

粉质黏土地层矩形顶管施工对地面变形影响实测研究

刘宇宏¹ 杨景辉²

(1. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 200065, 上海; 2. 郑州大学土木工程学院, 450001, 郑州//第一作者, 高级工程师)

摘要 为了探究粉质黏土地层矩形顶管施工对周边环境的影响, 依托郑州某地铁站出入口通道工程, 对矩形顶管法施工过程中呈现的地面沉降规律和分布特征进行了研究, 并针对工程中土体变形问题给出了相应的措施建议。研究结论如下: 地面累计沉降变化共划分为 4 个阶段, 各阶段地面累计沉降变化量占最终累计沉降量的比例分别为 24.25%、20.42%、34.38% 及 20.95%。施工扰动影响范围为典型监测断面前方 $1.26w$ (w 为矩形顶管机宽度) 至典型监测断面后方 $1.52w$; 加固地层和非加固地层中, 施工引起的地层损失率分别为 1.01% ~ 1.35% 和 2.50% ~ 4.10%, 横向影响范围分别为 $2.01w \sim 2.16w$ 和 $2.23w \sim 2.88w$ 。

关键词 地铁车站; 粉质黏土地层; 矩形顶管施工; 地面沉降; 变形规律; 分布特征

中图分类号 U175; TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.031

Field Measurement Study of Rectangular Pipe Jacking Construction Influencing Ground Subsidence in Silty Clay Stratum

LIU Yuhong, YANG Jinghui

Abstract In order to investigate the influence of rectangular pipe jacking construction on the surrounding environment in silty clay stratum, the ground subsidence law and distribution characteristics presented during rectangular pipe jacking construction are studied based on a metro station entrance/exit passage project in Zhengzhou, corresponding measures are suggested for the soil deformation problem during the construction. The conclusions of the study are as follows: the cumulative ground subsidence change is divided into 4 stages, and the proportion of the cumulative ground subsidence change at each construction stage to the final cumulative settlement is 24.25%, 20.42%, 34.38% and 20.95% respectively. The influence range of construction disturbance is $1.26w$ (w is the width of the rectangular pipe jacking machine) in front of the typical monitoring section to $1.52w$ behind the typical monitoring section. The construction-induced ground loss rate is 1.01% ~ 1.35% and 2.50% ~ 4.10% in the reinforced and non-reinforced strata respectively, and the lateral influence

range is $2.01w \sim 2.16w$ and $2.23w \sim 2.88w$ respectively.

Key words metro station; silty clay stratum; rectangular pipe jacking construction; ground subsidence; deformation law; distribution characteristics

First-author's address Shanghai City Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., 200065, Shanghai, China

随着城市地下空间大规模开发与利用, 矩形顶管施工技术得到了快速发展。在理论分析方面, 文献[1]基于随机介质法计算矩形顶管施工引起的地面沉降, 并与 peck 公式进行对比。文献[2]提出考虑主导因素作用下的矩形顶管施工地层位移计算方法。在数值模拟方面, 文献[3]结合三维有限元模型研究了滨海地层条件下浅埋大断面顶管施工过程中地面的沉降变形规律。文献[4]依托苏州某矩形顶管工程, 利用有限元分析软件对施工过程进行了模拟。在现场实测方面, 文献[5]通过工程现场监测结果, 将施工过程中的地面竖向位移根据特征进行阶段划分。文献[6]基于我国首例采用结构分割转换施工方法实施的矩形顶管工程对地面变形进行分析, 得到了地面变形的影响因素。

目前在现场实测方面, 对不同地层下矩形顶管施工的研究实例较少。本文依托粉质黏土地层矩形顶管工程的工程实例, 对地面沉降监测结果进行分析, 并给出土体变形机理及控制措施, 以期类似工程提供经验。

1 工程概况

1.1 现场条件

郑州地铁 3 号线凤台南路站 8 号出入口采用土压平衡矩形顶管法施工, 其隧道全长为 37.3 m, 覆土深度约为 10.6 m。矩形顶管机尺寸为 4.60 m (长) \times 6.94 m (宽) \times 4.24 m (高)。共设置了 8 个千斤顶 (左右两组, 每组各配置 4 个), 千斤顶的总

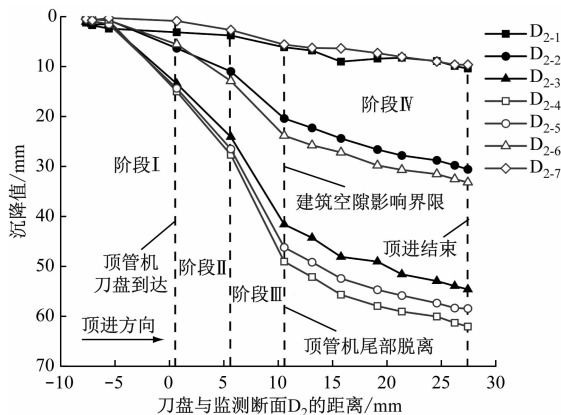


图5 监测断面 D_2 上各测点沉降变化曲线

Fig. 5 Subsidence change curve of each measurement point in monitoring section D_2

1) 阶段 I。该阶段为从顶管机始发到顶管机刀盘掘进至监测断面 D_2 , 顶进距离约为 7.61 m。刀盘开挖扰动会使 D_2 前 $1.26w$ 范围内的土体产生较明显的扰动变形; 此阶段 D_{2-4} 的地面累计沉降变化量为 15.03 mm, 占最终累计沉降量的 24.25%。

2) 阶段 II。该阶段从顶管机刀盘掘进至 D_2 到顶管机尾部脱离 D_2 , 顶进距离为 4.62 m (即顶管机的长度); 该阶段施工中易发生顶管机顶部部分土体覆盖于机体顶部的情况, 此时土体既在重力的作用下被压缩, 又因摩阻力随着顶管机一同向掘进方向前进, 这使得顶管机在通过 D_2 时附近区域的地面沉降迅速增加; 此阶段 D_{2-4} 的地面累计沉降变化量为 12.65 mm, 占最终累计沉降量的 20.42%。

3) 阶段 III。该阶段从顶管机尾部脱离 D_2 开始, 到顶进至 D_2 后方的 $1.52w$ 区段, 顶进距离约为 5.94 m; 由于顶管机的高度与管节尺寸高度相差 0.04 m, 刀盘开挖形成的空洞面积大于管节的横截面积, 两者之间形成的建筑空隙给周围土体提供了径向收缩的空间, 所以应尽管在顶进时同步注浆; 当注浆的填充速率低于洞边周围土体的收缩变形速率时, 地层损失随之增加, 使得顶管机尾部在脱离 D_2 后地面沉降迅速增加; 此阶段 D_{2-4} 的地面累计沉降变化量为 21.31 mm, 占最终累计沉降量的 34.38%。

4) 阶段 IV。该阶段从建筑空隙填充完毕 (即阶段 III 顶进至 D_2 后方 $1.52w$) 至顶进结束, 顶进距离约为 16.84 m。该阶段地面沉降及沉降增幅已基本稳定, 产生地层损失的原因主要有 3 个: ①同步注浆浆液通过管节上分布的注浆孔注入土中后, 在挤压

力的推动下, 流塑性浆液向土中渗透而流失了一部分, 进而导致填充率降低; ②在矩形顶管机掘进过程中, 各环管节均同步前进, 随着顶进距离的逐渐增大, 顶部土体与管节的接触面积越来越大, 在摩阻系数一定的情况下, 土体与管节的总摩阻力随之越来越大, 总摩阻力超出了周边土体的整体约束力, 此时虽然因触变泥浆的注入使得总摩阻力有所减少, 但仍使矩形顶管机周围部分土体因摩阻力作用而随管节一同前进, 且由于管节的持续顶进, 位于管节顶部的土体变得松散, 土体收缩而产生地层损失; ③触变泥浆受扰动后会变成溶胶, 此时泥浆的流塑性增强、填充强度减小, 在周围土体围压作用下, 与土接触的浆液逐步渗入土中, 使得浆液对周围土体径向收缩的限制作用减弱, 进而导致地层损失的增加。该阶段 D_{2-4} 的地面累计沉降变化量为 12.99 mm, 占最终累计沉降量的 20.95%。

综上所述, 由地面累计沉降的 4 个阶段可知, 矩形顶管掘进方向上的施工扰动影响范围为监测断面前方的 $1.26w$ 至监测断面后方的 $1.52w$ 。对于粉质黏土地层矩形顶管施工, 该范围应是最佳监测范围。

2.2 地面沉降横断面分布特征及影响范围

图 6 为 D_2 上各测点的地面沉降横断面分布情况。由图 6 可知: 监测断面 D_2 的地面沉降近似正态分布, 主要集中在开挖面宽度范围内; 从 2020 年 11 月 11 日开始至监测结束, D_{2-5} 的沉降值均大于 D_{2-3} 的沉降值, 这主要是由于顶进过程中矩形顶管机姿态偏转造成。

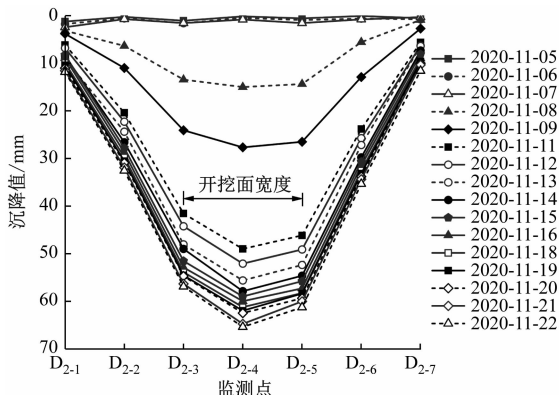


图6 D_2 监测断面沉降槽

Fig. 6 Diagram of D_2 monitoring section subsidence trench

利用修正后的 Peck 公式与现场实测数据进行了拟合分析, 得到 D_1-D_6 断面上隧道轴线上各

测点($j=4$) 累计沉降最大值 S_{\max} 、地层损失率 V_1 、和横向影响范围等参数的监测值,其结果如表 2 所示。

表 2 6 个监测断面在隧道轴线上方各测点的参数监测值
Tab.2 Parameter monitoring values for each measurement point above the tunnel axis in 6 monitoring sections

监测断面	S_{\max}/mm	$V_1/\%$	横向影响范围	备 注
D ₁	13.75	1.35	2.16 w	始发段加固区
D ₂	65.39	4.10	2.88 w	非加固区
D ₃	63.50	3.93	2.30 w	非加固区
D ₄	44.92	2.50	2.23 w	非加固区
D ₅	43.41	2.42	1.87 w	数据不采用
D ₆	20.36	1.01	2.01 w	接收段加固区

注:横向影响范围指影响边界至隧道轴线的距离。

因地表沉降监测时 D₅ 的沉降尚未结束,对监测数据分析时不考虑该断面的监测结果。由表 2 可知:在地层加固区和非加固区内,地层损失率分别为 1.01% ~ 1.35% 和 2.50% ~ 4.10% ,横向影响范围分别为 2.01 w ~ 2.16 w 和 2.23 w ~ 2.88 w。

3 土体扰动控制建议

在粉质黏土地层实施矩形顶管施工时,造成土体扰动的影响因素主要包括盾尾间隙、姿态偏转、背土效应、管土摩擦作用及停机调试等。针对上述影响因素,本文提出控制建议如下^[7-8] :

1) 应注重提高机尾建筑空隙的填充效果,注浆速度应与掘进速度相匹配,在保证注浆填充率的同时,确保触变泥浆的流动状态,减小管土摩擦作用与背土效应。

2) 本工程矩形顶管机有 2 个独立的掘进系统和出土系统,两个系统若配合不当,易导致矩形顶管机姿态偏转。因此,施工时应勤测量、勤纠偏,可以考虑采用纠偏油缸、刀盘反转、分别控制螺旋机出土量及开挖面分区高分子泥浆等方式予以纠偏。

3) 顶管机长时间停机会增大触变泥浆与管节间的摩擦力,甚至可能使机体后退,进而影响开挖面的稳定性,因此,施工时应控制停机时间,加装止退装置,同时跟踪监测土仓压力的变化情况。若土仓压力过低,则应及时注入膨润土泥浆。此外,还应适当增加壁后注浆量,以稳定地层土体。

4 结语

1) 地面累计沉降变化根据分布特征可分为 4

个阶段,各阶段的地面累计沉降变化量占最终累计沉降量的比例分别为 24.25%、20.42%、34.38%、20.95%。

2) 沿矩形顶管掘进方向,施工扰动影响范围为典型监测断面前方 1.26 w 至典型监测断面后方 1.52 w 区段。对于粉质黏土地层矩形顶管工程,该范围应是最佳的监测范围。

3) 在加固地层和非加固后地层中,矩形顶管施工引起的地层损失率分别为 1.01% ~ 1.35% 和 2.50% ~ 4.10% ,横向影响范围分别为 2.01 w ~ 2.16 w 和 2.23 w ~ 2.88 w。

参考文献

[1] ZHANG C, JIA Q J, XU R Q, et al. Prediction of surface subsidence caused by rectangular pipe jacking construction[J]. E3S Web of Conferences, 2018, 38: 03024.

[2] 李辉,杨贵阳,宋战平,等. 矩形顶管施工引起土体分层变形计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1482.

LI Hui, YANG Guiyang, SONG Zhanping, et al. Study on calculation method of soil delamination deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1482.

[3] WANG Y, HUANG J, YANG L. Study on the mechanical properties of large rectangular and shallow embedded pipe-jacking during pushing-process[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 358(5): 052034.

[4] 唐培文. 矩形顶管近接上穿施工对地铁隧道影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊 1): 215.

TANG Peiwen. Study on the influence of rectangular pipe jacking construction on subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 215.

[5] ZHANG D, LIU B, QIN Y. Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 151.

[6] 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.

[7] GONG Tingmin, JIA Lianhui, CHEN Wentao, et al. Key technologies of hard rock slurry balance pipe jacking machine for composite ground[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 880.

[8] LI Peng, LI Yang, GAO Yi, et al. Analysis and research on surface deformation law of pipe jacking tunnel constructed by cut and convert method[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1838.

(收稿日期:2021-11-09)