

矩形顶管隧道下穿高速公路地表沉降分析

张洪¹ 陈艺¹ 蒋磊² 刘湛¹ 王岳¹ 胡达^{3*}

1 中建五局土木工程有限公司

2 长沙市轨道交通集团有限公司

3 湖南城市学院, 城市地下基础设施结构安全与防灾湖南省工程研究中心

DOI:10.12238/etd.v5i6.10923

[摘要] 超浅埋大断面矩形顶管隧道下穿高速公路施工过程中,因顶管施工循环顶进对地层的重复扰动作用和相邻隧道的相互影响,极易造成高速公路路面累积变形过大导致工程灾害和安全事故。为此,本文结合柳叶大道西延线下穿长张高速矩形顶管隧道工程,通过现场施工、监测方案以及顶进过程中的三维数值模拟,结合现场监测数据对地层变形进行对比研究,探索矩形顶管顶进施工过程中高速公路路面的沉降变形规律。研究发现,顶管初步顶进时沉降变形较小,顶进10m左右沉降猛增,后保持稳定增长水平;直至顶进30m左右,沉降速度减小,沉降趋向平稳。顶管起点的竖向位移均大于终点,其最大竖向位移发生在滞后顶进区域,其沉降槽曲线稳定在轴线两边30~40m范围内。通过对比分析竖向位移的监测值和模拟值并结合相关性分析可知,尽管监测数据与模拟数据存在一定的误差,但是两条沉降槽曲线遵循相同的趋势并相互接近。因此,本次研究可为类似工程的施工设计提供参考。

[关键词] 矩形顶管; 隧道施工; 数值模拟; 地表沉降

中图分类号: U455 **文献标识码:** A

Analysis of surface settlement of rectangular pipe jacking tunnel under expressway

Hong Zhang¹ Yi Chen¹ Lei Jiang² Zhan Liu¹ Yue Wang¹ Da Hu^{3*}

1 China Construction Fifth Civil Engineering Co., LTD.

2 Changsha City Rail Transit Group Co., LTD.

3 Hunan City University, Urban Underground Infrastructure Structure Safety and Disaster Prevention Hunan Provincial Engineering Research Center

[Abstract] During the construction of ultra-shallow rectangular pipe-jacking tunnel with large cross-section passing through expressway, the repeated disturbance to stratum caused by cyclic jacking of pipe-jacking construction and the mutual influence of adjacent tunnels will easily lead to excessive accumulated deformation of expressway pavement, leading to engineering disasters and safety accidents. Therefore, in this paper, combined with the west extension line of Liuye Avenue, through the field construction, monitoring scheme and three-dimensional numerical simulation in the jacking process, combined with the field monitoring data, the ground deformation is compared and studied, and the settlement and deformation law of expressway pavement during the rectangular jacking construction is explored. It is found that the settlement deformation of pipe jacking is small at the initial jacking, and the settlement increases sharply about 10 m after jacking, and then maintains a stable growth level; Until the jacking is about 30 m, the settlement speed decreases and the settlement tends to be stable. The vertical displacement of the starting point of pipe jacking is greater than the end point, and the maximum vertical displacement occurs in the lagging jacking area, and the curve of the settling tank is stable in the range of 30 ~ 40 m on both sides of the axis. By comparing and analyzing the monitored and simulated values of vertical displacement and combining with the correlation analysis, it can be seen that although there are some errors between the monitored and simulated data, the two sedimentation tank curves follow the same trend and are close to each other. Therefore, this study can provide reference for the construction design of similar projects.

[Key words] rectangular pipe jacking; Tunnel construction; Numerical simulation; Surface subsidence

引言

城市化的高水平发展对城市交通基础设施提出了更高的要求,发展城市地下空间已成为了必然选择。城市隧道施工过程中为减小对地表环境的影响,一般采用暗挖法施工,暗挖法包括浅埋暗挖法、盾构法、顶管法等非开挖施工方法。与传统的开挖方法相比,顶管法不仅不需要进行大开挖破坏环境,能有效节约资源和降低碳排放;而且顶管法的土体切削也较为容易,施工对土体的扰动控制更加有效。工程经验表明,顶管顶进过程中不可避免地会对周围土体产生不同程度的扰动,极易出现顶力过大、土体应力集中^[1]及土体变形超限^[2]等施工安全问题。因此,亟需对超浅埋大跨度矩形顶管隧道施工引起的一系列环境效应进行深入研究。

针对矩形顶管隧道施工的环境效应中的地表沉降问题,许多学者对矩形顶管隧道变形的原因进行了深入的探究,主要有地质条件^[1]、隧道埋深、隧道间距和地层损失等影响因素,而地层损失是矩形顶管施工导致地层变形的关键因素^[2-4]。现有的矩形顶管隧道施工引起土体变形的研究方法主要有:经验公式法^[5]、解析理论法^[6]、模型试验法^[7]、人工智能法^[8]和数值模拟法。数值模拟法在一定程度上简化了繁杂的施工过程,其不仅考虑了土体性质、顶管与土体之间的相互作用等因素,还考虑了施工对周围环境的影响,分析预测地表变形的可信度较高。为减少矩形顶管顶进施工过程对地层的扰动,提高分析预测的可信度,国内外学者运用数值模拟方法进行了一些有益的探索。

本文在充分考虑地质条件和施工步骤的基础上,运用有限元数值模拟方法,对柳叶大道西延线超浅埋大跨度矩形顶管隧道的施工过程进行数值模拟。同时,结合现场监测数据对地层变形进行对比研究,探讨地表沉降的变化规律,以期为今后类似顶管隧道工程提供参考。

1 工程概况

本项目位于长张高速公路和柳叶大道西延线交汇处,此处地势较低,且长张高速公路为高填方路段,路堤高约20m,道路中心标高为55.012m。因此,为最大限度降低施工对长张高速公路交通影响,柳叶大道西延线采用2孔净跨径18.2m×6.2m的矩形顶管,以斜交角63.881°顶进下穿长张高速公路。

为便于顶进作业,顶管分为12、13、13、13m四节预制,并在顶管各段之间设置一个中继间。为保证顶管前后对接对齐接顺,矩形顶管顶板及侧墙上设对正插销。此外,为了最大程度上减少对公路运营的影响,本工程采用矩形顶管顶进法,该方法将矩形顶管顶进和盾构法的原理相结合。同时为了减少摩擦,钢盾构的宽度在两侧比顶管宽。本项目的准备工作与矩形顶管顶进的一般施工基本相同,包括开挖和加固工作坑、后墙、滑道、顶管施工,以及顶进装置的安装。

2 数值模型

为模拟完整的施工过程,进一步考虑土体之间的相互作用,利用Midas GTS-NX程序建立了地面尺寸纵向上为171.85m,横向上为86.2m,垂直方向上为25.91m的矩形顶管隧道的三维数值模

型如下图2所示。此外,由于弹性模量不能直接从试验中获取数据,土层的初始弹性模量值以及其他土体参数来自设计文件和工程经验,顶管和钢盾构的结构参数从设计文件中获取,如下表1和表2所示。

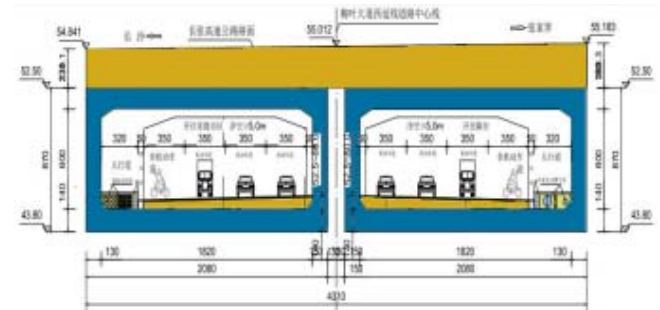


图1 矩形顶管隧道截面图

表1 模型结构参数

结构	容重/(kN/m³)	泊松比	弹性模量/(MPa)
隧道管节	25	0.28	32500
钢盾构	78	0.3	20000

表2 模型土体物理参数

土体类型	容重/kN/m ³	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/ [°]
填筑土	18	100	0.35	25	25
粉质粘土	20	24	0.33	23	13
强风化泥质粉砂岩	24	500	0.23	50	30
中风化泥质粉砂岩	25	4000	0.18	175	35

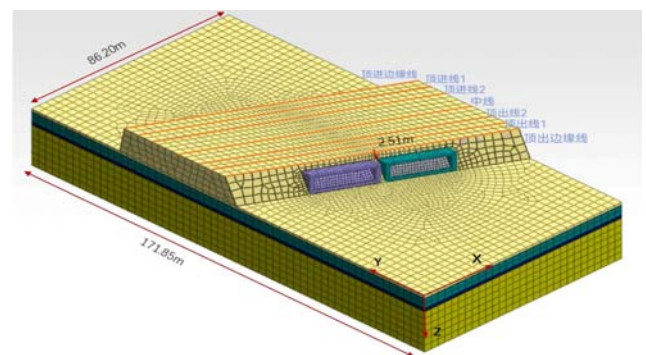


图2 三维数值模型

3 模拟结果分析

图3~6等显示了不同顶进阶段的公路沉降槽曲线。在矩形顶管顶进过程中,高速公路路面逐渐下沉,且高速公路沉降集中在顶进口附近区域。数值模拟结果显示,本次工程施工引起的竖向位移沉降槽稳定在轴线两边30~40m范围内,在中心轴线处沉

降较小。此外,在左幅顶管顶进15m后,沉降曲线大致沿坐标轴对称且呈“W”型,沉降曲线大致沿坐标轴对称,最终竖向变形趋于稳定。这主要是由于矩形顶管宽度较宽,而土体损失在距离矩形顶管越近的土层中作用范围越小,再加上矩形顶管两侧的土体损失产生的土体沉降在隧道正上方的重叠区域变小,因此出现轴线附近路面沉降较小的现象。

数值模拟得到公路的最大沉降量为96.25mm,且出现在高速公路的西部路缘。由此可得出结论:距离入口越远,沉降越小。造成这种现象的主要原因为:(1)入口一侧的路堤经历了一个包括有准备阶段和顶进阶段的完整的顶进施工过程。因此,在顶管顶进的起点和终点之间将存在中间沉降值;(2)在顶进开始时,顶管周围土体难以建立平衡状态。此外,顶管施工对钢盾构前方约8m、宽度约14m范围内的高速公路路面沉降产生了影响。同时,经由数值模拟结果发现每条测线的最大沉降量出现在矩形顶管隧道的中轴线左侧,而沉降不对称的原因是顶管斜穿既有公路。

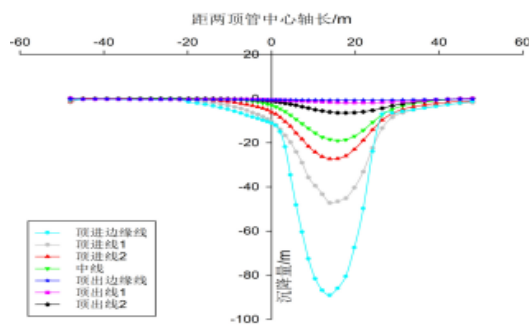


图3 右幅顶进33m沉降图

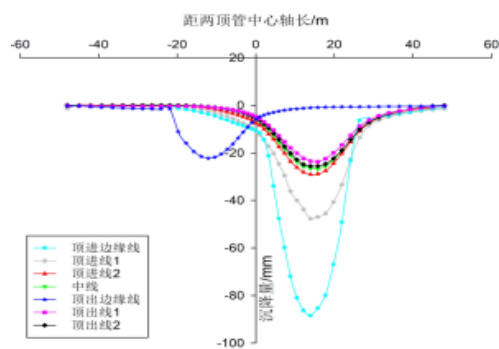


图4 右幅顶进51m沉降图

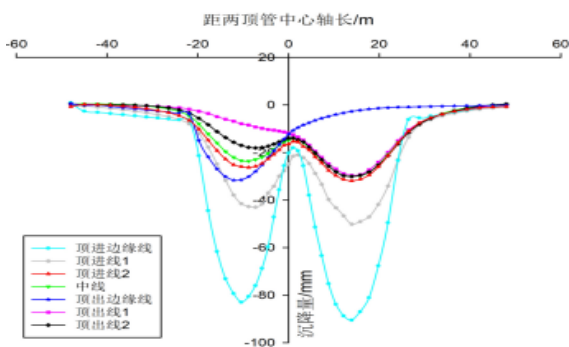


图5 左幅顶进38m沉降图

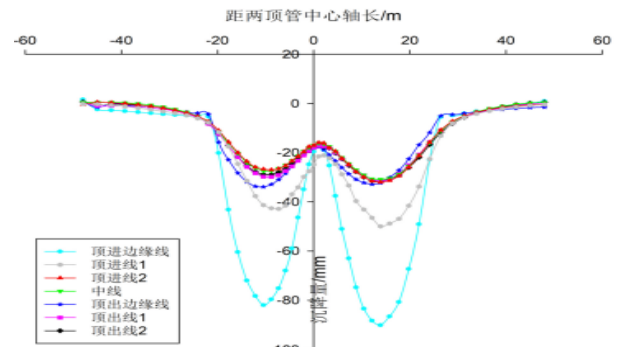


图6 左幅顶进51m沉降图

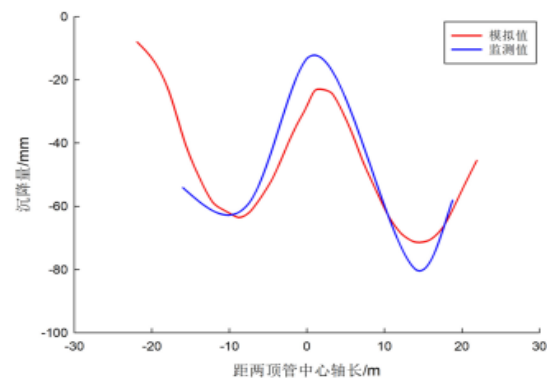


图7 数值模拟值与监测值对比图

由图7可知,由于模型的简化和实际施工的复杂性,监测数据与数值模拟数据有一定的差异。但是两条沉降槽曲线遵循相同的趋势并相互接近,这表明本次数值模拟数据可以反映工程实际中的沉降行为的主要特征,而造成数值模拟结果和监测结果有差异的原因,可能是由于顶进施工过程中的交通荷载以及注浆压力等因素的影响。

4 结论

本文介绍了一个超浅埋双孔大跨度矩形顶管隧道下穿高速公路的工程(总长51m,宽42.6m,高8.7m),详细地讨论了施工方案、监测方案以及顶进过程中的三维数值模拟,并将监测结果与数值模拟结果进行比较分析,总结如下:

(1)顶管初步顶进时沉降变形较小,顶进10m左右沉降猛增,后保持稳定增长水平。直至顶进30m左右,沉降速度减小,沉降趋向平稳。

(2)顶管起点的竖向位移均大于终点,其最大竖向位移发生在滞后顶进区域,其沉降槽曲线稳定在轴线两边30~40m范围内。此外,先行顶进的矩形顶管(右幅)比后一个顶进的矩形顶管(左幅)在公路上引起土体扰动造成了更大的沉降。

(3)通过对比分析竖向位移的监测值和模拟值并结合相关性分析可知,尽管监测数据与模拟数据存在一定的误差,但是两条沉降槽曲线遵循相同的趋势并相互接近。因此,本次研究对超浅埋大跨度矩形顶管隧道施工产生的一系列地表沉降的分析预测的可信度较高,可为类似工程的施工设计提供参考。

*湖南省自然科学基金(No.2023JJ30110);湖南省教育厅科学研究重点项目(No.23A0568)。

[参考文献]

[1]覃卫民,楚斌,龙立志.大断面箱涵下穿高速公路过程的施工监测分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1790-1797.

[2]王晓睿,周峰,张振.超大断面矩形顶管隧道施工动态变形规律[J].地球科学,2016,41(11):1959-1965.

[3]周小淇,史培新,刘维.富水软弱地层矩形混凝土顶管施工地表沉降研究[J].北京交通大学学报,2021,45(03):69-76.

[4]朱健.复杂环境下大断面矩形顶管地层损失控制措施研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):1015-1021.

[5]SHOU K,CHANG F.Analysis of pipe-soil interaction for a miniature pipejacking[J].Journal of Mechanics,2006,22(3):213-220.

[6]尹荣申,杨伟超,张平平.多孔大断面矩形顶管施工的地层变形特征及演化规律[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2597-2605.

[7]甄亮,潘羽擎,李晓军.大断面矩形顶管同步注浆可视化试验[J].现代隧道技术,2021,58(S1):387-393.

[8]CHENG M,LU Y.Developing a risk assessment method for complex pipe jacking construction projects [J].Automation in Construction,2015,58:48-59.

作者简介:

张洪(1979—),男,汉族,湖南邵阳人,本科,高级工程师、现从事房建和市政基础设施建设工作。

通讯作者:

胡达(1984—),男,湖南浏阳人,博士,副教授,现从事隧道及地下工程教学与研究工作。