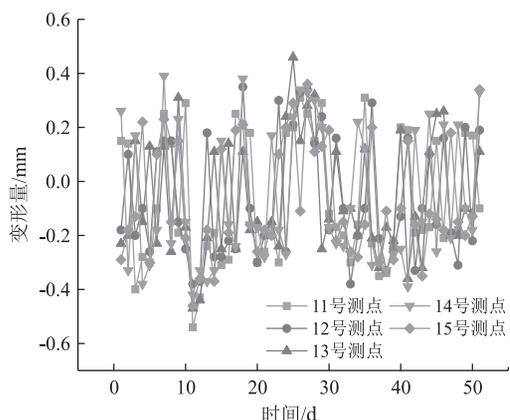
5.2 监测结果对比分析

管线的变形随时间的变化曲线如图 9 所示, 取变形较大的 1 号管线和 3 号管线进行分析。

由图 9 可知, 1 号管线和 3 号管线的变形规律相近, 前 10 d 变形在 -0.4 mm 到 0.2 mm 之间波动, 第 11 d 左右变形出现较大的波动, 1 号管线最大变形达到 0.7 mm/d, 3 号管线最大变形达到 0.52 mm/d;



(a) 1号管线变形监测数据



(b) 3号管线变形监测数据

图9 管线变形监测数据图

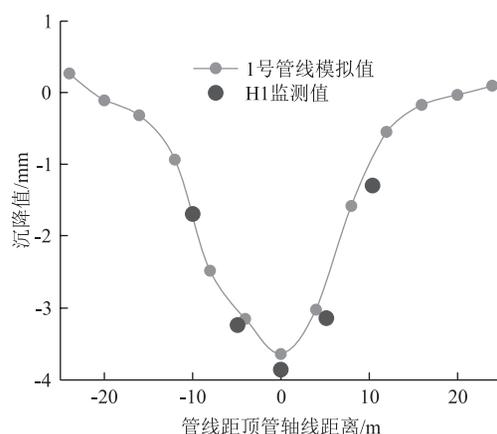
在11~20 d之间,1号管线持续沉降,没有出现回弹的现象,分析其原因可能为顶管施工的背土效应,管节外壁带走的土体较多,使得1号管线处土体损失严重;在20 d之后,1号和3号管线变形继续波动,监测结束后最终变形值稳定在3.5 mm左右。

将顶管开挖结束后1号和3号管线测断面对应的变形监测数据与数值模拟数据进行对比,如图10所示。

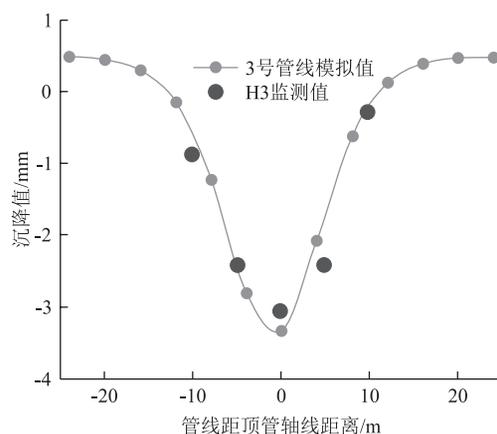
由图10可知,施工结束后数值模拟数据与管线变形实测数据较为接近,整体相差不大。整个施工过程中管线的最大变形量为4 mm,最大变形率为0.7 mm/d,远小于控制指标,始终处于安全范围内,说明施工中采取的工法是有效可行的,进一步表明本文数值模拟的结果是合理可信的。因此,通过该模型分析得到的2号、4号和5号管线的变形规律也能够代表本工程中实际的变形规律。

6 结论

本文以其铁路出入口顶管施工为背景,建立三维有限元模型,将数值模拟结果与实测数据进行对比分



(a) 1号管线监测数据、模拟数据对比



(b) 3号管线监测数据、模拟数据对比

图10 管线监测数据、模拟数据对比图

析,得出如下结论:

(1) 矩形顶管施工引起的地表变形整体为沉降,隧道上方土体产生了向隧道中心靠拢的趋势。地表沉降最大值16.3 mm,水平位移最大值5.3 mm。地表沉降最大值出现在隧道中间位置,沉降影响范围为20 m。受接收井的临空开挖面和施加在始发井的顶推力的影响,开挖结束后接收井和始发井地表产生一定程度的隆起,隆起最大值达到1.95 mm。

(2) 钢筋混凝土管线受施工干扰作用,出现一定程度的变形,整体表现为沉降;由于管线自身是弹性介质,在管线两端会出现微小隆起的现象;3号管线受影响最为严重,沉降最大值达到-3.39 mm;在水平方向上受土体挤压,发生水平位移,最大值为0.64 mm。隧道开挖对管线水平位移的影响小于对其竖向沉降影响。因此,在做好管线沉降变形控制工作的同时,也要注意对其施加水平约束,避免水平位移过大导致破坏。

(3) 由管线变形的实测数据可知,管线变形和变形速率均在安全控制指标内,施工中采取的工法有效可行;数值模拟呈现的管线变形规律与实测数据大致相同,进一步表明地表和管线变形规律是可信的。

参考文献:

- [1] 旷文涛,陈洲频,刘保林,等. 隧道管幕暗挖法原理及应用探讨[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 28-33.
KUANG Wentao, CHEN Zhoupin, LIU Baolin, et al. Discussion on Principle and Application of the Pipe-curtain Tunneling Method [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 28-33.
- [2] 喻军,龚晓南. 考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2605-2610.
YU Jun, GONG Xiaonan. Numerical Analysis of Surface Settlement Control Considering Pipe Jacking Construction Process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2605-2610.
- [3] 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(S2): 1619-1624, 1652.
ZHANG Wenhan, XIE Xiongyao, 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.
- [4] 赖金星,王开运,侯丹丹,等. 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 Jinxing, WANG Kaiyun, HOU Dandan, 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.
- [5] 郝小红,郭佳. 考虑超大断面顶管施工过程的地层变形数值分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 66-71, 81.
HAO Xiaohong, GUO Jia. Numerical Analysis of Stratum Deformation Considering Large Section Pipe Jacking Construction Process [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 66-71, 81.
- [6] 黄吉龙,陈锦剑,王建华,等. 大口径顶管顶进过程的数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 489-493.
HUANG Jilong, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, et al. Numerical Analysis of Large Diameter Pipe-jacking [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3): 489-493.
- [7] 张建安. 矩形顶管顶推力对上部地表位移影响规律研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(8): 266-268, 278.
ZHANG Jian'an. Study on Influence of Jacking Thrust of Rectangular Pipe Jacking on Upper Surface Displacement [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(8): 266-268, 278.
- [8] 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, 89.
WEN Suolin. A Study of Environmental Influence Caused by Large Section Rectangular Pipe Jacking Construction [J]. China Municipal Engineering, 2011(5): 37-39, 89.
- [9] 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.
DENG Changmao, PENG Jimin, SHEN Guohong. Discussion on Control Methods of Ground Surface Settlement Caused by Rectangular Pipe Jacking Construction in Soft Soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1002-1007.
- [10] WANG Ning, GAO Yi, YU Shaohui, et al. Disturbance of Rectangular Pipe Jacking Tunnel Group Construction on Soil Behind Working Shaft [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 413-420.
- [11] HE Shanning, DOU Xiaotian, ZHAO Liyong, et al. Analysis of Thrust Force of Adjacent Construction of Shallow-buried Rectangular Pipe Jacking Tunnel Group [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 383-390.
- [12] HAN Zhanbo, DOU Xiaotian, CAO Weiming, et al. Control Technology for Surface Deformation Induced by Construction of Shallow-covered and Small-spacing Rectangular Pipe Jacking [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 496-503.
- [13] 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(S1): 173-178.
JING Lu, YUAN Juyun, YUAN Yong. Ground Loss Parameter and Soil Deformation in Pipe Jacking [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 173-178.
- [14] 汤旅军,陈仁朋,尹鑫晟,等. 密实砂土地层盾构隧道开挖面失稳离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1830-1838.
TANG Lvjun, CHEN Renpeng, YIN Xinsheng, et al. Centrifugal Model Tests on Face Stability of Shield Tunnels in Dense Sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1830-1838.
- [15] 唐晓武,李姣阳,邹金杰,等. 浅埋盾构隧道开挖面失稳发展过程模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 863-869.
TANG Xiaowu, LI Jiaoyang, ZOU Jinjie, et al. Model Test of Evolution of Face Instability in Shallow Shield Tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5): 863-869.
- [16] 李姣阳,刘维,邹金杰,等. 浅埋盾构隧道开挖面失稳大比尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 562-567.
LI Jiaoyang, LIU Wei, ZOU Jinjie, et al. Large-scale Model Tests on Face Instability of Shallow Shield Tunnels in Sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 562-567.
- [17] WANG Hemin, XIAO Zunqun, TANG Dongsang, et al. Numerical Simulation and Field Monitoring of Construction Process of Rectangular Pipe Jacking in No. 1 Underground Passage of Shangdu Road Station on Zhengzhou Metro Line 4[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 110-119.
- [18] 张治国,师敏之,张成平,等. 类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 852-864.
ZHANG Zhiguo, SHI Minzhi, ZHANG Chengping, et al. Research on Deformation of Adjacent Underground Pipelines Caused by Excavation of Quasi-rectangular Shields [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 852-864.