

浅埋顶管群下穿运营高铁施工地表变形研究

房 军

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要:为了研究下穿运营高铁顶管群施工过程中的地表变形情况,通过三维数值模拟及现场监测,研究下穿运营高铁顶管施工案例中的地表变形规律,并通过分析相关影响因素,提出地表沉降控制措施。研究表明:顶管施工过程中,3倍管径范围内地表变形受施工影响较明显,最大变形点发生在顶进断面顶管轴线位置,当距管轴线距离大于3倍管径时,地表沉降量逐渐收敛于零;横向沉降趋势呈“U”形分布,沉降量随着距顶进面距离增大而整体减小,但变形量分布形态基本保持不变。天窗施工期间,列车开通运行24 h后地表产生明显变形,列车运行48 h后地表变形基本趋于稳定。受管-土相互作用影响,地表沉降理论计算结果较数值模拟结果略小,建议复杂地层条件下微型顶管土压力计算优先选用太沙基理论。

关键词:运营高铁;地表变形;数值模拟;现场监测;微型钢顶管

中图分类号:U215.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0177-05

自19世纪末美国最早在铸铁管道铺设工程中采用顶管法^[1]。至今,顶管施工已发展为一种适用于各工程领域的典型非开挖施工方法^[2],而顶管施工引起的地表沉降等问题是研究者们长期关注的重点。理论研究方面:彭立敏等^[3]依托工程案例,结合国内矩形顶管发展现状,总结了顶管施工在理论、设计和施工等方面存在的问题;刘营^[4]基于浅层隧道开挖引起地表沉陷的监测数据及工程资料,提出了沉降槽正态分布公式;朱卫杰等^[5]结合现场监测数据,提出了浅覆土条件下矩形顶管施工期的内力演化规律。工程案例方面:郭伟等^[6]基于底线电缆隧道穿越高架桥桩基工程案例,分析了顶管施工对周围土体及桩基的变形影响;邓文杰等^[7]研发室内模型试验系统,研究近间距顶管对既有管线和地表竖向变形的影响及控制措施;吴垠龙等^[8]通过现场实测分析,提出顶管施工对既有隧道的影响范围及变化趋势。三维计算方面:雷华阳等^[9]基于Terzaghi松动土压力模型,分析了顶管施工中土拱效应的渐近发展趋势;王紫娟等^[10]利用位移控制法,研究顶管施工对地表横向和纵向变形的影响规律,并分析了敏感性参数的影响;尚陪陪^[11]研究了大跨度框构桥顶进施工对线路稳定性的影响及相关加固技术。刘顺青等^[12]通过三维数值分析,分析了顶管施工中地表及既有桥梁附近土体的变形

规律。综观顶管施工研究与应用过程,相关研究在逐步向实际施工需求及三维动态分析发展,但关于运营高速铁路的顶管施工鲜有报道。

目前国家高铁网络在逐步扩大完善,但随着时间的积累,运营高铁的相关问题在日益增多,高铁运维整治及提质改造等措施势在必行。本文基于运营高铁改扩建工程实例,通过数值模拟及现场监测,分析复杂地层条件下运营高铁微型顶管施工过程中地表变形情况,同时结合运营高铁施工特殊性,研究铁路开通运营过程中施工区域地表沉降规律,并提出相关控制措施。

1 工程概况

永康南站改扩建工程中,需增加4处过轨管道,涉及金温高铁2处正线股道,5处到发线股道。为不影响列车正常运行,拟采用轨下微型顶管群的施工方式。管径 D 为0.2 m,最长顶距15.5 m,最小覆土厚度为0.7 m;同一断面最多需布置13根顶管,管间距不大于0.1 m;下穿正线股道顶管布置如图1所示,顶管横断面如图2所示。利用天窗时间施工,开通条件为地表沉降不大于5 mm。顶管范围内主要为杂填土,且存在较大杂石,填土松散无积水。

2 数值计算

为确保顶管施工期间高铁安全运营,施工前先

收稿日期:2023-07-01

基金项目:中铁第四勘察设计院科技研究开发计划课题(2019K103)。

作者简介:房军(1989—),男,甘肃舟曲人,中铁第四勘察设计院集团有限公司,工程师,硕士,研究方向为道路与铁道工程设计与运维施工管理。

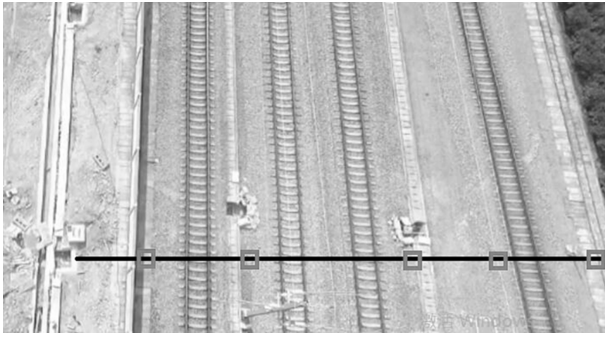


图 1 下穿高铁正线顶管施工俯视图

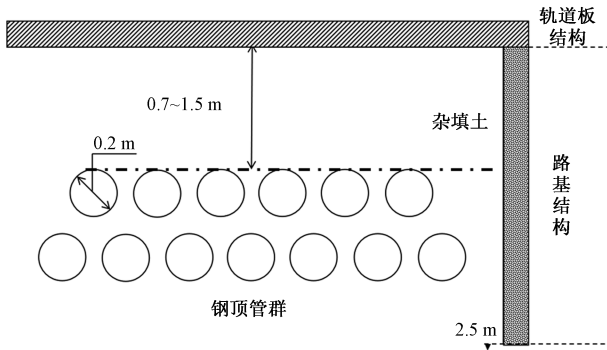


图 2 顶管横断面示意图

采用 ABAQUS 对地表沉降情况进行模拟计算。由于顶管施工引起的横断面方向地层变形最大值出现在管道轴线的上方,并沿管道横向侧边逐渐减小,影响范围在 $4D$ 左右,分布曲线类似正态分布^[13]。结合工程实际情况,采用 $5D$ 以上的均质弹性有限域,选取标准 CRTS II 型无砟轨道结构。考虑到路基结构的散体材料特性,路基结构采用摩尔-库仑塑性材料模型,内摩擦角取 37° ,黏聚力为 8 kPa ,土体重度为 8.2 kN/m^3 ,管土摩擦系数为 0.1 。为了消除边界条件影响,地基深度取 20 m 。轨道顶面施加 ZK 活载(中国客运专线标准活载),支承层底面和路基表层间采用绑定约束连接,建立有限元模型如图 3 所示。

分别计算不同覆土厚度下的应力及位移,横向每 2 m 作为一个顶进循环,顶管模型上表面设为自由边界,其余各面设置相应的位移约束。如图 4 所示,施工前,在地应力条件下线路结构位移分布比较均匀稳定;施工过程中,覆土厚度越大线路结构位移及地表变形越小^[2]。当覆土厚度为 $2D(0.4 \text{ m})$ 时的线路结构最大位移约为 $4D(0.8 \text{ m})$ 时的 2 倍;覆土厚度为 $4D(0.8 \text{ m})$ 时,地表变形基本趋于稳定;覆土厚度为 $6D(1.2 \text{ m})$ 时,变形量变化率已小于 1% 。

进一步分析顶管过程中管道横断面变形情况。如图 5 所示,顶管施工过程中,地表土层变形主要以

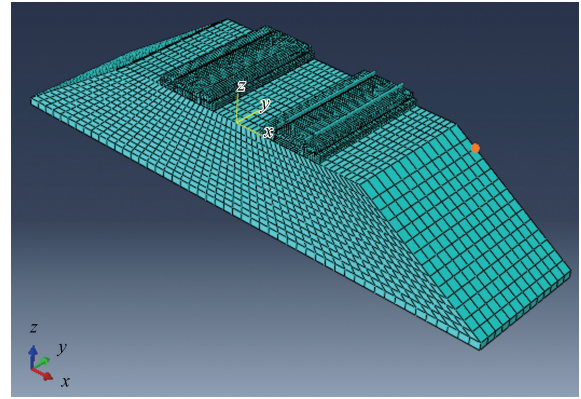
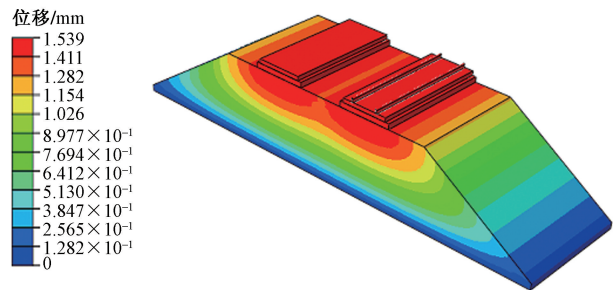
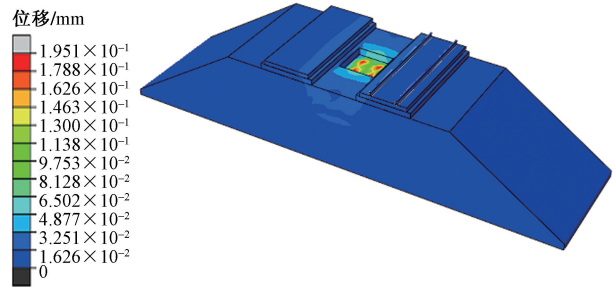


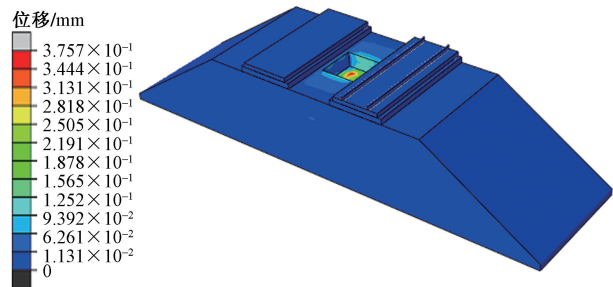
图 3 无砟轨道及路基模型网格



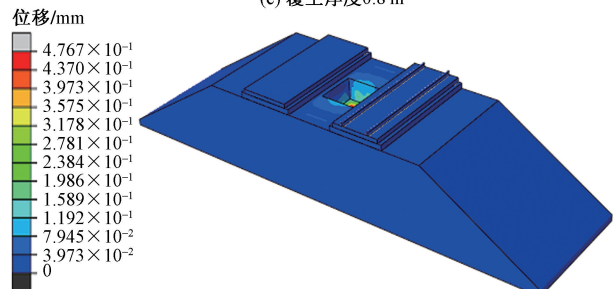
(a) 地应力条件



(b) 覆土厚度 0.4 m



(c) 覆土厚度 0.8 m



(d) 覆土厚度 1.2 m

图 4 不同覆土厚度线路结构位移云图

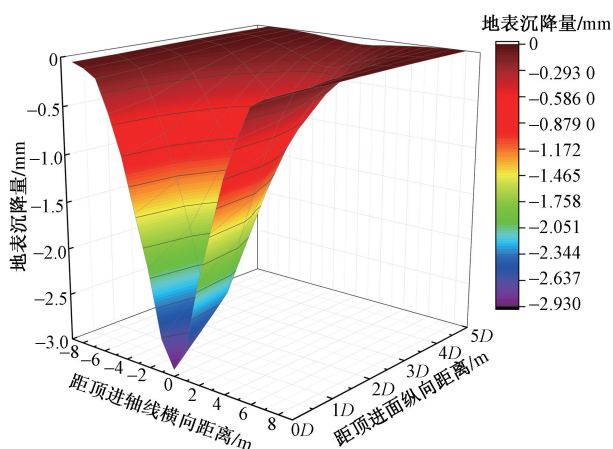


图5 地表横断面沉降三维示意图

沉降为主,横断面变埋量会随着距顶进轴线横向距离增大而减小,分布形态基本呈“U”形,最大变形量发生在顶进断面处顶管轴线位置,最大沉降为 2.93 mm,满足施工要求;地表沉降横向影响情况,在距轴线距离 3D 范围内沉降量比较明显,3D 范围之外沉降量曲线迅速衰减并基本收敛于零^[13]。焦义等^[14]进一步指出,顶管施工在不同深度处土体沉降突变及差异主要表现在顶管轴线两侧约 3.4D 范围内。

采用 Peck 式(1)对数值模拟结果进行验证。

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

式中: $S(x)$ 为距离管道轴线 x 处地表沉降量; $S_{\max}$ 为管道轴线处地表最大沉降量, $S_{\max} = \frac{V_1}{i \sqrt{2\pi}}$; i 为地表沉降槽宽度系数, $i = NZ_0$, N 为沉降槽宽度参变量,取 $N = 0.5$, Z_0 为管道中心至地表的距离, V_1 为土体损失体积, $V_1 = \frac{1}{4} \eta \pi D^2$, η 为地层损失率,取 $\eta = 2\%$, D 为管道直径,取 $D = 1$ m。

如图 6 所示,顶进断面处地表横向沉降量的数值模拟结果与 Peck 公式计算结果分布形态基本一致^[15];地表最大沉降点均处于顶管轴线位置,但 Peck 公式最大沉降量略小,这是由于理论计算没有考虑施工过程中的管-土相互作用。整体而言,在距管轴线 3D 范围内两种方法计算结果误差约在 6% 以内,而当距管轴线距离大于 3D 时,地表沉降量逐渐收敛于零,而 Peck 法沉降曲线衰减更明显。

3 施工结果及控制措施

3.1 施工结果分析

基于模拟结果,沿顶管轴线方向布置 5 个测点,监测施工过程中地表变形情况。由图 7(a)可知,竖

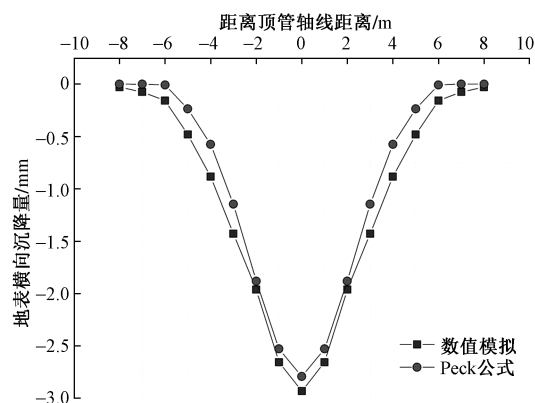


图6 地表横向沉降量对比

向变形方面,轨道板部位主要表现为沉降,最大沉降量为 1.74 mm,发生在轨道板顶管施工阶段;而封闭层部位主要以轻微隆起为主,最大隆起量为 1.35 mm,发生在列车运行 24 h 后。钻孔阶段向顶管阶段过渡期间,始发井位置产生局部沉降,其余部位整体呈轻微上拱趋势;但在列车运营 24 h 后,较顶管阶段而言,封闭层部位地表最大隆起量剧增 16.5 倍,而轨道板部位最大隆起量仅增加 0.48 倍;列车运营 48 h 后地表变形基本趋于稳定。由图 7(b)可知,在顶管施工过程中地表横向变形整体呈轻微下沉趋势,列车开通运营后地表产生整体上拱,最终在 1.5 mm 范围趋于稳定。地表横向变形会受到来自施工与行车不同方向上的作用力,但轨道板和封闭层部位横向变形趋势一致,并在行车 24 h 后开始趋于稳定,整体施工满足精度控制要求。究其原因,基于 Terzaghi 活动门模型,由于顶管施工引起的地层损失会导致两侧及上方土体发生相对错动,进而产生滑移破坏面,主应力轴在此过程中发生旋转,土体应力状态发生变化^[9],最终导致地层产生位移。

进一步探讨施工过程中土压力影响情况,通过 4 种经典计算方法分析土压力影响因素。考虑到不同计算理论的适用条件,现基于归一化理论绘制土压力变化曲线。由图 8 可知,土压力与覆土厚度正相关,由于不同覆土厚度下土层的竖向沉降、水平位移会有所不同,顶管施工过程中当土压力突破临界值时则会造成地表变形。土压力与黏聚力、内摩擦角呈负相关,由于土力学性能增大改变土体的应力状态,也会导致土拱效应增强,从而平衡了部分竖向应力^[16]。

对 4 种计算结果进一步分析。由图 9 可知:土柱法计算结果整体偏大;普氏卸荷法计算结果较发散,很容易受其他因素影响;马斯顿法计算结果整

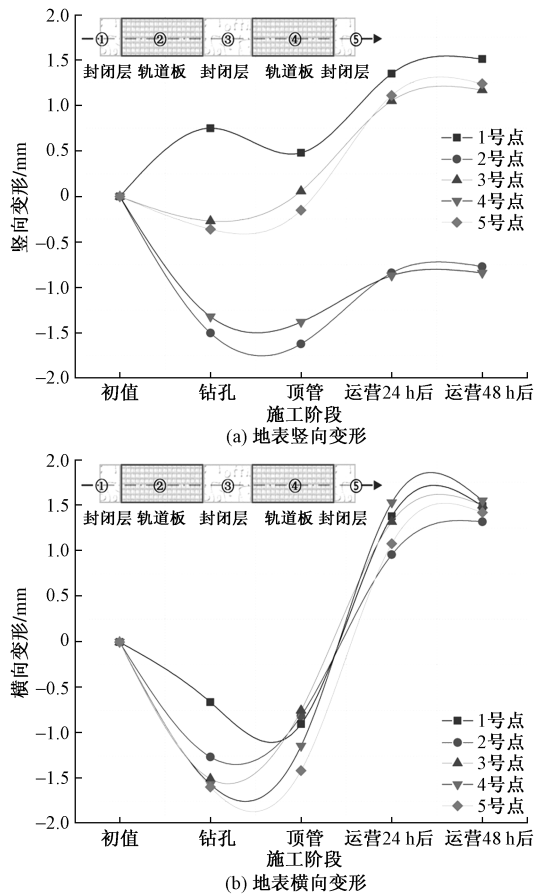


图7 顶管施工地表变形规律

体偏小,且较发散;太沙基法计算结果误差较小,相对稳定。由此可推断,复杂地层条件下微型顶管土压力计算可优先选用太沙基理论^[17]。

3.2 控制措施建议

基于工程实际案例及本文研究结果,对于涉铁顶管工程,尤其是运营高铁顶管施工,建议参考以下几点地表沉降控制措施。

1)设备选型需合理。由于运营高铁施工条件苛刻、地层复杂、施工安全要求高,为了更科学合理地确定顶管设备方案,可采用模糊层次分析法优选顶管设备^[18],需综合考虑施工环境、地层适应性、精度、钢管长细比、径厚比等影响因素^[19]。

2)复杂地层预加固处理。在覆土厚度较小,且土力学性能不利的复杂地层,可通过地层预加固处理,提高既有线地基的抗压和抗剪强度,增强土体的弹性模量和整体受力能力,进而有效控制既有铁路的沉降量。

3)加强过程控制与试验监测。在施工过程中,需严控顶管进尺,选取合理的施工技术参数,并根据实际施工情况,确定铁路运行的限速标准和限速

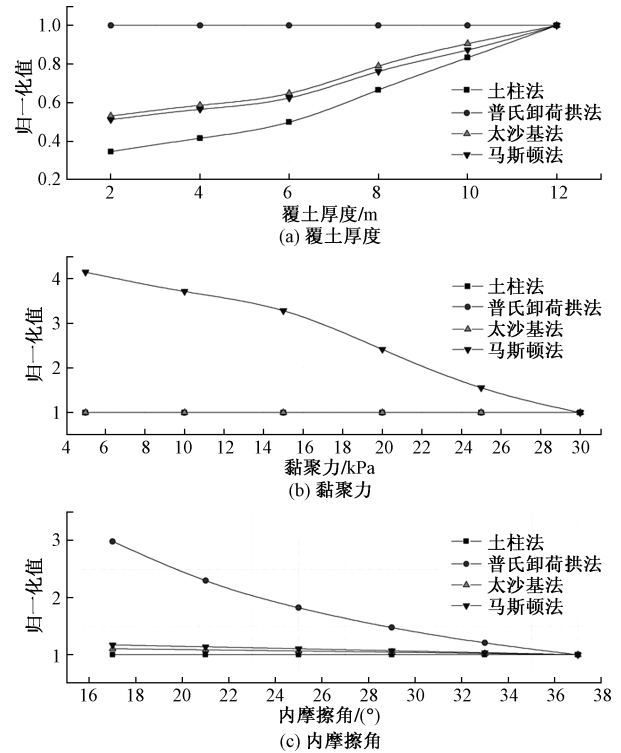


图8 不同影响因素各计算方法的土压力归一化曲线

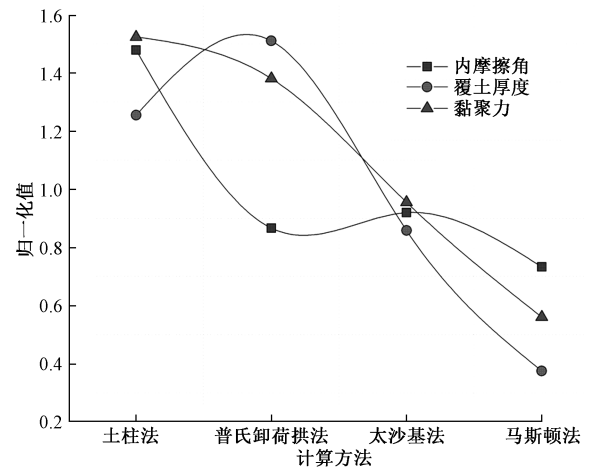


图9 不同计算方法各影响因素的土压力归一化曲线

时间区间。加强施工过程监测,动态反馈顶管施工信息,及时掌握施工过程中顶管的受力及土体的位移等变化情况。通过可靠的模型试验^[7],可有效分析顶管施工相关因素的变化规律,并以此来检验修正现场施工参数,确保顶管施工安全完成。

4 结论

1)顶管施工地表变形主要以沉降为主。横断面变埋量会随着距顶进轴线横向距离增大而减小,分布形态基本呈“U”形。最大变形量发生在顶进断面处顶管轴线位置,在距轴线距离 $3D$ 范围内,沉降

量比较明显,3D 范围之外沉降量曲线迅速衰减并基本收敛于零。

2)轨道板部位竖向变形主要表现为沉降,封闭层部位主要为轻微隆起。钻孔阶段向顶管阶段过渡期间,始发井位置产生局部沉降,其余部位整体呈轻微上拱趋势。当列车运行 24 h 后,地表会产生隆起现象,且线间封闭层变形尤为明显;当列车运行 48 h 后,地表变形基本趋于稳定。

3)覆土厚度越大线路结构位移及地表变形越小、土压力越大,当覆土厚度小于 2D 时,不利于顶管施工;覆土厚度不小于 6D 时,地表变形量变化率已小于 1%,是较施工理想的覆土厚度。顶管施工土压力与黏聚力、内摩擦角负相关,复杂地层施工可通过预加固处理控制地表沉降量,且该类顶管施工土压力计算建议优先选用太沙基理论。

参考文献

- [1] 甄亮.复杂地层条件下钢顶管在施工中的稳定性研究[D].上海:上海交通大学,2016.
- [2] 张艳林,曾天成,甘甜,等.真实复杂地层大直径钢顶管三维数值模拟研究[J].科学技术与工程,2020,20(33):13791-13798.
- [3] 彭立敏,王哲,叶艺超,等.矩形顶管技术的发展与现状[J].隧道建设,2015(1):1-8.
- [4] 刘营.顶管施工对周围土体扰动范围影响研究[D].郑州:郑州大学,2016.
- [5] 朱卫杰,甄亮,徐文蕴,等.浅覆土大断面矩形顶管施工管节内力演化规律研究[J].岩土工程学报,2022,44(S2):130-133.
- [6] 郭伟,蔡旺,任宇晓.顶管施工对高架桥桩基础影响的数值分析[J].科学技术与工程,2021,21(22):9598-9604.
- [7] 邓文杰,曹广勇,程桦,等.顶管施工模型试验系统研发与应用[J].科学技术与工程,2021,21(7):2929-2936.
- [8] 吴垠龙,刘维,贾鹏蛟,等.矩形顶管近距离上穿既有隧道施工扰动分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(6):1968-1978.
- [9] 雷华阳,刘旭,加瑞,等.考虑土拱渐进发展的松土土压力研究[J].岩土工程学报,2021,43(8):1434-1442.
- [10] 王紫娟,严佳佳,秦龙,等.矩形顶管掘进地层变形规律数值模拟研究[J].科学技术与工程,2022,22(34):15349-15357.
- [11] 尚培培.双孔框构桥下穿重载铁路顶进施工条件下线路加固技术研究[J].铁道建筑,2021,61(4):39-43.
- [12] 刘顺青,王旭畅,王文博,等.顶管施工对既有桥梁影响的三维数值分析[J].科学技术与工程,2022,22(26):11559-11566.
- [13] 郭亚娟,李宏哲,蔡海波.考虑土体内部病害情况下顶管施工引起的路面沉降分析[J].土木工程学报,2011,44(S2):139-143.
- [14] 焦义,梁禹,冯金勇,等.多因素影响下顶管施工引起土体变形计算研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):192-199.
- [15] 王克忠,刘东,梁其东,等.碎石土地层大口径顶管施工扰动分析[J].浙江工业大学学报,2017,45(5):477-482.
- [16] 薛振兴.顶管施工顶力计算与力学特性研究[D].东营:中国石油大学,2010.
- [17] 杨仙,张可能,黎永索,等.深埋顶管顶力理论计算与实测分析[J].岩土力学,2013,34(3):757-761.
- [18] 高虹霓,杨建军,曹泽阳.基于模糊 AHP 的道路选优评价方法研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2001(2):82-84.
- [19] 荆哲,房鹏帅,张耀阳,等.高水位软弱地层条件下大直径钢顶管稳定性[J].科学技术与工程,2022,22(27):12131-12138.

Research on Surface Deformation during Construction of Shallow-buried Pipe-jacking Group under High-speed Railway

FANG Jun

(China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to study the surface deformation during the construction of the pipe jacking group of the underpass high-speed railway, through three-dimensional numerical simulation and on-site monitoring, the surface deformation law in the case of the pipe jacking construction of the underpass high-speed railway is analyzed, and the surface subsidence control measures are proposed through the analysis of relevant influencing factors. The research shows that during the pipe jacking construction, the surface deformation within the 3 times the pipe diameter range is obviously affected by the construction, and the maximum deformation point occurs at the pipe jacking axis of the jacking section. When the distance from the pipe axis is greater than 3 times the pipe diameter, the surface settlement gradually converges to zero. The trend of lateral settlement is U-shaped, and the settlement decreases as the distance from the jacking surface increases, but the distribution of deformation remains basically unchanged. During the working time of closed section, the ground surface was significantly deformed after the train was opened for 24 hours, and the ground surface deformation basically stabilized after the train was operated for 48 hours. Due to the influence of pipe-soil interaction, the theoretical calculation results of surface settlement are slightly smaller than the numerical simulation results, and it is suggested that Terzaghi theory should be preferred for the calculation of soil pressure of micro-pipe jacking under complex formation conditions.

Keywords: operate high-speed railway; surface deformation; numerical simulation; on-site monitoring; micro steel pipe jacking