

富水粉细砂层联络通道顶管法施工地表沉降分析

李晓龙¹, 栗鹏超¹, 刘小锋¹, 孙立军², 郭长龙², 何 况³

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101; 3. 郑州地铁集团有限公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 为研究富水粉细砂层地铁联络通道顶管法施工对地表沉降的影响, 对郑州地铁 12 号线 08 工区埋深 15 m、长 7.5 m 的联络通道在顶管法施工过程中的地表沉降进行了监测, 并结合“地层-主隧道-内支撑-联络通道”体系三维数值模型, 深入分析了顶管掘进过程中地表沉降的时空演化规律。结果表明: 地表沉降量随着顶管机的推进逐渐增大, 顶推到位后达到最大沉降值, 其中台车就位、始发破洞及接收破洞阶段产生的沉降增量明显大于其他开挖阶段, 设备拆除后, 受卸载作用影响, 地层产生一定量回弹, 沉降值减小; 地表沉降曲面呈漏斗状, 沿联络通道中心线方向左右对称, 沿垂直于中心线方向不对称, 最大沉降值位于纵向距离联络通道中心靠近始发端 3 m 处; 联络通道顶管法施工对地表横向影响范围更大, 地表沉降集中发生区域近似椭圆形, 其长轴垂直于联络通道中心线。

关键词: 联络通道; 顶管法; 数值模拟; 现场监测; 地表沉降

中图分类号: U231.3

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.01.009

自 21 世纪以来, 我国城市地铁建设步入高速发展期, 运营规模不断扩大。上下行两条单线区间隧道应设横向联络通道, 用于隧道排水、防火、消防及疏散乘客等目的, 因此大量的联络通道需要修建。联络通道施工过程中会对地层产生二次扰动, 易诱发表面沉降, 导致路面下沉、建筑物倾斜、管道错台断裂等灾害。准确掌握开挖过程中地层沉降规律对完善施工工艺、防控上述灾害发生具有重要指导意义。

目前联络通道施工方法主要有矿山法和机械法。矿山法是一种传统开挖方法, 在开洞前需采取冷冻、注浆等方式提前对地层实施加固^[1-2]。针对联络通道矿山法开挖已有较多研究, 包括温度场传递、地层位移和地表变形等^[3-4]。作为一种联络通道传统施工方法, 矿山法存在施工周期长、风险大等不足^[5-7]。

机械法是近几年发展起来的一种联络通道施工新型工法^[8], 根据掘进模式可分为盾构法和顶管法。该方法较好地克服了矿山法的缺点, 对地层扰

动小、施工周期短, 显示出良好的应用前景。孙龙飞等^[9]通过数值模拟得到了宁波 3 号线黏土地层联络通道盾构法施工地层沉降变化规律; 卫佳莺等^[10]采取现场实测、理论分析和数值模拟相结合的方式对黏土地层中顶管法联络通道 T 接施工地层沉降变化特征展开了研究, 并探讨了不同顶推力对地面沉降的影响; 胡威等^[11]结合数值模拟与现场监测研究了粉砂层顶管法联络通道施工 T 接部位沉降规律, 并分析了埋深和地层类型对地表沉降的影响; 梅清俊等^[12]依托宁波 3 号线某联络通道工程, 研究了软土地层中盾构法施工对地层沉降的影响。总体来看, 由于目前联络通道顶管法施工尚处于探索和起步阶段, 关于联络通道顶管法施工对地表沉降影响规律的研究较为匮乏。现有工程案例研究中联络通道穿越地层为黏土或粉砂层, 尚未见关于饱和粉细砂层联络通道顶管法施工对地表沉降影响的研究。

基于上述背景, 本文依托郑州地铁 12 号线联络通道工程, 通过现场监测和数值模拟, 对富水粉细砂层联络通道顶管法施工过程中的地层沉降规律进行

收稿日期: 2024-06-05; 修订日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178401); 河南省高校科技创新团队支持计划(23IRTSTHN014); 中原英才计划(234200510014)

作者简介: 李晓龙(1977—), 男, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土及地下工程安全防护理论与技术研究, E-mail: lxl1977@zzu.edu.cn。

研究,旨在揭示其时空演变规律和分布特征,进一步丰富机械法联络通道施工案例,为今后同类工程施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

联络通道位于郑州市轨道交通 12 号线 08 工区一期工程龙子湖西站—龙子湖站区间,通道穿越地层如图 1 所示,主要穿越地层为细砂 2、细砂 3 以及细砂 4。沿线地下水位埋深位于地表下 11.14 ~ 14.32 m,上部黏质粉土和粉质黏土为弱透水层,下部细砂为强透水层。各土层物理力学参数指标如表 1 所示。

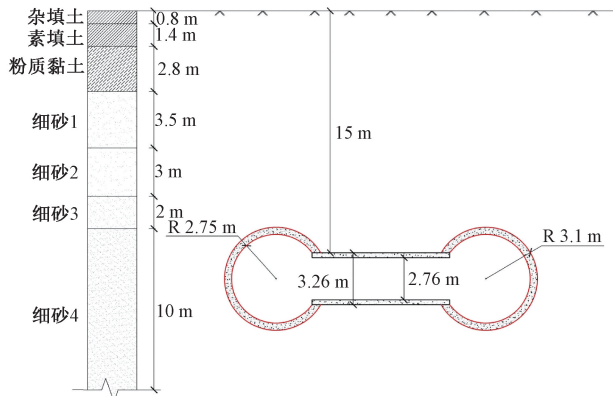


图 1 联络通道穿越地层剖面图

Figure 1 Stratigraphic section of the contact channel through the ground

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

地层名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
杂填土	18.0	0.35	8.0	11.2	16.5
素填土	18.5	0.36	8.2	12.8	18.2
粉质黏土	19.1	0.35	9.0	12.1	22.3
细砂 1	19.5	0.36	15.0	1.0	30.0
细砂 2	19.4	0.36	18.0	2.0	31.0
细砂 3	19.6	0.35	20.0	0	32.0
细砂 4	19.8	0.36	22.0	1.0	30.0

1.2 联络通道设计参数

主线隧道采用盾构法施工,管片内径 5.5 m,外径 6.2 m,管片厚度 0.35 m,对主隧道 T 接部位处管片进行钢-混凝土特殊设计,并预留可切削部位,使其具备机械法施工条件;联络通道长度 7.5 m,埋深 15 m,通道衬砌由 C50 混凝土制作的预制管片错缝拼装而成,抗渗等级为 P10,管片环宽 0.9 m,外径 3.26 m,内径 2.76 m。联络通道 T 接部位结构设计如图 2 所示。

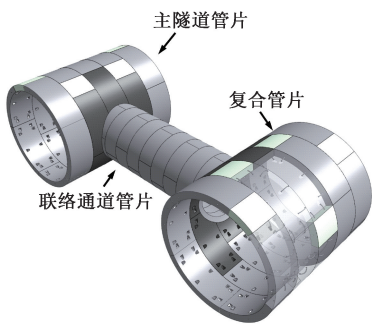


图 2 联络通道 T 接部位结构设计示意图

Figure 2 Schematic structural design for contact channel T-connection part

1.3 施工流程

通道采用顶管法施工,由左线向右线推进,施工流程包括:①完成台车运输掘进机、始发套筒、接收套筒,洞门与套筒焊接,施加预支撑力等施工前期准备;②掘进机切削主隧道管片,始发套筒尾部持续油脂注入,刀盘进入土体;③管片拼装,千斤顶向前顶推管片,壁后注浆;④掘进机进入接收套筒,油门封堵;⑤套筒与洞门分离,焊接防水钢板,设备运出洞,洞门并接头施工。

1.4 监测方案

地表沉降监测点布置如图 3 所示。沿联络通道横向布置 5 个监测断面,依次命名为 MPH-01 ~ MPH-05,断面平行于主隧道中心线,每个断面间距 3 m,每个断面布置 5 个监测点,测点间距 3 m。沿联络通道纵向共设置 5 个监测断面,依次命名为 MPZ-01 ~ MPZ-05,断面与联络通道中心线平行,其中 MPZ-03 断面贯穿联络通道中心,断面间距 3 m,每个断面布置 7 个监测点。以第 1 个断面为例,监测点编号为 MP-01-01 ~ MP-01-07,测点间距 3 m。掘进期间地表沉降监测频率为 4 次/d,视沉降速率可增加监测频率,施工结束后,监测频率为 1 次/3 d,直至沉降数据稳定为止。

2 监测结果分析

2.1 联络通道横向地表沉降分析

选取台车就位、第 5 环开挖(联络通道中间环)、顶推到位、拆除设备 4 个阶段的沉降监测数据进行分析。其中 MPH-01 ~ MPH-03 这 3 个断面的监测结果如图 4 所示,可以看出,随着施工步骤的推进,3 个断面的沉降数据逐渐增大,顶推到位后沉降达到峰值,此时 3 个断面沉降最大值分别为 2.6、2.8、2.6 mm,拆除设备后,地层回弹,沉降量减小,3 个断面沉降峰值分别减小至 2.2、2.4、2.3 mm;沉降最大处位于联络通道中心线地表,沉降曲线关于

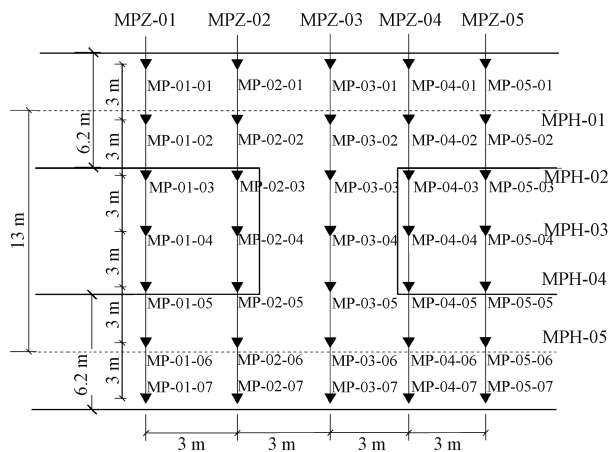


图3 地表沉降监测布置图

Figure 3 Surface settlement monitoring layout

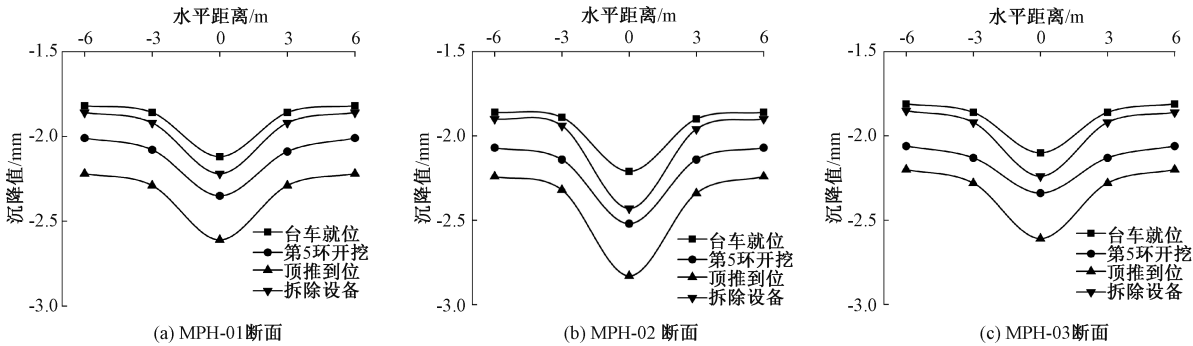


图4 联络通道横断面地表沉降监测

Figure 4 Surface settlement monitoring of the contact channel cross section

数据如图5所示,可以看出,3组断面沉降曲线变化趋势一致,均表现出地表沉降随掘进过程逐渐增大,施工结束拆除设备后,由于设备自重的影响及台车撑板对主隧道的支撑作用消除,地层产生回弹,地表沉降减少。MPZ-03断面沉降曲线变化幅度较MPZ-01、MPZ-02断面更大,表明在中心断面地表同一工况下不同位置处的沉降差异更加明显,这是由于此断面在掘进机掘进过程中前方土体与后方土体所受

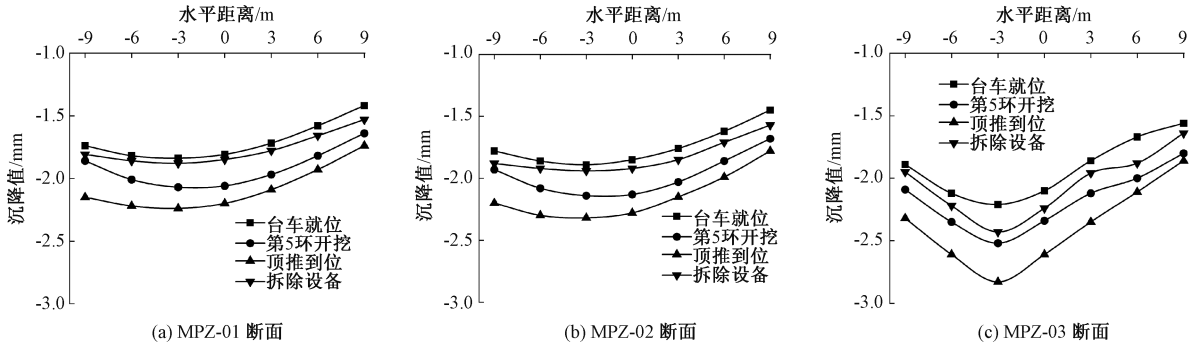


图5 联络通道纵断面地表沉降监测

Figure 5 Surface settlement monitoring of the contact channel longitudinal section

图6所示为MP-03-03、MP-03-04、MP-03-05沉降监测点施工周期沉降数据,可以发现,在拆除设备之前的开挖阶段,监测点沉降值均随施工步骤的向

联络通道中心纵断面对称,表明联络通道开挖对横向两侧对称位置处土体扰动程度基本相同;在中心纵断面左右3m测点处沉降曲线倾角发生较大变化,沉降值差异较大,外侧监测点曲线斜率较小,沉降值趋于稳定,且MPH-02断面沉降曲线的变化幅度大于其他断面,表明联络通道施工对于横向左、右3m范围内土体影响较之外的土体扰动大,而对靠近T接部位处土体扰动更加显著;MPH-02断面各沉降点监测数据在每种工况下均大于其他两组断面,表明联络通道上方地表靠近始发端T接部位处沉降大于其他区域。

2.2 联络通道纵向地表沉降分析

联络通道纵向监测断面MPZ-01~MPZ-03沉降

到的扰动程度差异较其他断面更加明显。MP-03-03监测点顶推到位时沉降值最大,达到2.8mm,由于始发端受顶推力作用,且台车及顶管机自重较大,本项目的顶管设备总重约390t,最大沉降值均出现在靠近T接部位处,这与横断面沉降监测数据一致;随着纵向监测断面位置向联络通道中心断面靠拢,沉降逐渐增大,在联络通道中心纵断面处沉降最大。

前推进而逐渐增加;开挖结束设备拆除后,各监测点均产生较大回弹,沉降值减少。在开挖阶段,3条曲线在台车就位至第1环开挖、第9环开挖至顶推到

位的斜率较其他开挖阶段更大,表明两个阶段产生的沉降大于开挖过程中的其他阶段,这是由于两个阶段分别包括掘进机进洞、出洞,掘进机刀盘磨削管片,主隧道结构完整性被破坏,周围土体受到较大扰动,而其他开挖阶段沉降相差不大。位于纵向距离联络通道中心靠近始发端 3 m 处 MP-03-03 监测点各工况沉降均大于其他监测点,当顶推到位后沉降值达到最大。

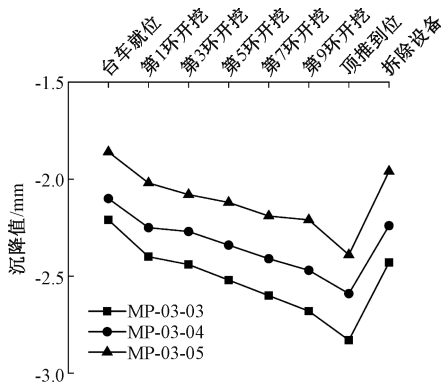


图 6 特定监测点沉降

Figure 6 Settlement of specific monitoring points

3 联络通道顶管法施工数值模型

为深入揭示联络通道顶管法施工地表沉降时空演变规律,采用 MIDAS 软件建立“地层-主隧道-内支撑-联络通道”体系三维弹塑性数值模型,通过对施工过程的模拟,系统分析地表扰动区域沉降分布特征。

3.1 模型参数

模型尺寸为 80 m(X) \times 61.5 m(Y) \times 35 m(Z),左、右主隧道各选择 41 环管片,联络通道位于主隧道中部,计算模型如图 7 所示。

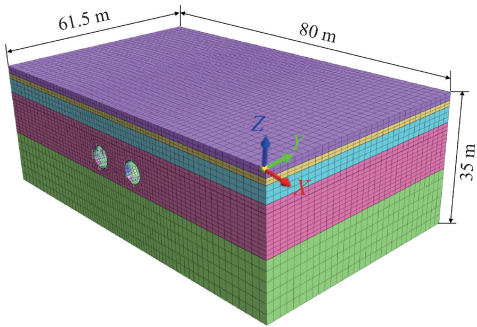


图 7 三维有限元数值模型

Figure 7 3D finite element numerical modeling

土体本构选择修正摩尔-库伦模型^[13],土体采用实体单元。结构部分视为各向同性-弹性体,其中主隧道及联络通道管片采用壳单元^[14],T 接部位主隧道、联络通道管片为复合管片,其材料选择钢混结构,其余管片材料均为 C50 钢筋混凝土。台车主体

采用实体单元,撑板采用板单元,撑杆采用梁单元,顶管机前端切削部分采用实体单元,套筒采用板单元;浆液充填层采用实体单元^[15]。模型材料及其主要物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型材料及其主要物理力学参数

Table 2 Model materials and main physical mechanical parameters

类别	材料	重度 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	弹性模量 E/MPa
管片	C50	26.0	0.20	34 500
复合管片	钢混结构	40.0	0.20	40 000
联络通道管片	C50	26.0	0.20	21 000
联络通道复合管片	钢混结构	40.0	0.20	24 000
台车撑板	钢材	30.0	0.20	150 000
台车撑杆	钢材	78.5	0.20	200 000
浆体	C25	20.0	0.26	50
掘进机	钢材	16.5	0.20	100 000
套筒	钢材	78.5	0.20	200 000

考虑到联络通道管片为错缝拼装,采用修正惯用法^[16]对管片模量进行修正;对于主隧道管片,通过在管片间添加接缝单元模拟管片间相互作用^[16]。

3.2 施工模拟

顶管法施工过程中的主要荷载有:①作用于切削面的推力;②作用于管片外表面的注浆压力;③作用于始发台车撑板表面的千斤顶推力;④作用于台车的预支撑力。采用竖向 20 kPa 均布压力模拟地面荷载。荷载施加如图 8 所示。

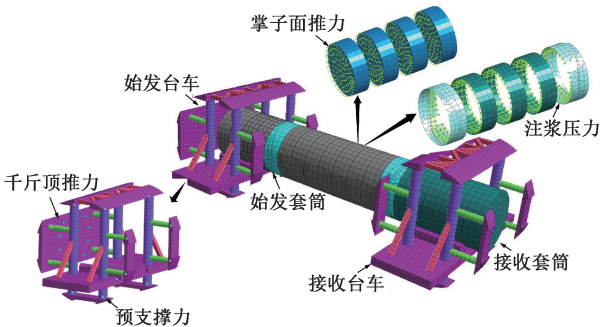


图 8 荷载施加

Figure 8 Load application

模拟过程中,首先激活位于始发台车的管片,然后依次激活掘进方向管片,同时激活对应的顶推力。台车就位后施加竖向预支撑力 100 kN、水平向预支撑力 25 kN,开挖过程中保持不变,顶推到位后将其撤除。联络通道内部管片被激活的同时施加对应的注浆压力,当通道内的所有管片被激活时,浆液由液态转化为固态,注浆压力撤销,注浆层属性变为固化浆液^[17]。结合实际施工过程选取典型工况进行数值模拟,工况划分情况如表 3 所示。

表 3 研究工序模板

Table 3 Study of working procedures

工况	工况具体介绍
工况一	台车就位,施加预支撑力
工况二	开挖联络通道土体第 1 环
工况三	开挖联络通道土体第 3 环
工况四	开挖联络通道土体第 5 环
工况五	开挖联络通道土体第 7 环
工况六	开挖联络通道土体第 9 环
工况七	顶推到位,卸载顶推力
工况八	拆除设备

4 地表沉降计算结果分析

4.1 计算结果与监测结果对比

选取模型联络通道中心纵断面地表沉降数据与监测数据进行对比,如图 9 所示。可以看出,台车就

位、开挖联络通道土体第 5 环、拆除设备后 3 个阶段的监测值与数值模拟结果变化趋势基本一致,沉降峰值均出现在靠近 T 接部位处,随着与 T 接部位距离的增大,测点的沉降量减小。3 个阶段监测值与数值模拟结果较为吻合,沉降最大值相对误差分别为 4.1%、0.8%、6.6%,测点沉降量平均相对误差分别为 3.4%、5.0%、5.9%。表明建立的数值模型能够较好地反映“地层-主隧道-内支撑-联络通道”体系的相互作用机制。

4.2 地表沉降时空分布特征分析

4.2.1 联络通道横向地表沉降分析

图 10 所示分别为距离中心横断面-6、-2、2、6 m 处不同工况下地表沉降的横向分布曲线。由图 10 可以看出,横向监测断面的沉降曲线关于联络通道中心纵断面对称,这与横断面地表沉降监测数据

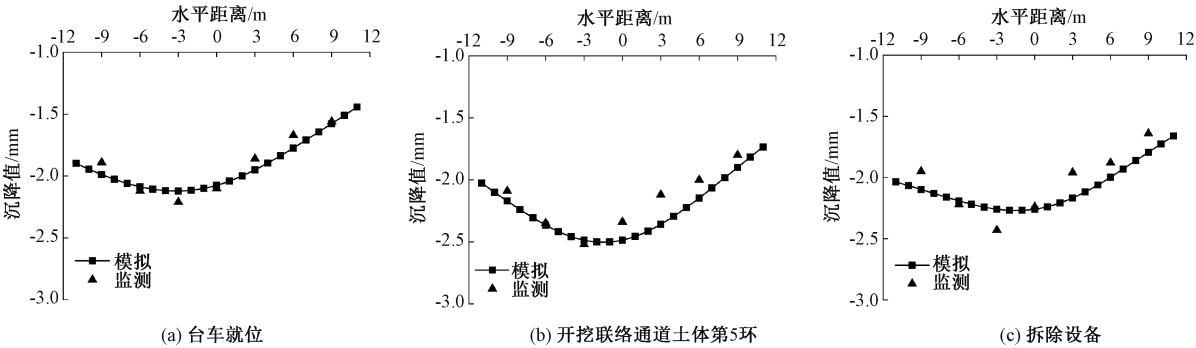


图 9 监测与数值模拟计算结果对比

Figure 9 Comparison of monitoring and numerical simulation result

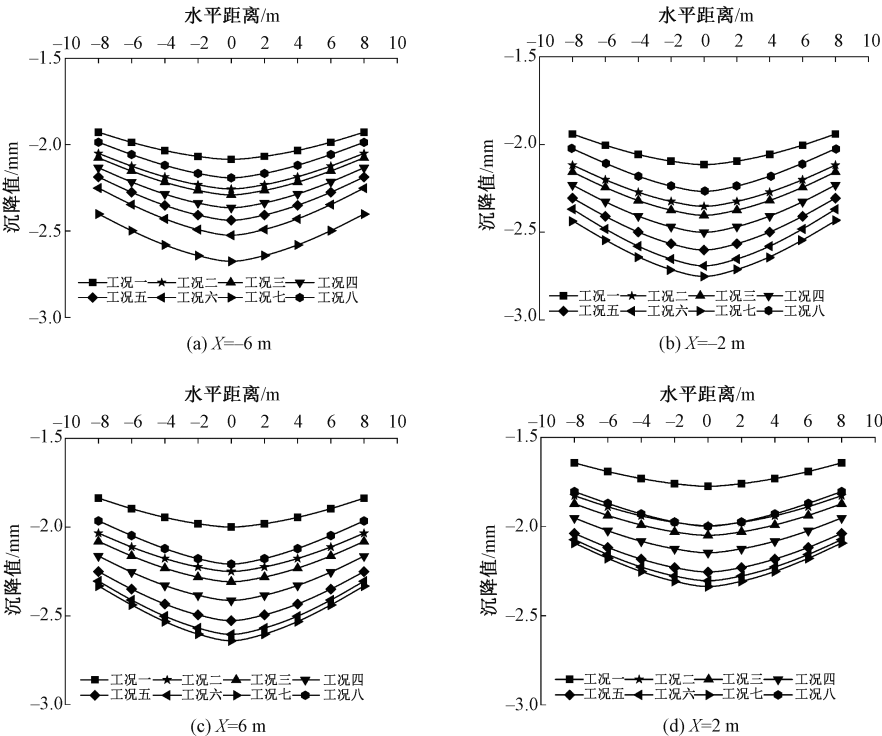


图 10 联络通道横断面计算地表沉降

Figure 10 Calculation of surface settlement in the cross section of the contact channel

规律一致;-2 m、-6 m 断面沉降数值均分别大于与之对称的 2 m 断面、6 m 断面,表明始发端地层受到的扰动程度比接收端更加显著。所有断面的沉降峰值均出现于顶推到位后,其中最大值位于-2 m 横断面中心点处,为 2.75 mm。

4.2.2 联络通道纵向地表沉降分析

由于横向地表沉降关于联络通道中心纵断面对称,选取-6 m、-2 m、0 m 纵向断面沉降计算结果进行分析,如图 11 所示。可以看出,受设备自重及顶推力影响,沉降曲线最低处向始发端 T 接部位偏

移,曲线底部集中于-2 m 处,说明联络通道施工对始发端靠近 T 接部位周围土体影响较其他部位更明显。随着施工掘进,沉降逐渐增大,当施工结束设备拆除后,土体回弹,沉降量减少,减少量不超过 0.5 mm。台车就位较开挖第 1 环后产生开挖阶段最大的沉降差异,其次是开挖第 9 环较顶推到位的沉降差异,两个破洞阶段产生的沉降差异不大。上述联络通道纵断面沉降差异具有同样的规律,表明台车就位之后所进行的破洞及掘进机出洞对周围土体产生的扰动大于其他施工阶段。

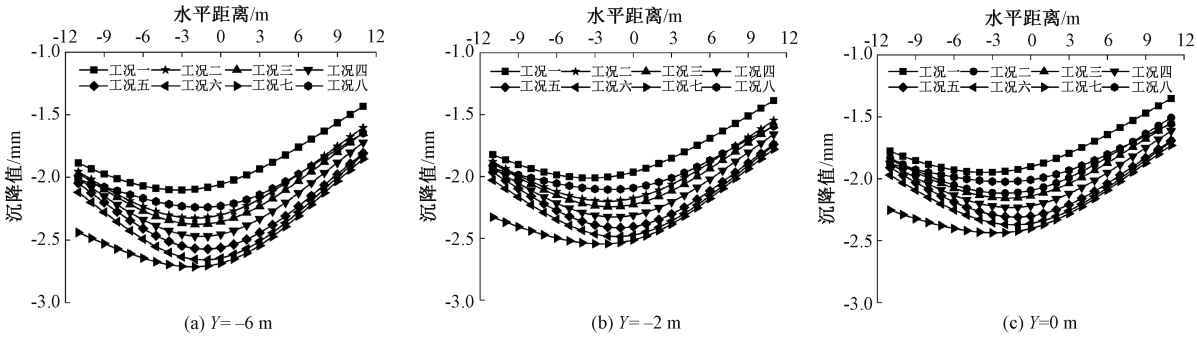


图 11 联络通道纵断面计算地表沉降

Figure 11 Calculation of surface settlement in the longitudinal section of the contact channel

台车就位、顶推到位、拆除设备 3 个阶段地表沉降云图如图 12 所示,可以看出,联络通道地表纵断面各工况数值模拟沉降曲线呈漏斗状,地表沉降主要发生区域(大于-1.53 mm)近似为 X 方向-24~17 m,Y 方向-28~27 m 的椭圆形,其长轴垂直于联

络通道中心线,表明对横向地表沉降影响范围更大;联络通道顶管法施工过程中对始发端地表沉降的影响总是大于接收端地表沉降,这与始发端的顶推力作用密切相关;拆除设备后联络通道地表周围区域产生回弹,地层沉降量减少。

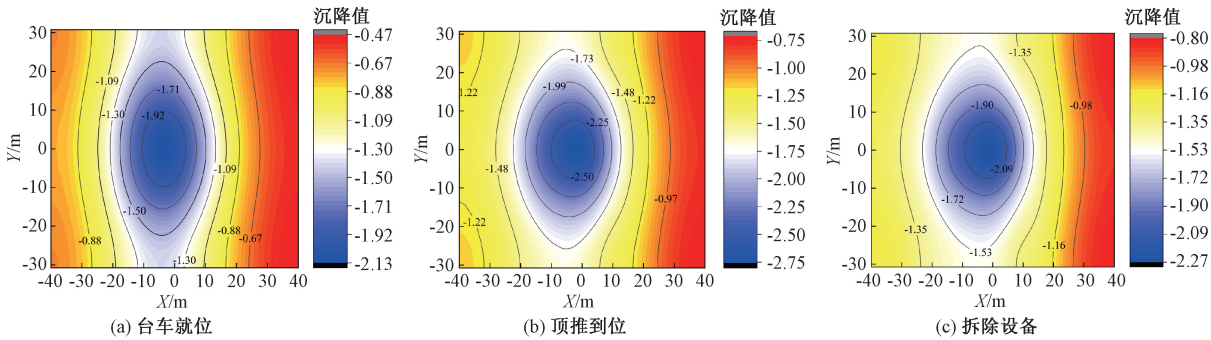


图 12 地表沉降云图

Figure 12 cloud map of surface subsidence

5 结论

本文依托郑州地铁 12 号线富水粉细砂层埋深 15 m、长 7.5 m 联络通道工程,通过现场监测和数值模拟对联络通道顶管法施工过程中的地表沉降时空演变规律进行了研究,取得的主要结论如下。

(1)联络通道顶管法施工可分为台车就位、始发破洞、土体开挖、接收破洞、顶推到位、拆除设备 6 个阶段,随着联络通道顶管法施工步骤的推进,地表

沉降逐渐增大,顶推到位后沉降量达到最大值 2.8 mm,其中台车就位、始发和接收破洞阶段产生的沉降增量明显高于其他开挖阶段,设备拆除后,受卸载作用影响,地层产生回弹,地表沉降量减小至 2.4 mm。

(2)该工程地表沉降空间分布具有明显不均匀性,沉降曲面呈横向对称、纵向不对称的漏斗状。受设备自重及顶推力作用影响,富水粉细砂层联络通道顶管法施工始发端地表沉降始终大于接收端沉降

值,沉降最大值位于纵向距离联络通道中心靠近始发端 3 m 处。

(3)监测结果显示,富水粉细砂层联络通道顶管法施工产生的地表沉降量较小,最大值仅为 2.8 mm,表明该工程顶管法施工过程对地层扰动较小,能够较好地控制地表沉降。本文进一步丰富了机械法联络通道施工案例,为今后同类工程提供了参考。

参考文献:

[1] 王晖,竺维彬,李大勇. 富水砂层中联络通道施工工法及其控制措施[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 82-87.

WANG H, ZHU W B, LI D Y. Construction method and control measure for connecting passage in water-enriched sand bed[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(9): 82-87.

[2] 田海洋. 冻结法加固技术在富水粉细砂层联络通道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊 2): 214-222.

TIAN H Y. Application of freezing method in connection channel construction in water-rich silty sand layer[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S2): 214-222.

[3] 梅源,赵良杰,周东波,等. 冻结法在富水砂层暗挖施工中的应用[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 1-10.

MEI Y, ZHAO L J, ZHOU D B, et al. Application of AGF in underground excavation construction of water-rich sand layer[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 1-10.

[4] 张英智,阮雷,韦晓霞,等. 富水砂层盾构隧道联络通道人工冻结法地层变化特性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊 2): 106-114.

ZHANG Y Z, RUAN L, WEI X X, et al. Characteristics of stratum variations for connecting passage of shield tunnel with artificial freezing method in water-rich sand stratum[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 106-114.

[5] 王晖,李大勇,李健,等. 地铁联络通道冻结法施工三维数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 2): 1589-1593.

WANG H, LI D Y, LI J, et al. Analysis of 3D numerical simulation in ground freezing method for a cross passage of the subway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2): 1589-1593.

[6] 郇新军,李铭远,张景伟,等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1267-1276.

GAO X J, LI M Y, ZHANG J W, et al. Field research on artificial freezing of subway cross passages in water-rich silty clay layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1267-1276.

[7] LIU X, SHEN Y P, ZHANG Z C, et al. Field measurement and numerical investigation of artificial ground freezing for the construction of a subway cross passage under groundwater flow[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 37: 100869.

[8] 黄大维,陈后宏,徐长节,等. 联络通道施工盾构机接收对已建盾构隧道影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 784-793.

HUANG D W, CHEN H H, XU C J, et al. Experimental study on influences of shield machine reception on existing shield tunnels during construction of connecting channels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 784-793.

[9] 孙龙飞,陈振雷,李坚成. 盾构法开挖地铁联络通道对地表沉降的影响研究[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(4): 197-201, 213.

SUN L F, CHEN Z L, LI J C. Effects of surface subsidence in excavation of metro crossing passage tunnel by shield machine[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2019, 33(4): 197-201, 213.

[10] 卫佳莺,马永政,莫振泽,等. 机械法联络通道 T 接施工地层隆沉变化特征研究:以无锡地铁 3 号线顶管法联络通道 T 接施工示范工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊 2): 136-143.

WEI J Y, MA Y Z, MO Z Z, et al. Study on influence of ground settlement in T-joint connecting passage with mechanical pipe jacking method: with the example of the demonstration project of T-joint construction of connecting passage with pipe jacking method in Wuxi Metro Line 3[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S2): 136-143.

[11] 胡威,黄强,李海波,等. 机械法联络通道施工对 T 接部位沉降影响的实测与数值分析[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(13): 68-74, 80.

HU W, HUANG Q, LI H B, et al. Actual measurement and numerical analysis of influence of mechanical connection channel construction on settlement of T-junction[J]. Construction Technology, 2022, 51(13): 68-74, 80.

[12] 梅清俊,朱瑶宏,马永政,等. 滨海软土地层机械法联络通道施工影响监测分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2021, 34(2): 73-79.

MEI Q J, ZHU Y H, MA Y Z, et al. Monitoring and analysis of the influence of mechanical connecting passage construction in coastal soft soil layer[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2021, 34(2): 73-79.

[13] 吴波, 许杰, 黄惟, 等. 富水砂层刚度参数敏感性分析及地表沉降预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 96-102.
WU B, XU J, HUANG W, et al. Sensitivity analysis of stiffness parameter and prediction of ground settlement for watered sandy stratum[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(9): 96-102.

[14] 吴宏, 叶治, 张宇亭, 等. 穿越不同密实度饱和砂土地层的盾构隧道地震响应三维数值分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1204-1216.
WU H, YE Z, ZHANG Y T, et al. Numerical study on seismic behavior of shield tunnel crossing saturated sandy strata with different densities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1204-1216.

[15] 郜新军, 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.

[16] 姚超凡, 晏启祥, 何川, 等. 盾构隧道内力分析方法的对比研究[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(12): 95-99.
YAO C F, YAN Q X, HE C, et al. Comparative study on internal force analysis methods of shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(12): 95-99.

[17] 吴华州, 李兴高, 蔡志勇. 复杂地质环境下异形交叉暗挖通道开挖数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(增刊1): 303-312.
WU H Z, LI X G, CAI Z Y. Numerical simulation of excavation of irregularly crossed mined tunnels in complex geological environment[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(S1): 303-312.

Analysis on Surface Settlement of Pipe Jacking Method for Construction of Contact Channel in Water-rich Silty Fine Sand Layer

LI Xiaolong¹, LI Pengchao¹, LIU Xiaofeng¹, SUN Lijun², GUO Changlong², HE Kuang³

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. China Railway 14th Bureau Group Corporation Limited, Jinan 250101, China; 3. Zhengzhou Metro Group Corporation Limited, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to study the influence of pipe jacking method on surface settlement of subway contact channel in water-rich silty sand layer, the surface settlement of contact channel with 15 m depth and 7.5 m length in 08 work area of Zhengzhou Metro Line 12 during pipe jacking construction was monitored, and the spatial and temporal evolution law of surface settlement during pipe jacking construction was analyzed in combination with 3D numerical simulation of "stratum-main tunnel-inner support-contact channel" system. The surface settlement increased gradually with the pushing of pipe jacking machine, and reached the maximum settlement value after pushing in place, in which the settlement increment produced in the stage of trolley positioning, starting hole breaking and receiving hole breaking was obviously larger than that in other excavation stages. After the equipment was dismantled, the stratum would rebound a certain amount due to unloading effect, and the settlement value would decrease. The surface settlement curve was funnel-shaped, symmetrical along the direction perpendicular to the center line of the contact channel, asymmetrical along the direction parallel to the center line, and the maximum settlement value was located 3 m away from the center of the contact channel and close to the starting end in the longitudinal direction. The horizontal influence range of the contact channel pipe jacking method on the surface was larger, and the concentrated area of the surface settlement was approximately elliptical, and its long axis was perpendicular to the axis of the contact channel.

Keywords: contact channel; pipe jacking method; numerical simulation; field monitoring; surface settlement