

并行大断面顶管下穿管线地表变形规律实测分析

王增辉

(中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 为了探究并行大断面顶管近距离施工过程对地表沉降与上部管线变形的影响, 依托广州市轨道交通三号线东延段海傍站的车站顶管工程, 通过并行顶管施工全过程数据分析发现, 顶管机顶进阶段应重点控制刀盘前后1倍管节高度范围的土体沉降变形; 后行顶管顶进阶段对地表和管线影响小于先行顶管顶进阶段, 分别约占48.6%和51.04%; 适时对中间段管节进行二次注浆, 减小该段的地层损失, 有效控制地表沉降与管线变形。

关键词: 并行大断面顶管; 地表沉降; 管线变形; 现场实测

中图分类号: TU990.3; U455

文献标识码: A

Field Measurement and Analysis of Surface Deformation Law of Parallel Large Section Pipe Jacking under Pipeline

WANG Zenghui

(China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510635, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the influence of the short-distance construction process of parallel large-section pipe jacking on the surface settlement and the deformation of the upper pipeline, based on the station pipe jacking project of Haibin Station in the east extension section of Guangzhou Rail Transit Line 3, the data analysis of the whole process of parallel pipe jacking construction is carried out, and it is concluded that the soil settlement deformation in the range of 1 times the height of the pipe section before and after the cutterhead should be mainly controlled in the jacking stage of the pipe jacking machine. The influence of the later pipe jacking stage on the surface and pipeline is less than that of the first pipe jacking stage, accounting for 48.6 % and 51.04 % respectively. Timely secondary grouting of the middle section of the pipe section can reduce the formation loss of the section and effectively control the surface settlement and pipeline deformation.

Key words: parallel large section pipe jacking; surface subsidence; pipeline deformation; field measurement

顶管法施工具有施工速度快、安全性能高、对周围环境影响小等显著优点^[1], 顶管技术从圆形管道发展为矩形管道, 广泛应用于地下过街通道、地铁车站出入口、地下商场连接通道等地下空间工程^[2]。相较于单线顶管施工对周围地层影响, 并行双线顶管施工过程中, 后行顶管会对周围地层产生二次扰动, 加剧周围土体变形, 诸多学者对此也进行了大量的研究。不少学者对 Peck 公式进行了改进^[3-5], 以预测顶管施工中地表沉

降。李明宇^[6]通过现场实测对双线矩形顶管隧道施工过程中地表沉降分析, 发现矩形顶管施工对地面影响范围为顶管隧道宽度的1.4~1.5倍。刘永辉^[7]分析了粉土地层大断面矩形顶管施工对地表横向和纵向的影响范围。许有俊^[8]将顶管施工过程中的地表变形划分为4个阶段, 分别为缓慢隆起、快速隆起、沉降和稳定阶段。张凯^[9]采用 ABAQUS 建立三维模型分析了两孔并行顶管在不同纵向间距施工对地面沉降情况, 并通过双

收稿日期: 2024-03-08

作者简介: 王增辉, 硕士, 研究方向为岩土与地下结构设计

圆叠加模型对结果加以验证。张文帅^[10]认为顶管管径和顶管埋深是影响顶管施工时地表沉降的重要因素。赵玉权^[11]依托现场实测数据和数值计算两种方法对施工过程中产生的地表变形、摩阻力增长和管节在顶进过程中的受力情况进行了研究。李泽祥^[12]分析了大断面矩形顶管下穿国道时的地表扰动特征,得到了矩形顶管施工时纵向影响范围为10 m左右,横向影响范围为3倍的管节宽度。鲍锋^[13]分析并行差异断面顶管工程中两管节断面形状、断面尺寸、水平间距等因素对地表变形的影响。齐培林^[14]基于相似理论,建立模型试验分析了并行顶管间 $1D$ (D 为顶管管片宽度)管间距地表竖向位移、顶管周围土压力以及顶管应力应变的变化规律。王蕴晨^[15]对软土地层中大断面浅埋并行矩形顶管施工过程中的力学特性进行研究,发现应力值最大值在顶管底部位置处。周载延^[16]提出了矩形顶管顶力计算公式,结合现场实测数据对黏性地层大断面顶管工程的顶进力进行预估计算。陈雪华^[17]对双线矩形顶管施工引起地表沉降分析,施工结束后地表沉降呈W型。沈俊^[18]对隧道并行下穿燃气管线变形分析,发现随着后掘进隧道施工对周围土体产生的二次扰动使得管线沉降量加大。赵东平^[19]比较了Jacobsz曲线方程和Peck曲线方程在隧道下穿燃气管线变形的应用,认为Peck曲线方程计算得的管线沉降允许值更为合理。

目前顶管施工的研究成果主要集中于分析隧道施工中地表与周边环境变形情况,然而,对于并

行大断面顶管近距离施工情况的分析较少,尤其是地铁车站顶管施工方面。为此,本文依托广州市轨道交通三号线东延段海傍站的车站顶管工程,通过现场实测数据,分析并行大断面顶管近距离施工过程地表沉降与上部管线变形情况。

1 工程概况

广州市轨道交通三号线东延段海傍站位于番禺区亚运城西南角,京珠高速路东侧,车站横跨康体路与兴亚大道,呈东西向布置。其中车站西端有3根管线,由西向东分别为中石化输油管、大鹏燃气管和广州燃气管,直径分别为0.3 m、0.6 m和0.6 m,管线埋深分别为3.3 m、3.6 m和3.5 m,因此该段的车站采用顶管施工,管顶距离地表9.7 m。根据地勘资料可知顶管车站断面的地层土体主要为素填土、淤泥、粉质黏土、淤泥质土、中砂、强风化泥质砂岩、中风化泥质砂岩等。顶管段车站地质剖面如图1所示,不同土层土体物理力学指标如表1所示。

车站主体顶管段采用两条并行顶管平行布置,相邻顶管间净距1.5 m,管顶埋深约9.7 m,顶管为矩形截面,外轮廓尺寸为11.1 m×8.1 m,管片顶板和底板为厚度为0.8 m、侧墙厚度为0.7 m,管节长度为1.5 m,管节由东向西依次顶进,累计69环,其中左线33环,右线36环,左线为先行顶管,右线为后行顶管。中石化输油管、大鹏燃气管和广州燃气管与顶管斜交,中石化输油管位于Z27环、Y30环和Y29环上方;大

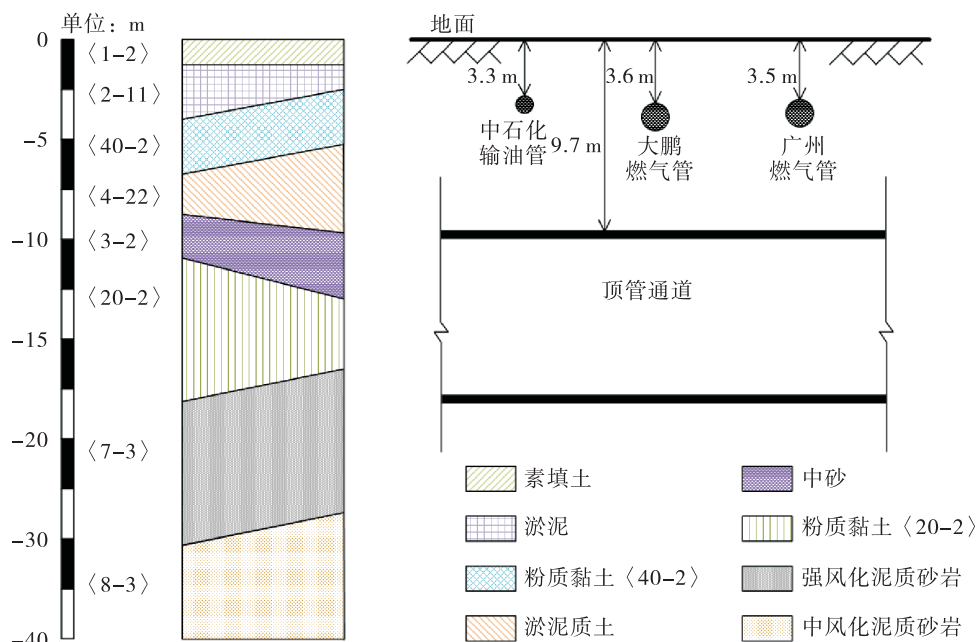


图1 车站顶管段地质剖面图

表 1 各层土的物理性质指标						
编号	土质	天然密度/(g/cm ³)	压缩模量/MPa	压缩模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
<1-2>	素填土	1.88	—	—	11	9
<2-21>	淤泥	1.56	1.86	3.0	6	3
<40-2>	粉质黏土	1.79	3.84	5.0	20	11
<4-22>	淤泥质土	1.69	2.54	4.0	8	3.5
<3-2>	中砂	1.95	12	12.0	—	28
<20-2>	粉质黏土	1.94	6.12	12.0	23	15
<3-2>	强风化泥质砂岩	2.01	8	45.0	36	34
<3-2>	中风化泥质砂岩	2.38	10	75.0	150	28

鹏燃气管位于 Z18 环、Z19 环、Y20 环和 Y21 环上方；广州燃气管位于 Z6 环、Z7 环、Y6 环和 Y6 环上方。其中 Z 代表左线，Y 代表右线。车站顶管段与管线平面位置见图 2。

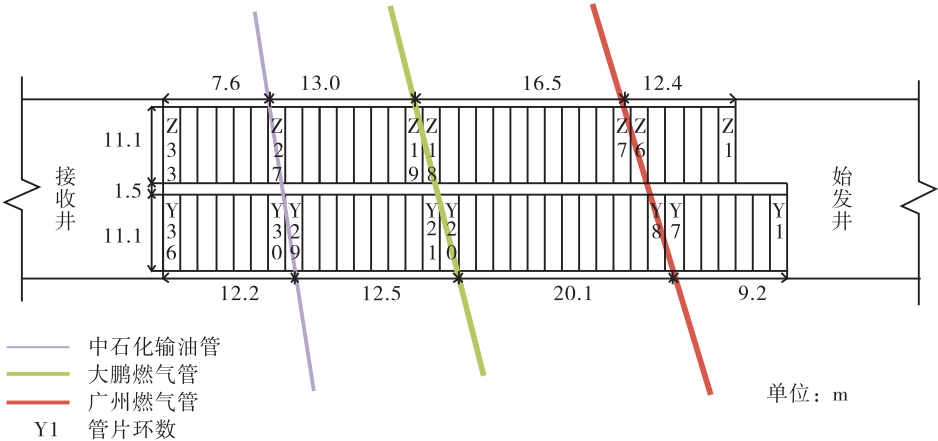


图 2 车站顶管段与管线平面位置示意图

2 现场监测

在车站顶管施工过程中，首先左线先行顶管始发端头型钢拔除→左线管节顶进→左线顶管接收端头型钢拔除→左线管节顶进完成→左线注浆加固；接着右线后行顶管始发端头型钢拔除→右线管节顶进→右线顶管接收端头型钢拔除→右线管节顶进完成→右线注浆加固。整个施工顶管施工过程中分别对其上部地表沉降和管线变形进行监测，施工现场监测情况见图 3。由顶管始发端向接收端方向，共设 7 个监测断面进行地表沉降

监测，3 根管线进行管线变形监测。根据顶管刀盘距离监测断面 3 不同位置划分不同工况，如表 2 所示。

表 2 工况说明			
左线先行顶管		右线后行顶管	
工况编号	顶管刀盘位置/m	工况编号	顶管刀盘位置/m
1	-12	8	-12
2	-8	9	-8
3	-4	10	-4
4	0	11	0
5	4	12	4
6	8	13	8
7	12	14	12

注：- 表示未到达监测面，+ 表示已超过监测面。



图 3 施工现场监测

根据相关监测规范，每个监测断面各设 11 个监测点，分别位于并行顶管间距中间，顶管管节中心，管节边侧位置处。由于受施工场地影响，现场地表沉降监测点 51 个，管线变形监测点 11 个，实际现场具体监测点位布置情况如图 4 所示，其中 DBC 表示地表沉降，GXC 表示管线变形。

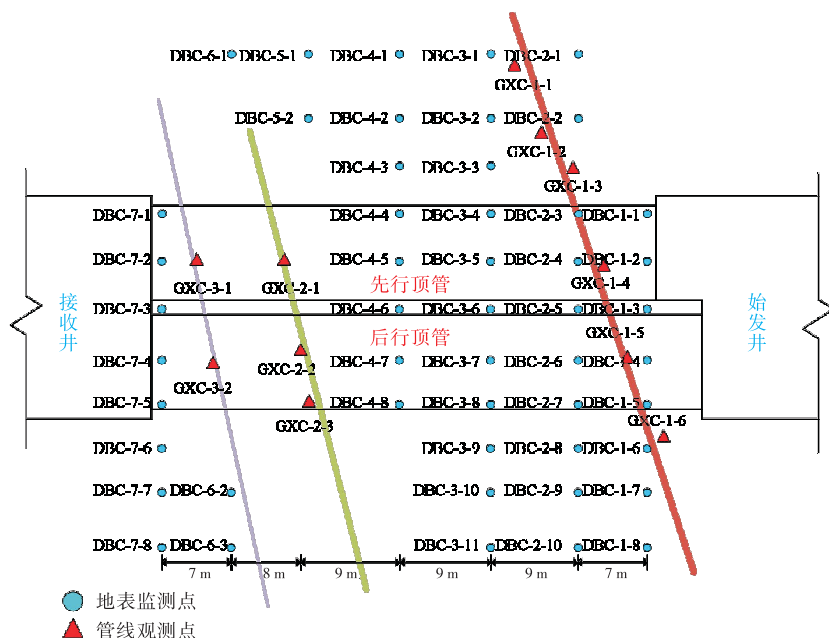


图4 监测点位置图

3 实测数据分析

3.1 地表沉降

以监测断面3为分析对象,对左线先行顶管施工过程中不同工况下地表竖向位移变化规律进行分析。图5为顶管刀盘位置距断面3不同范围的地表沉降情况,左线先行顶管顶进阶段地表累计最大沉降位于监测点 DBC-3-5,位于顶管上部中心处,地表沉降呈“V”形,地表最大累计沉降量为2.74 mm。工况1~7(表2)阶段地表沉降量分别占地表最大累计沉降量的11.31%、8.76%、9.85%、39.18%、12.77%、5.11%、12.41%,随着顶管顶进距离监测断面3变近,地表沉降量增大,其中顶管在距离断面3为 ± 4 m(即1倍管节高度)范围内顶进,地表沉降量显著增大,占地表累计沉降量的56.93%。

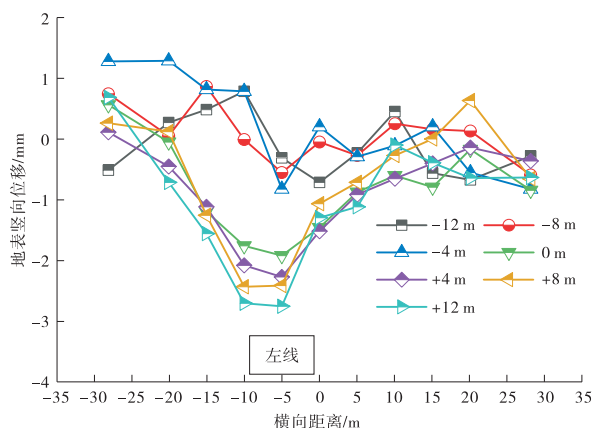


图5 先行顶管顶进阶段地表竖向位移变化曲线(断面3)

右线后行顶管施工过程中顶管刀盘位置距断面3不同范围的地表沉降情况见图6,随着后行顶管顶进地表沉降范围逐渐扩大,地表累计最大沉降位置由左线顶管位置向右线顶管上部中心转移,最终最大沉降位于监测点 DBC-3-7,地表沉降呈“W”形,地表最大累计沉降量为1.96 mm。工况8~14(表2)阶段地表沉降量分别占地表最大累计沉降量的-22.96%、34.18%、11.22%、11.13%、27.04%、14.29%、25.08%。相较于左线先行顶管顶进阶段地表沉降情况,右线后行顶管顶进过程中地表沉降量约为其48.6%,同时监测点 DBC-3-5处地表出现隆起情况,这是由于左线先行顶管施工完成后,通过管节预留的注浆孔注浆,从而导致地表隆起。

双线顶管施工结束后不同监测断面地表累计

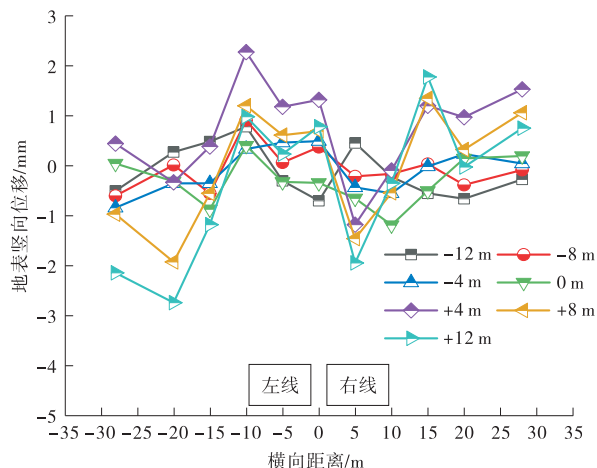


图6 后行顶管顶进阶段地表竖向位移变化曲线(断面3)

沉降情况见图7，所有监测断面的地表沉降类似，基本呈“W”形，不同监测断面的地表最大累计沉降位置都位于左线先行顶管的正上方。不同监测断面 DBC-1、DBC-2、DBC-3、DBC-4 和 DBC-7 的地层损失率分别为 0.53%、2.36%、3.35%、1.39% 和 1.76%，相较于顶管始发端和接收端处的地层损失情况，顶管中间段的地层损失率是其 1.41~1.92 倍，考虑到现场顶管中间段现场施工车辆行驶产生的荷载对地层产生影响，同时顶管始发端和接收端处进行注浆加固，因此顶管两端的地层损失率较小，而顶管中间段地层损失率相对较大。

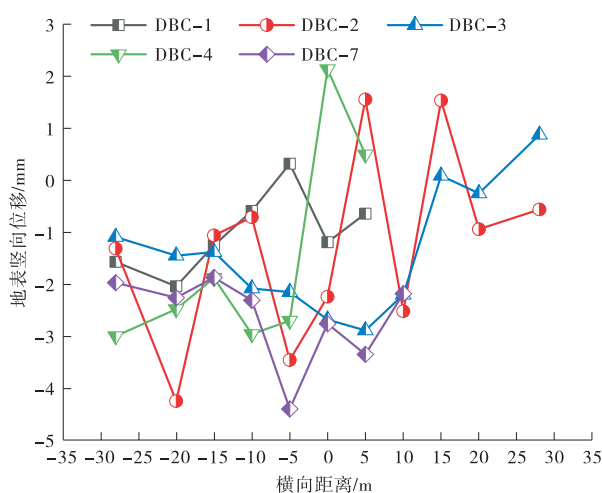


图7 并行顶管顶进完成后不同监测断面地表竖向位移变化曲线

并行顶管施工过程中地表累计沉降情况见图8，无论是左线先行顶管还是右线后行顶管，其施工过程中监测断面3的 DBC-3-5、DBC-3-6 和 DBC-3-7 点位的沉降变化趋势类似，顶管通过监测断面3时地表沉降情况，可以划分成四个阶段：隆起阶段1、沉降阶段、平稳阶段、隆起阶段2。顶管施工前期由于顶管机对土体的挤压作用，导致顶管顶进1~10环过程中地表出现隆起；接着当顶管机通过监测断面后，由于顶管机与管片之间的管径差，使得周围土体存在空隙，进而产生地层损失，顶进10~20环过程中地表呈现沉降情况；然后当顶管机通过监测断面一段距离后，进行注浆使得管片周围充满浆液，顶进20~28环过程中地表沉降基本稳定；最后顶管机顶进结束后，管片进行二次注浆加固，在注浆压力作用下地层微微隆起。

3.2 管线变形

以广州燃气管为例，对左线先行顶管施工过

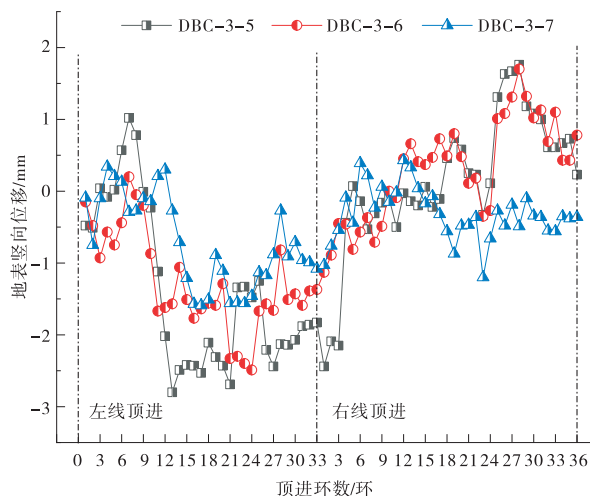


图8 并行顶管顶进完阶段地表竖向位移变化曲线

程中管线下方位置处管片顶进时管线变化规律进行分析。如图9所示，左线先行顶管顶进阶段管线累计最大沉降位于顶管正上方，管线变形呈“V”形，最大累计沉降量3.82 mm，此时左线先行顶管顶进第6环，顶管刀盘位于管线正下方。随着管片继续顶进至第9环，顶管机后方管片同步注浆，管线最大累计沉降量减少至2.48 mm。

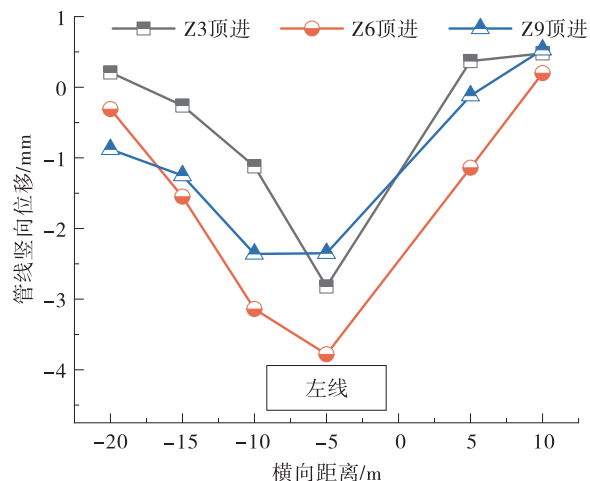


图9 先行顶管顶进阶段管线竖向位移变化曲线

图10为右线后行顶管施工过程中在管线位置处管片顶进情况，随着后行顶管顶进管线沉降范围逐渐扩大，管线累计最大沉降于左线先行顶管正上方转移至右线后行顶管正上方。相较于先行顶管对其上部管线影响，右线后行顶管顶进阶段管线最大累计沉降量1.95 mm，约为先行顶管施工管线最大累计沉降量的51.04%。这是由于先行顶管施工完成后，管片进行二次注浆，后行顶管顶进阶段其管片周围的土体被水泥浆液加固，因此后行顶管顶进阶段对周边土体扰动较弱，同时地层损失较小，所以后行顶管阶段管线整体的

变形量不大。

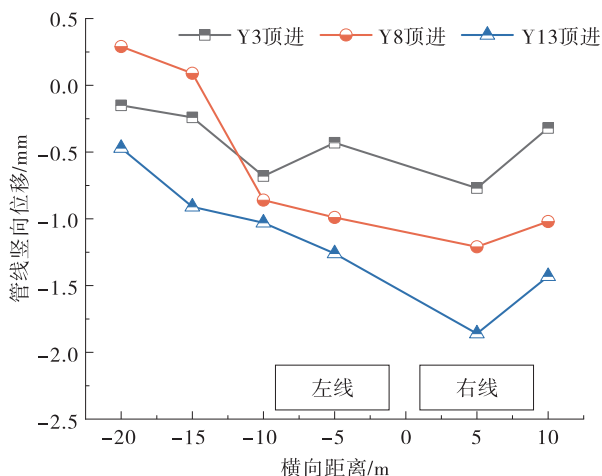


图10 后行顶管顶进阶段管线竖向位移变化曲线

并行顶管施工阶段顶管上部位置中石化输油管、大鹏燃气管和广州燃气管变形情况如图11~13所示。三条管线的竖向变形规律基本相同，当顶管机在即将到达管线位置时，由于土体挤压导致管线隆起，顶管机通过其位置后，管线发生沉降，其中顶管机在通过管线位置过程中石化输油管、大鹏燃气管和广州燃气管变形量分别为3.63 mm、4.76 mm和4.59 mm。相较于先行顶管，后行顶管施工过程中管线变形相对稳定。但在并行顶管结束阶段，先行顶管上部管线隆起，后行顶管沉降，中石化输油管、大鹏燃气管和广州燃气管先行顶管和后行顶管变形量差值分别为2.36 mm、2.45 mm和3.01 mm。考虑到现场施工情况，管线位置处管片的二次注浆可能是导致问题的原因。中石化输油管、大鹏燃气管和广州燃气管顶管施工阶段管线最大沉降值分别为1.54 mm、3.72 mm和1.63 mm。

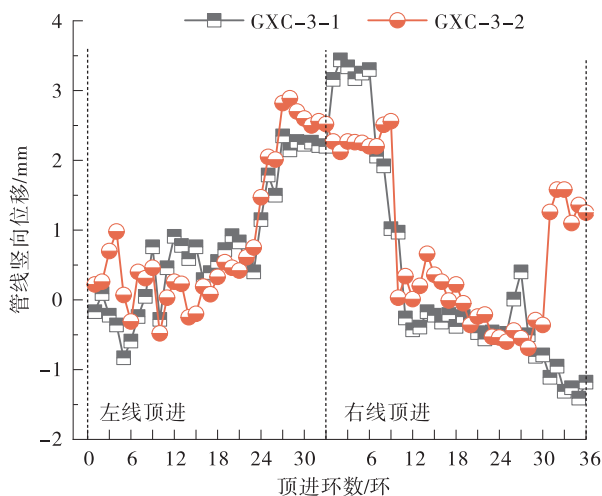


图11 中石化输油管竖向位移变化曲线

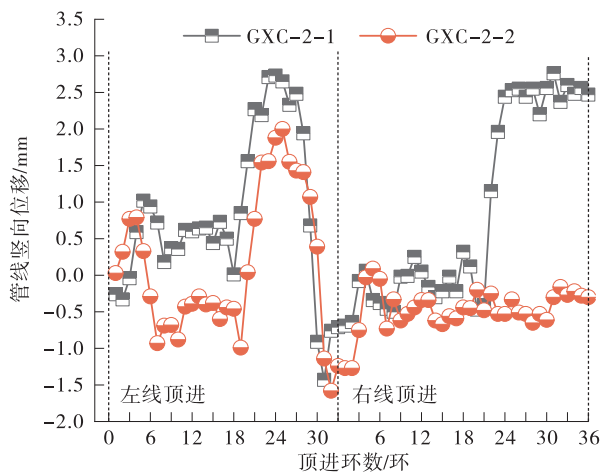


图12 大鹏燃气管竖向位移变化曲线

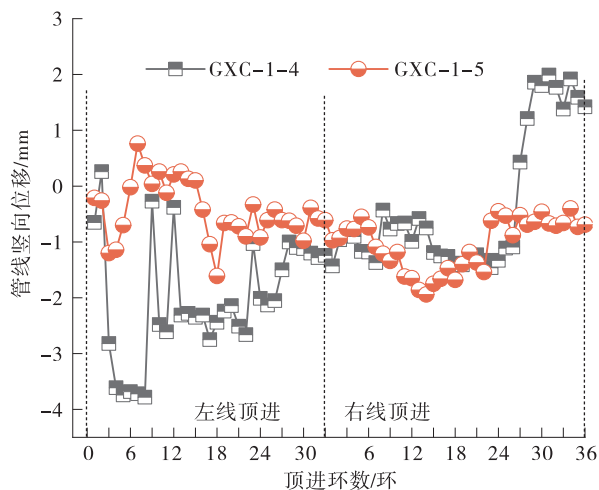


图13 广州燃气管竖向位移变化曲线

4 结论

为了探究并行大断面顶管近距离施工过程对地表沉降与上部管线变形的影响规律，结合广州市轨道交通三号线东延段海傍站车站顶管工程，分析了并行顶管施工全过程的地表沉降以及上部管线变化特征，得到以下结论：

顶管顶进阶段对其1倍管节高度范围前后的土体扰动最大，该范围中产生的地表沉降量约占总地表累计沉降量的56.93%。

先行顶管顶进阶段地表沉降呈“V”形，随着后行顶管顶进地表沉降转为“W”形，顶管施工完成，地层损失率在0.53%~3.35%，其中顶管中间段的地层损失率是两端1.41~1.92倍。

相较于先行顶管对周围土体及管线影响，由于先行顶管施工完成后管节注浆，后行顶管地表沉降与管线变形分别为先行顶管的48.6%和51.04%。

(下转第87页)

问卷结果显示学生较为满意基于成果导向的教育模式。同时,选拔了10位学生参加了广东省大学生计算机设计大赛人工智能挑战赛,获得了省一等奖2项、二等奖1项、三等奖1项的优秀成绩。但同时也存在着学生的数学基础差,对深度学习理论和算法原理的理解不够,在遇到实际项目时无从下手,不知道如何对数据进行预处理等问题。下一轮的教学实践要剖析问题的原因,进行教学反思与总结,形成课程教学持续改进机制。

6 结束语

基于成果导向教育理念的课程教学改革,从专业培养目标、岗位职业能力和素质要求设计学习成果,以学生为中心,以结果为导向,关注学生学到什么,有利于调动学生学习的主动性和积极性,同时分析学习成果达成度与预期学习成果的差距,不断改进教学方法和教学手段,适时修订课程标准、教学设计和人才培养方案,建立教学质量持续改进机制,确保教学质量不断提高,推进专业建设和人才培养。

参考文献:

- [1]李志义,王泽武.成果导向的课程教学设计[J].高教发展与评估,2021,37(3):91-98.
- [2]李志义.成果导向的教学设计[J].中国大学教学,2015(3):32-39.
- [3]邢艳丽,申华,芮文璐.基于成果导向的C++程序设计课程培养目标达成度评价方法探索[J].计算机教育,2023(4):198-203.
- [4]李月,王槐彬,周江.基于OBE模式的软件测试能力成果培养研究[J].软件导刊.教育技术,2019,18(7):91-93.
- [5]杨顺钰.基于OBE理念的数字媒体技术专业课程教学改革探究——以“Web程序设计”课程为例[J].电脑知识与技术:学术版,2023,19(7):161-164.
- [6]周江,陈丽.《JSP动态网页设计》课程思政改革与实践[J].广东交通职业技术学院学报,2021,20(2):80-83.
- [7]吴伟,闫国新.基于学习成果导向的高职“水利工程项目管理”课程教学设计[J].西部素质教育,2023,9(12):183-186.
- [8]莫燕,熊邦书,欧巧凤,等.基于OBE理念的“面向对象程序设计”课程教学改革研究[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2023,37(1):121-126.
- [9]张凯,武永新,田润泽.并行顶管不同纵向间距下施工数值模拟分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):835-840.
- [10]张文帅.深厚软土地层顶管施工引起的地面变形机理及数值模拟研究[D].邯郸:河北工程大学,2020.
- [11]赵玉权.深圳地铁10号线大断面矩形顶管施工控制技术研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [12]李泽祥.大断面矩形顶管下穿国道地表扰动规律与控制对策[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [13]鲍锋.并行差异断面顶管工程地表变形及其影响因素研究[D].福州:福建工程学院,2021.
- [15]王蕴晨.并行超大浅埋矩形顶管力学特性研究及工程应用[D].福州:福建工程学院,2020.
- [14]齐培林.并行矩形顶管施工力学与相互影响研究[D].武汉:武汉科技大学,2018.
- [16]周载延.大断面矩形顶管摩阻力计算方法与顶力预测[D].绵阳:西南科技大学,2022.
- [17]陈雪华,周丽红,吴起星,等.并行矩形顶管施工引起地层变形影响研究[J].土工基础,2022,36(4):551-558.
- [18]沈俊,晏莉,傅金阳,等.叠线盾构隧道并行下穿燃气管线影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):449-456.
- [19]赵东平,温斯逊,王卢伟,等.受隧道下穿施工影响的地中燃气管线沉降控制标准研究[J].现代隧道技术,2021,58(S1):258-264.
- [1]彭立敏,王哲,叶艺超,等.矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设,2015,35(1):1-8.
- [2]贾连辉.矩形顶管在城市地下空间开发中的应用及前景[J].隧道建设,2016,36(10):1269-1276.
- [3]BARTLETT J V, BUBBERS B L. Surface movements caused by bored tunnelling[C]. Conference on Subway Construction, Budapest-Balatonfured, 1970:513-539.
- [4]CORDING E J, HANSMIRE W H. Displacements around soft ground tunnel[C]. 5th Pan, American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Argentina, 1975,1(4):571-633.
- [5]刘玲.平行顶管施工引起的地面沉降计算方法综述[J].企业技术开发,2013,32(22):158-159.
- [6]李明宇,王松,张维熙,等.大断面矩形顶管隧道施工引起的地面沉降分析[J].铁道建筑,2019,59(5):81-84.
- [7]刘永辉,李明宇,吕聪,等.浅覆土矩形顶管施工中地面沉降变化规律及分布特征研究[J].建筑技术,2020,51(2):226-229.
- [8]许有俊,史明,李育发,等.大断面土压平衡矩形顶管施工引起地表竖向变形研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(7):597-604.

(上接第30页)