

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.03.012

【工程应用】

大断面矩形顶管近穿既有地铁隧道数值模拟分析

刘庆方¹, 汪洋², 郝宇航³, 朱启银³, 况联飞³

(1. 中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300133; 2. 中铁二局第四工程有限公司, 四川 成都 610306;
3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为探究大断面矩形顶管近距离上穿既有地铁隧道时地表及隧道结构变形影响规律, 利用 PLAXIS 3D 有限元软件进行了顶管施工全过程模拟, 同时分析了掌子面推进力、地层损失、顶管内配重等施工参数影响。结果表明: 在顶管施工过程中, 地表经历先隆起后沉降过程, 隆起最大值达 1.80 mm, 沉降最大值始终位于顶管掘进中心线上方, 最大沉降量达到 11.40 mm。既有隧道向接收井一侧隆起变形, 左、右线隆起最大值介于 2.76~3.97 mm 之间, 且隧道所受影响主要在顶管通道的投影区域。掌子面推进力增加使得前方地表土体隆起增大, 并引起更大的隧道位移; 地层损失率从 0% 提升到 0.2%, 顶管后方土体沉降从 8.58 mm 增加至 11.10 mm, 而隧道的最大位移量变化不超过 1 mm; 增大顶管内配重可使得地表和既有隧道沉降均加大。实际施工过程中应适当减小掌子面推进力和地层损失, 顶管内适当配重, 以减小前方过大地表隆起和顶管推进后过大工后沉降。

关键词: 隧道穿越; 地下通道; 矩形顶管; 数值模拟; 变形控制

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0264-07

Numerical simulation analysis of large section rectangular pipe jacking closely passing through existing subway tunnel

LIU Qing-fang¹, WANG Yang², HAO Yu-hang³, ZHU Qi-yin³, KUANG Lian-fei³

(1. China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300133, China;

2. China Railway Erju 4th Engineering Co., Ltd., Chengdu 610306, Sichuan, China;

3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In order to explore the influence law of construction parameters on the surface and subway tunnel deformation during the pipe jacking closely passing through existing subway tunnel, PLAXIS 3D finite element software was used to simulate the construction process. And the influence of pipe jacking on surface and existing subway tunnel deformation was analyzed by changing the construction parameters such as the thrust of the tunnel face, the ground loss, and the counterweight conditions in the pipe jacking. The analysis results show that during the pipe jacking construction process, the surface experienced a process of uplifting and then subsiding, the maximum uplift is 1.8 mm, the maximum settlement is always above the center line of pipe jacking excavation, and the maximum settlement is 11.4 mm. The existing tunnel bulges and deforms towards one side of the receiving shaft. The existing tunnel uplifted and deformed to the side of the receiving shaft, the maximum bulge of the left and right tunnel is between 2.76 mm and 3.97 mm, and the tunnel is mainly affected in the projection area of the pipe jacking channel. The increase of the propulsive force of the tunnel face increases the uplift of the front surface soil and causes greater tunnel displacement. The formation loss rate increased from 0% to 0.2%, the soil settlement behind pipe jacking increased from 8.58 mm to 11.10 mm, and the change of the maximum displacement of the tunnel did not exceed 1 mm. The increase in the pressure in the jacking pipe will cause the surface and the existing tunnel to settle. In the actual construction process, the thrust of the tunnel face and the loss of stratum shall be appropriately reduced to reduce the excessive ground uplift in front and the excessive post construction settlement after pipe jacking.

Key words: tunnel crossing; underground passage; rectangular pipe jacking; numerical simulation; deformation control

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2020ZDPYMS18)。

作者简介: 刘庆方 (1986—), 男, 江苏徐州人, 高级工程师, 主要从事隧道设计与管理方面的工作与研究。E-mail: 435580398@qq.com。

2 数值模拟分析

2.1 三维模型建立

基于有限元软件 PLAXIS 3D 建立三维模型模拟顶管施工全过程,对施工过程中地表变形特征以及既有地铁隧道的结构变形规律进行分析。结合类似工程经验,大断面顶管施工对土体应力影响范围为顶管断面高度和宽度中较大值的 3~5 倍,因此模型范围取为高 45 m,宽 80 m,沿轴线方向的长度为 150 m。模型边界约束采用左右两侧水平方向约束,下部边界设水平、竖向约束,上部边界为自由边界。土体使用三维实体单元进行模拟,顶管和隧道使用板单元进行模拟,整个模型单元总数 234 619 个,节点总数 365 106 个。根据设计方案中土层情况、顶管施工、区间隧道分布以及荷载信息,整体模型如图 3 所示。

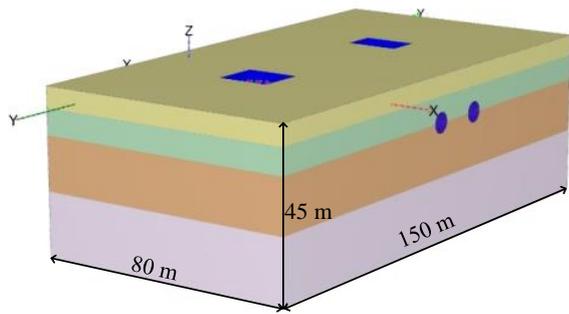


图 3 模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of numerical analysis model

2.2 模型参数选取

始发井和接收井结构采用板单元进行模拟,弹性模量取为 20 GPa,泊松比取 0.2。顶管和隧道管片几何尺寸与实际管片一致,材料均为 C50 混凝土,模

拟采用线弹性模型,密度取 $2\,500\text{ kg/m}^3$,弹性模量取 34.5 GPa,泊松比取 0.2。结合勘察报告,本工程场地内地基土属于第四系 (Q_4) 沉积地层,涉及土层由上至下依次为:杂填土、粉质黏土层、粉质黏土夹黏质粉土层、黏质粉土夹粉质黏土层。土体模拟采用摩尔-库伦模型,各土层模型参数见表 1。顶管始发加固长度和顶管接收加固长度均为 6 m,加固宽度均为顶管结构每侧 3 m,竖向加固范围均为地面到顶管结构底 4 m,与未加固地层相比,加固体弹性模量增大一倍。顶管和隧道模拟适当简化,假设其为均质材料,忽略管间连接部位刚度弱化影响。

2.3 顶管顶进模拟及工况条件

为保证与顶管施工的实际工作性状接近,顶管顶进过程按照实际工况条件模拟,共分为 5 个阶段:(1)平衡地应力;(2)生成左右线隧道;(3)生成始发井和接收井;(4)位移重置;(5)顶管开挖。顶管开挖划分为 33 个施工段,施工段按照 1.5 m 一段进行划分,模型结构示意图及对应顶管顶进工况如图 4 所示。顶管施工时,管片拼装在始发井中而不再掘进机尾部,故而在模拟时掘进机与后续管片为连续连接。由于模拟的施工步较多,这里仅保留关键工况的模拟结果进行分析。工况 1 代表顶管顶进距离 6 m;工况 2 代表顶管顶进距离 15 m,该工况完成上穿右线;工况 3 代表顶管顶进距离 33 m,该工况完成上穿左线;工况 4 代表顶管顶进 49.5 m,即顶管上穿隧道完成。需要说明的是,顶管顶进施工工序复杂,难以全部纳入分析,本文研究主要考虑掌子面推力(50 kPa、100 kPa 和 200 kPa)、地层损失率(0%、0.1%、0.2%)和顶管内部配重(20 kPa、50 kPa、100 kPa)等施工因素,其中地层损失通过 Plaxis 平台提供的土体收缩率来模拟^[12]。

表 1 土层模拟参数取值

Table 1 Soil layer parameters in numerical simulation

参数	③-1 粉质黏土	④-1 黏质夹粉质黏土	⑤-1 粉质黏土	⑦-1 粉质黏土
土层厚度/m	5.3	6.7	15	18
材料模型	摩尔-库伦	摩尔-库伦	摩尔-库伦	摩尔-库伦
材料类型	不排水	不排水	不排水	不排水
天然容重/(kN/m ³)	18.4	18.4	18	18
饱和容重/(kN/m ³)	19.4	18.5	18.6	18.7
弹性模量/kPa	8 100	8 800	4 700	4 600
泊松比	0.35	0.3	0.3	0.3
黏聚力/(kN/m ²)	60.0	28.6	34.6	13.7
内摩擦角/(°)	13.5	13.2	11.3	20.4
界面强度折减因子	0.6	0.6	0.6	0.6

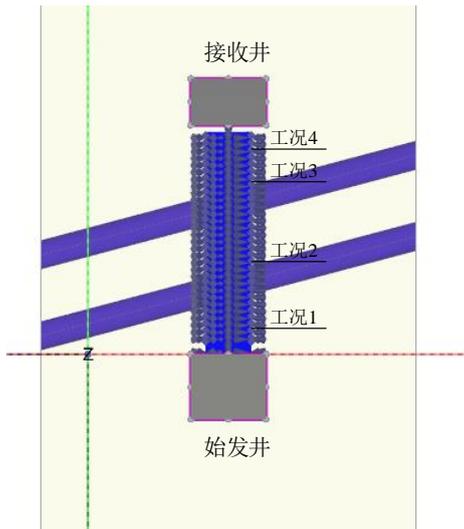


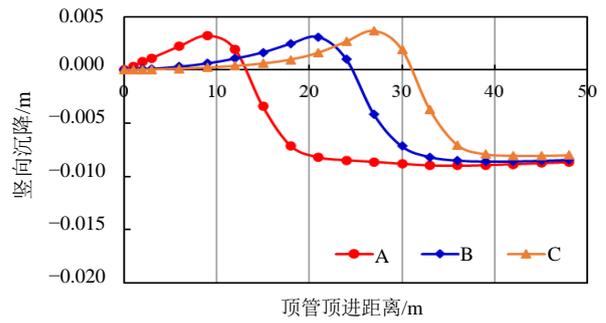
图4 顶管模型结构示意图及顶进工况
Fig. 4 Pipe jacking model and conditions

3 地表沉降与隧道结构变形分析

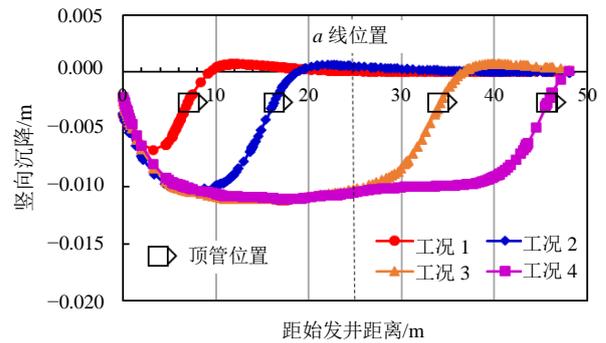
为研究顶管顶进过程地表竖向位移和隧道结构变形空间特征,本节模拟考虑施工参数为:掌子面推力 200 kPa、地层损失率 0.1%和顶管内部配重 50 kPa。

3.1 顶管顶进对地表竖向位移的影响

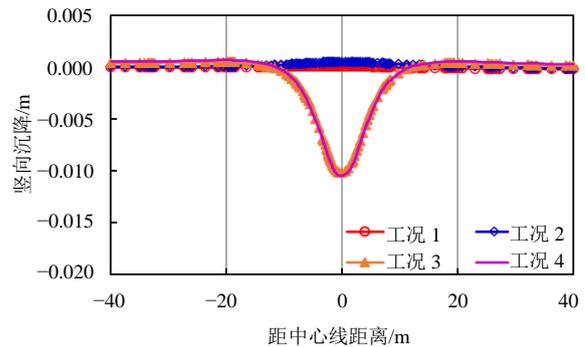
顶进模拟时既有隧道开挖及始发井、工作井施工产生的位移变形已重置为 0,因此计算结果中的变形及沉降均为顶管顶进引起。为分析不同计算工况顶管顶进过程对地表沉降的影响,选取图 2 所示 A、B、C 三点分析顶管顶进过程地表沉降特征。A 点和 C 点位于左右线隧道正上方地表, B 点位于 A 和 C 中间。图 5 (a) 为三点沉降随顶管顶进过程的变化规律,可以看出,每一测点均经历先隆起后沉降过程, C 点的最终沉降量略小于 A 和 B 点。此外,选取图 1 所示的横纵线 a 和 b 进行不同顶进工况下的地表沉降空间特征分析,其中纵线 b 为顶管顶进的中心线,长度为始发井和接收井之间距离, a 线垂直于 b 线,为始发井和接收井的中心线。对应顶管顶进过程 4 个工况的地表 a、b 线位置地表沉降分布见图 5 (b) 和 (c)。图 5 (b) 表明顶进过程中,顶管机刀盘前方土体受掌子面推力影响而受挤压,有较小隆起变形,隆起最大值为 1.80 mm;顶管机后方因出土卸荷以及地层损失而出现地表沉降,最大沉降量达到 11.40 mm。图 5 (c) 表明顶进过程中,顶管机前方土体隆起,后方土体沉降,顶管施工对地表变形的影响由顶管中心向水平两侧递减,沉降最大值始终位于顶管掘进中心线上方。



(a) A、B、C 三点沉降随顶进距离变化规律



(b) 不同顶进距离下 b 线沉降曲线



(c) 不同顶进距离下 a 线沉降曲线

图 5 不同工况下地表时空沉降特征

Fig. 5 Settlement curve of cross and vertical section under different conditions

3.2 顶管顶进对既有地铁隧道的影响

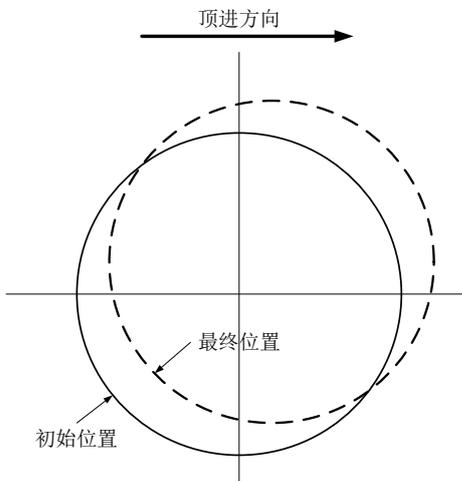
顶管上穿既有地铁隧道,随着顶管通道内土体的开挖,周围土体应力场向通道内释放,进而引起隧道隆起。顶管上穿隧道后,右线和左线隧道最大隆起值分别为 2.76 mm 和 3.97 mm,表现为后穿越的左线隧道隆起量大,这可能与先隆起的右线隧道叠加影响有关。如图 6 (a) 所示,受影响隧道主要在顶管通道的投影区域,通道投影区域以外的隧道受影响较小,变形的影响由通道正下方向通道边线以外区域递减,距离通道的距离越远,所受的影响越小,左线和右线隧道的变形规律基本是一致的。

顶管顶进过程中,既有隧道的竖向位移变形为

隆起变形, 水平向表现为向接收井一侧变形。管径表现为水平方向被压缩, 竖直方向被拉伸, 如图 6 (b) 所示。因此, 为保证隧道结构安全, 探究施工参数对隧道位移的影响, 并采取相应的隧道加固措施和减少隆起措施必不可少。



(a) 工况 4 (顶进 45 m) 隧道变形 (放大 500 倍)



(b) 隧道变形示意图

图 6 顶管上穿既有隧道后隧道变形情况

Fig. 6 Tunnel deformation after pipe jacking passes through the existing tunnel

4 顶管施工参数影响分析

4.1 掌子面推进力的影响

大量工程实践表明, 顶管掘进机正面推进力大小对地表和既有隧道变形有着重要影响^[5-7]。为研究开挖面支撑力对地表和隧道变形的影响, 计算了顶管刀盘前部推进力分别为 50 kPa、100 kPa 和 200 kPa, 推进力梯度为 20 kPa/m 时顶管施工对地层沉降的影响。不同掌子面压力下地表 b 线沉降特征如图 7 所示。可见, 随着掌子面正推力的增大, 地表 b 线沉降呈减小趋势。根据掌子面推力的变化对地表竖向沉降的变化曲线可得在出土量相同的情况下, 随着正推力的增大, 地表的隆起增大, 沉降减小。为进一步探究掌子面推进力对下部既有隧道变形的影响, 计算出掌子面推进力在 50~200 kPa

的范围内, 地层损失在 0%、0.1%、0.2% 条件下, 下部既有隧道最大总位移量值变化如图 8 所示。可见, 在保证地层损失相同的情况下, 随着掌子面正面推进力的增加, 隧道最大的位移量会增加, 隧道受到的影响增大。由此可知, 掌子面推力的大小并不是唯一的影响因素, 地层损失的影响也应加以考虑。

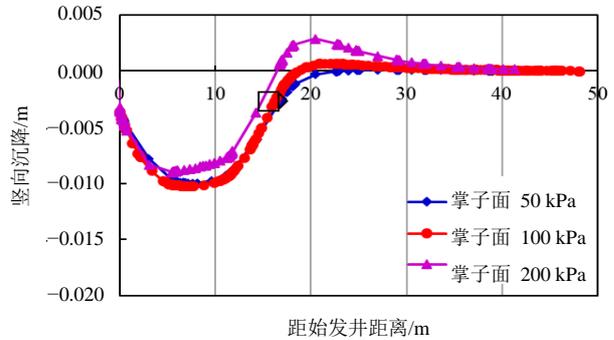


图 7 正推力对 b 线地表沉降的影响 (工况 2)

Fig. 7 Variation of surface settlement along the middle line of pipe jacking with propulsive force

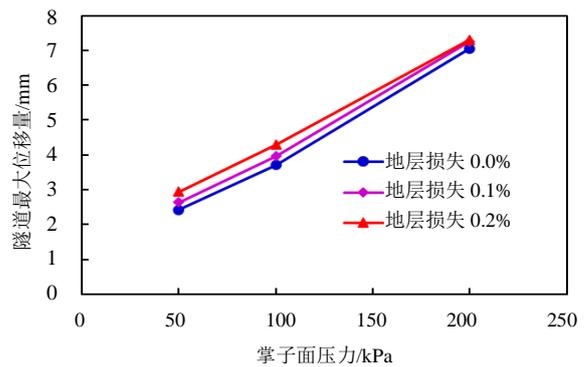


图 8 隧道最大位移随正推力变化曲线

Fig. 8 Variation of maximum displacement of existing tunnel with propulsive force

4.2 地层损失的影响

地层损失是实际开挖土体体积和竣工顶管体积之差, 常以占理论排土体积百分比的地层损失率表示, 是顶管施工造成土体变形的根源所在。本文考虑 3 种地层损失率 (0%, 0.1%, 0.2%) 对地表沉降的影响规律。顶管顶进工况 2 下顶管中线地表 b 线沉降如图 9 所示, 由沉降曲线可知, 将地层损失从 0% 提升到 0.2%, 顶管掌子面前的土体几乎不受影响, 但掌子面后土体的沉降会随着地层损失的增大而增加, 从 8.58 mm 增加至 11.10 mm。因此, 地层损失作为影响竖向沉降的重要因素在实际施工时应加以控制, 以保证地层损失率处于一个较低的水平。

为研究地层损失率对既有隧道变形的影响, 同样在地层损失率在 0%、0.1%、0.2% 条件下, 考虑

掌子面推力计算既有隧道的最大位移量,如图 10 所示。在掌子面推力相同的情况下,地层损失率从 0% 提升到 0.2%,隧道最大位移量的变化不超过 1 mm,因此,地层损失率对隧道位移影响较小。

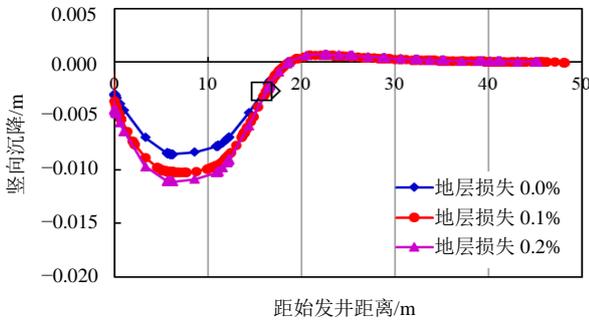


图 9 地层损失对 b 线地表沉降的影响 (工况 2)

Fig. 9 Variation of surface settlement along the middle line of pipe jacking with soil loss

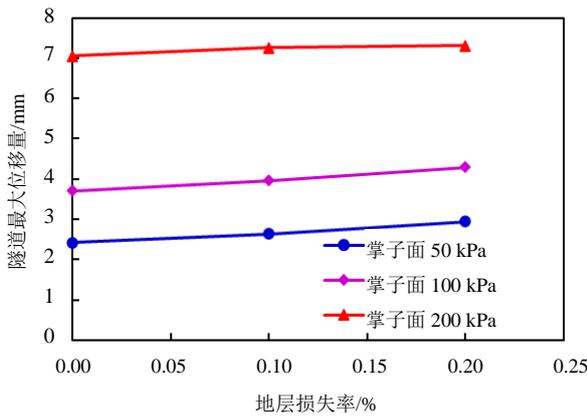


图 10 隧道最大位移随地层损失率变化曲线

Fig. 10 Variation of maximum displacement of existing tunnel with soil loss rate

4.3 顶管内配重的影响

由于顶管内施加配重可控制既有隧道隆起及控制顶管上浮。因此,顶管施工时通常会在顶管通道内进行堆铁配重即压重。为探究堆铁配重的影响,在 20 kPa、50 kPa、100 kPa 的压重条件下,提取工况 2 对应的地表 b 线竖向沉降曲线以及隧道最大竖向位移如图 11 和图 12 所示。结果表明,对于掌子面后地表土体,随着顶管内压重的增加,土体竖向沉降随之增加。而对于掌子面前的地表土体,随着压重的增加土体竖向隆起随之减小;压重达到 100 kPa 时,掌子面前方地表土体甚至由隆起转变为沉降。将掌子面推力从 50 kPa 上升到 200 kPa,隧道的最大竖向位移变化小于 1 mm,可见隧道的竖向位移受掌子面推力影响较小。在相同掌子面推力的情况下,压重 20 kPa 时隧道表现为隆起,随着

压重增加隆起值不断减小;压重 100 kPa 情况下,隧道变形转变为沉降。

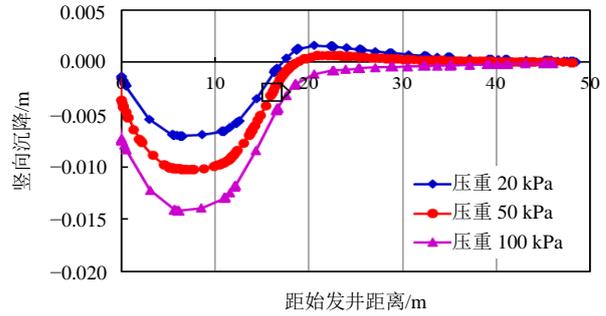


图 11 压重对 b 线地表沉降的影响 (工况 2)

Fig. 11 Surface vertical settlement under the action of ballast

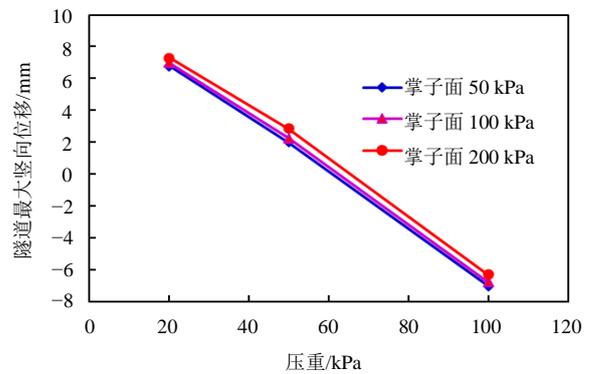


图 12 隧道最大位移随压重变化曲线

Fig. 12 Variation curves of maximum displacement of existing tunnel with ballast

5 结论

本文基于数值模拟手段,系统分析了大断面矩形顶管近距离上穿既有地铁隧道时地表及隧道结构变形影响规律,研究获得的主要结论如下:

(1) 顶管顶进过程中,地表经历了先隆起后沉降的过程,隆起最大值达 1.8 mm,沉降最大值始终位于顶管掘进中心线上方,最大沉降量达到 11.40 mm。既有隧道的竖向位移变形为隆起变形,水平向表现为向接收井一侧位移。左右线隆起最大值介于 2.76~3.97 mm 之间。

(2) 顶管顶进过程中掌子面推进力对地表土体以及既有隧道的影响较大。随着掌子面推进力的增大,掌子面前方地表土体隆起增大,后方地表土体沉降减小,既有隧道的位移也随之增大。因此为保证施工质量,施工时应严格控制顶管推进力。

(3) 顶管顶进过程中,地层损失会影响地表土体沉降。地层损失越多,地表土体沉降越大,但地层损失对既有隧道的影响微乎其微。利用地层损失的影响规律采用合理的施工方法,如“微欠挖”

可对地表沉降进行控制。

(4) 顶管内压重可作为稳定顶管、防止顶管上浮的有效手段,但过大的压重会加剧地表土体以及既有隧道的沉降,因而施工时应严格控制。

参考文献

- [1] 申文明,朱侠达,王小刚,等.新建顶管近距离上跨运营隧道控制技术[J].地基处理,2020,2(5):419-423.
SHEN Wen-ming, ZHU Xia-da, WANG Xiao-gang, et al. Control technology of newly-built pipe jacking closely over crossing operating tunnel[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(5): 419-423.
- [2] 袁心,马保松,赵阳森,等.矩形顶管施工中管周压力的实测与分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1225-1233.
YUAN Xin, MA Bao-song, ZHAO Yang-sen, et al. Field measurement and analysis of pipe pressure during box jacking construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1225-1233.
- [3] 贾凯,武永新,徐振博.美兰机场排水工程的多孔小间距顶管施工关键技术[J].中国给水排水,2021,37(22):113-117.
JIA Kai, WU Yong-xin, XU Zhen-bo. Key technology of multi-hole and small-spacing pipe jacking construction in meilan airport drainage project[J]. China Water and Wastewater, 2021, 37(22): 113-117.
- [4] 王晓男,张昌桔,杨守臻.软土地区盾构隧道近距离下穿地铁隧道群施工影响分析研究[J].地基处理,2019,1(1):79-83.
WANG Xiao-nan, ZHANG Chang-ju, YANG Shou-zhen. Research on impact of crossing construction of shield tunnel under subway tunnel group at close range in soft soil region[J]. Journal of Ground Improvement, 2019, 1(1): 79-83.
- [5] 郭亮.大断面矩形顶管施工中的土体沉降规律分析[J].建筑施工,2014,36(6):731-732.
GUO Liang. Analysis of regular settlement of surrounding soils mass during large cross-section rectangular pile-jacking construction[J]. Building Construction, 2014, 36(6): 731-732.
- [6] 刘波,章定文,刘松玉,等.大断面顶管通道近接穿越下覆既有地铁隧道数值模拟与现场试验[J].岩石力学与工程学报,2017,36(11):2850-2860.
LIU Bo, ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu, et al. Numerical simulation and field monitoring on a large cross-section pipe-jacking underpass traversing existing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2850-2860.
- [7] 黄建华,王蕴晨,杨鹿鸣.滨海软土浅埋大断面矩形顶管施工力学分析[J].福建工程学院学报,2020,18(3):211-217.
HUANG Jian-hua, WANG Yun-chen, YANG Lu-ming. Analysis of construction mechanics of shallow-buried large-section rectangular pipe jacking in coastal soft soil strata[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2020, 18(3): 211-217.
- [8] 叶耀东.大断面矩形顶管近距离上穿地铁隧道变形控制探讨[J].城市道桥与防洪,2015(7):203-205.
YE Yao-dong. Discussions on deformation control of subway tunnel by large section rectangular pipe jacking crossing in close distance[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2015(7): 203-205.
- [9] 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 Jin-xing, WANG Kai-yun, HOU Dan-dan, 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.
- [10] 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.
HAO Xiao-hong, 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.
- [11] 薛青松.苏州城北路大断面矩形顶管顶力计算与实测分析[J].隧道建设(中英文),2020,40(12):1717-1724.
XUE Qing-song. Calculation and measurement analysis of jacking force of large cross-section rectangular pipe jacking machine used in Suzhou Chengbei Road[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1717-1724.
- [12] 张治成,林思,王金昌,等.矩形管廊顶管施工对临近管线的影响研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2):244-249.
ZHANG Zhi-cheng, LIN Si, WANG Jin-chang, et al. Influence of pipe-jacking of rectangular utility tunnels on adjacent pipelines[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 244-249.

