doi:10.3799/dqkx.2016.136

超大断面矩形顶管隧道施工动态变形规律

王晓睿[1,2],周 峰[3],张 振[1,4],郭 佳[1]

1.华北水利水电大学资源与环境学院,河南郑州 450045
2.北京交通大学经管学院,北京 100044
3.洛阳璟信公路工程科技发展有限公司,河南洛阳 471000
4.上海隧道工程股份有限公司,上海 200000

摘要:在城市地下工程建设中,新建大断面隧道近距离下穿施工对既有道路造成的扰动不可避免.分析地表变形特点及其变化规律对减小隧道施工造成的环境影响具有重大意义.结合郑州市沈庄北路—商鼎路下穿中州大道矩形顶管隧道工程的工程实践,采用现场地表变形实测统计分析并运用数值模拟方法对顶管顶进施工过程进行动态分析,揭示隧道开挖过程中的地表变化规律;数值模拟预测分析了顶管施工对既有道路的影响,从而优化施工方法和技术参数,提出相应的控制措施,并通过工程变形监测数据验证了预测分析的有效性.

关键词:隧道工程;矩形顶管;变形监测;数值模拟;工程地质.
中图分类号:P634 **文章编号**:1000-2383(2016)11-1959-07 **收稿日期**:2016-01-10

Dynamic Deformation of the Oversized Cross-Section Rectangular Pipe-Jacking Tunnel

Wang Xiaorui[1,2], Zhou Feng[3], Zhang Zhen[1,4], Guo Jia[1]

1.*School of Resourses and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou* 450045, *China*
2.*School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*
3.*Luoyang Jinxin Highway Engineering Technology Development Co. Ltd., Luoyang* 471000, *China*
4.*Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd., Shanghai* 200000, *China*

Abstract: This paper discusses the engineering of a rectangulan pipe jacking project for the construction of the Shenzhuang Road-Shangding Road underpass in Zhengzhou .Roads inevitably deform excavation of a new large tunnel nearby in an urban underground engineering project. It is of great significanceto analyze the characteristics of ground surface deformation and their laws change to reduce the environmental impact of tunnel construction. Combined with the engineering practice of Zhengzhou Shen Zhuang Road-Shangding Road Underpass in Zhongzhou road tunnel engineering of rectangular pipe jacking.In-situ measured statistical analysis of ground surface deformation and the numerical simulation method of dynamic process of jacking pipe jacking construction analysis, it is found in this study the laws of the surface variation in the process of tunnel excavation.Numerical simulation can be applied to predict the influence of pipe jacking construction of existing road, to optimize the construction method and technical parameters, on basis of which the corresponding control measures can be put forward.The effectiveness of the forecast analysis has been verifiedthrough the engineering deformation monitoring data in this study.

Key words: tunnel project; rectangular pipe jacking; deformationmonitoring; numerical simulation; engineering geology.

1 工程概况

上海隧道股份股份有限公司率先在国内采用超大断面矩形顶管法进行城市内下穿主干道的施工,断面尺寸大,掘进难度高,技术复杂,不仅在国内是首次,在国际工程领域也处于领先地位.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51004049).
作者简介:王晓睿(1975-),男,副教授,主要从事数值计算的研究及其岩石裂纹扩展方面的应用.E-mail: 1691041993@qq.com

引用格式:王晓睿,张振,郭佳,2016.超大断面矩形顶管隧道施工动态变形规律.地球科学,41(11):1959-1965.

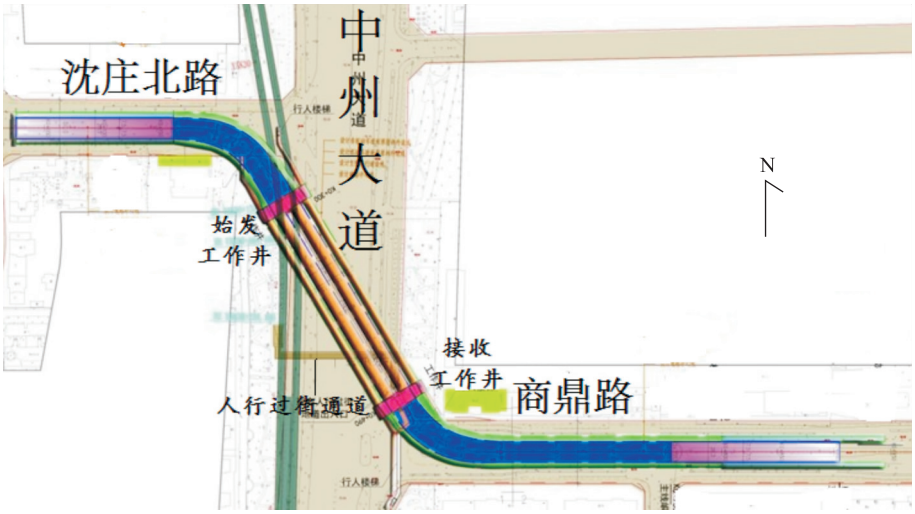

图 1 沈庄北路—商鼎路下穿隧道平面示意

Fig.1 Shenzhuang North road-Shangding road tunnel under the plane

该工程是郑州市沈庄北路—商鼎路下穿中州大道隧道工程,如图 1 所示,起点为沈庄北路熊儿河桥东侧,沿沈庄北路向东至中州大道西侧,东南向下穿中州大道至商鼎路口,向东至商鼎路通泰路口,全长 1 043.86 m,双向四车道+非机动车道.其中,机动车道隧道全长 905 m,其隧道盾构段长度为 212 m,暗埋段长度为 378 m,敞口段长度为 315 m;非机动车道隧道全长 955 m,其顶管段长度为 212 m,暗埋段长度为 388 m,敞口段长度为 355 m.为保证不中断中州大道交通,下穿中州大道段采用暗挖工法施工,其他部分采用明挖工法施工.

下穿隧道分为敞口段、明挖暗埋段和顶管段,敞口段和明挖暗埋段采用明挖顺作法进行施工,顶管段采用土压平衡式矩形顶管法进行施工,包括 2 条大顶管隧道和 2 条小顶管隧道.施工采用的大顶管机,断面尺寸 10.4 m×7.5 m,是目前国内最大断面的矩形顶管机,施工难度大,许多先进技术在全国同类工程中首次采用.

2 工程地质环境

工程地质勘察揭露了工程区域内的地层结构及分层、时代划分,勘探深度为 45 m,工程区域地层基本分 2 套地层:第四系全新统(Q4)、第四系上更新统(Q3).顶管施工过程中主要穿越土层为粉土和黏性土,工程区域各土层分布情况见隧道地质纵断面图 2.

沈庄北路下穿中州大道顶管段工程,包括 4 条分别长 212 m 的矩形隧道顶进段.采用一台外径 4.2 m×6.9 m 矩形顶管机施工非机动车车道,一台 7.5 m×10.4 m 矩形顶管机施工车行道.矩形顶管始发井位于沈庄北路中州大道西侧,接收井位于商鼎路中州大道东侧,顶管由西向东横穿中州大道.大顶管最小覆土 5.3 m,小顶管最小覆土 5.1 m;大顶管之间横向净距为 5 m、大小顶管之间横向净距为

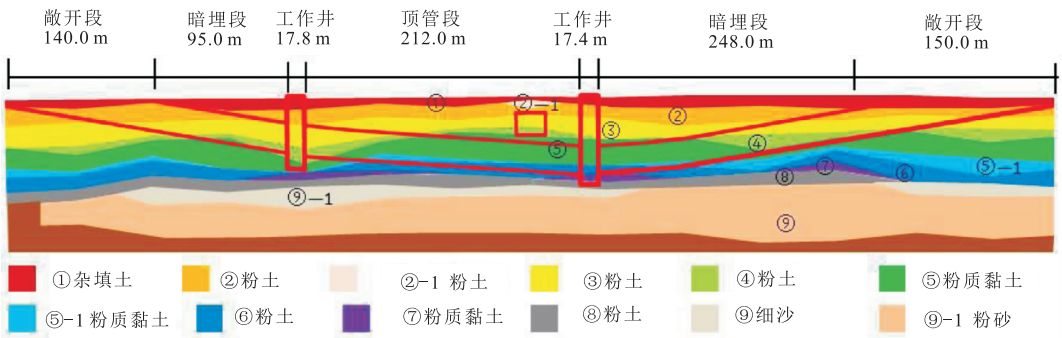

图 2 工程地质剖面

Fig.2 Engineering geologic profile

2.5 m.大小顶管均采用预制钢筋混凝土管节,小顶管管壁厚为 0.6 m,大顶管管壁厚为 0.7 m,长度均为 1.5 m.

3　矩形顶管机施工监测

顶管顶进过程的监测范围,断面宽度为顶管底埋深的 2 倍(孙继辉,2007;温锁林,2011),在此范围内的周围道路地面沉降、路面变形、地下管线变形均需要布设测点.每隔 5～10 m 布置 1 个监测面,每个监测面布置 5 个测点,测点间距为 5 m(监测点平面布置见图 3).在不阻断交通的情况下,在围挡内和非机动车道上采用人工监测为主,在机动车主干道采用全站仪监测(余彬泉和陈传灿,1998;何宜章,2005).笔者进一步对监测数据进行回归统计分析,确定地面沉降收敛值,为顶管施工沉降控制提供参考数据.

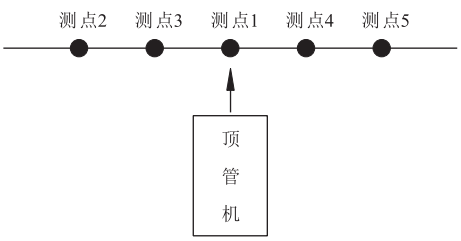

图 3　顶管地面监测点布置示意

Fig.3　The pipe jacking ground monitoring arrangement

4　地层移动规律分析

西侧矩形顶管隧道施工下穿中州大道过程中对土体扰动较大,会造成地表较大的沉降;根据郑州地区顶管的施工经验,顶管机在进出洞时沉降量最大,因此施工时在顶管进出洞段均进行了土体加固,并增加了降水井点,防止水土流失,尽量减小地表沉降.

由于出洞段采用双排 SMW 加固,加固区桩体布置也比较合理,并在型钢拔出后及时进行注浆,使顶管出洞段的沉降得到很好的控制,沉降量满足设计要求.顶管机进入人行道后,各项施工参数根据当地地层地质条件情况进行了调整;并且泥浆套保压效果逐渐显现,沉降量逐渐趋于稳定,但是沉降还是比较大.顶管机在到达机动车道后,通过二次注浆和泥浆套保压的作用,地表沉降得到了控制,在里程 158 m 以后沉降值基本在 30 mm 以内(图 4),达到设计要求.顶管机进入东侧非机动车道,顶进速度放慢,最终到达接收井加固区后,沉降迅速收敛.

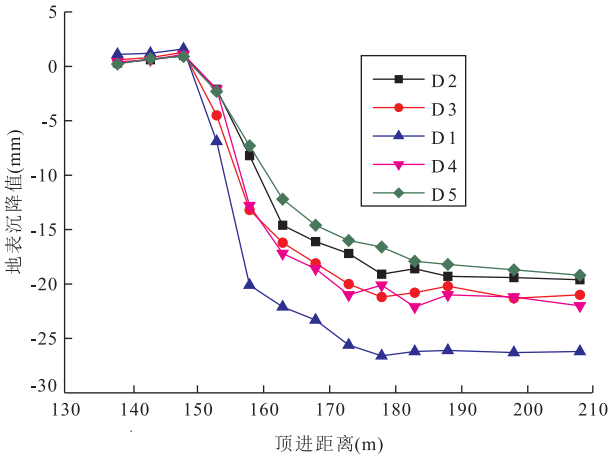

图 4　沈庄北路隧道 152 m 断面处地表沉降变化曲线

Fig.4　Shenzhuang Road surface 152 m tunnel section of the settlement variation graph

根据 152 m 断面处 5 个测点的沉降变化曲线可以得出以下结论:

(1)顶管机在 152 m 测量断面前,由于顶管机对土体的挤压作用,前方土体有隆起的趋势.

(2)顶管机通过监测断面位置后,轴线点土体沉降迅速增加 8.5 mm,沉降为 6.9 mm.

(3)顶管机通过监测断面过程中,沉降出现了突变,由沉降 6.9 mm 变为 20.1 mm.主要原因是顶管机高 7.55 m,而管节高 7.5 m,顶管机与管节之间的间隙为 25 mm,泥浆套未及时填充缝隙并形成良好的保压效果.

(4)当顶管机离开监测断面之后,泥浆套逐步填充管节与土体间的缝隙,沉降趋于稳定,不过在顶管继续顶进过程中,由于管节移动造成对土层的连续扰动的原因,沉降仍然会有波动.

5　数值模拟分析

由于监测方法的局限性而无法进行深入的研究,目前有不少的学者采用数值方法研究顶管的环境效应(黄宏伟和胡昕,2003;冯海宁等,2004;闫治国等,2005),可以说数值计算方法作为模拟隧道围岩变形的一种有效方法已经在工程中得到了广泛的应用(王晓睿等,2015).本文采用岩土与隧道分析系统 MIDAS/GTS 有限元软件对矩形顶管施工进行数值模拟计算.

5.1　计算模型

顶管起始顶进面为 x-z 平面,坐标原点为顶管

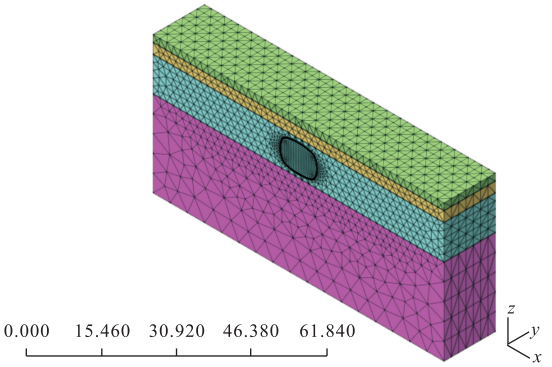

图 5 数值计算模型网格

Fig.5 Numerical model grid chart

隧道起始顶进截面中心，顶进方向为 y 轴正方向，z 轴的负方向为深度方向.矩形顶管管节外径 7.5 m×10.4 m，壁厚 0.7 m，每节管长 1.5 m，采用顶管法施工.取 10 节顶管(共 15 m)，计算模型宽 85 m、高 40 m、长 15 m，从而建立三维有限元模型(如图 5 所示).模型下表面为三方向约束边界，左右两侧表面为 x 方向约束边界，前后两侧表面为 y 方向约束边界.

5.2 模型参数选取

各地层参数参照该项目地质勘察报告，同时考虑到建模难度以及在用数值模拟计算过程中，地层分布过于凌乱可能对计算结果的分析造成混乱；所以在模拟的过程中，笔者根据顶管隧道主要穿越的地层，对其分布情况作了一定简化.简化后的地层能合理地反映在整个模型中地层的分布情况，模型所含地层及材料物理参数见表 1.

5.3 数值计算分析

数值计算考虑土层自重固结产生的应力分布作为开挖前初始应力状态，不考虑地质构造运动产生的次生应力，考虑地面超载 20 kPa.为了研究顶管顶进过程中引起土体变形的分布规律，根据 10 步开挖的数值计算得出图 6 中 z 方向上的位移云图.

在不同的开挖步下隧道中心线地表纵向变形曲线如图 7a 所示.为了更好地分析顶管在顶进过程中地表沿顶管横向方向的变形分布规律，取 $y=5$ m 处为一个监测断面，研究在不同开挖步下监测断面上各监测点的变化(图 7b).

图 7b 可以看出，在顶管开挖面的后方，由于土体的开挖以及顶管在顶进时对土体的拖拽作用，土层发生沉降，在随着顶管不断向前推进的过程中，开挖面后方土体沉降不断增大；在顶管开挖面前方，由于受到顶管顶推力的挤压作用，土体发生隆起，并在开挖面前方一定距离处达到最大值，然后沿着顶管隧道纵向隆起值缓慢减小，同时随着顶管的推进，隆起峰值的位置不断向前移动并逐渐减小.从图 7a 可以看出，土体受顶推力的的挤压作用产生隆起，而地表的隆起在顶管隧道正上方达到最大，但随着顶管向前推进，由于顶管对土体的向前拖拽作用，使顶管上方土体隆起量减小，特别是顶管隧道正上方隆起量大大减小，进一步演变成沉降，然后沿顶管隧道向外横向扩散.

6 地层沉降原因分析

顶管隧道施工引起地表变形的内在原因是土层的初始应力状态发生了变化，使得原状土经历了挤压、剪切、扭曲等复杂的应力路径.从力学角度看，顶管法施工过程是三维半无限介质中的一个与半无限界面平行的柱孔在不断延伸的过程.在柱孔的外侧存在着内外两个变形区，内变形区呈塑性变形，而外变形区为弹性变形.顶管顶进期间首先微量收缩(建筑空隙)，然后微量扩张(壁后注浆).表现为顶管机对土体的挤压和松动、加载及卸载、空隙水压上升与下降所引起土性的变异、地表隆起和下沉等(房营光等，1999；张庆贺等，1999)，从而使土体产生应力释

表 1 模型所含地层及材料物理参数

Table 1 Models included in the formation and the physical parameters of materials

序号	材料	属性	厚度(m)	天然容重 (KN/m³)	粘聚力 (c/kPa)	内摩擦角 φ (°)	泊松比	弹性模量 (MPa)
1	杂填土	土层 1	2.00	18.5	5.0	5.0	0.33	7.50
2	粉土	土层 2	3.00	19.9	10.6	21.5	0.35	10.23
3	粉质粘土	土层 3	10.00	19.6	22.0	15.9	0.35	12.03
4	粉砂	土层 4	30.00	20.3	3.0	32.0	0.30	5.60
5	注浆	注浆材料	0.30	20.0			0.48	0.95
6	C50 混凝土	管节	0.70	25.0			0.20	35 000.00
7	顶管机	钢壳	0.35	76.0			0.15	200 000.00

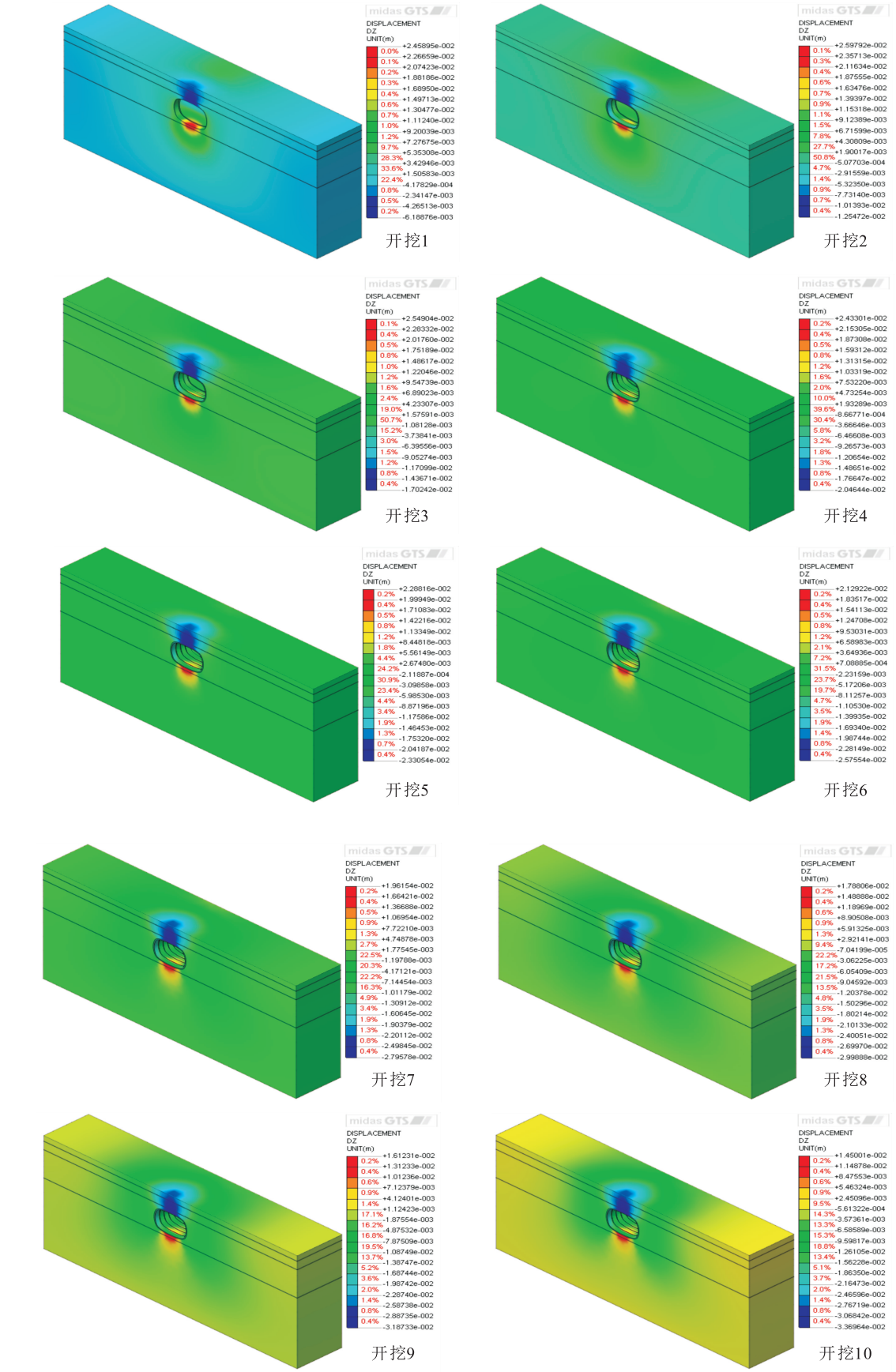

图 6　隧道开挖时的地层沉降

Fig.6　The ground settlement when tunnel excavation

a.1.5 m;b.3.0 m;c.4.5 m;d.6.0 m;e.7.5 m;f.9.0 m;g.10.5 m;h.12.0 m;i.13.5 m;j.15.0 m

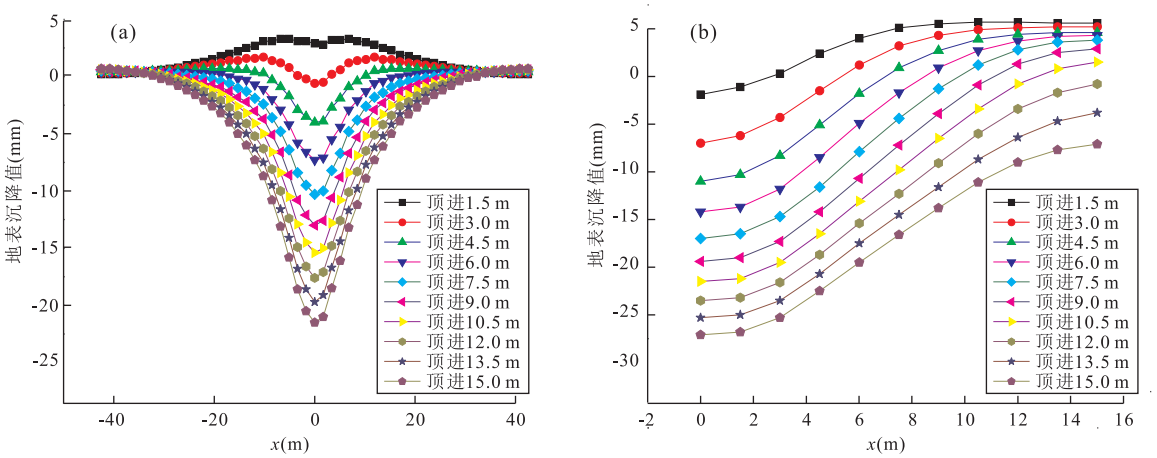

图 7 地表沿顶管横向方向的变形(a)和纵向方向的沉降(b)

Fig.7 Surface deformation along the transverse direction (a) and settlement of surface along the longitudinal direction (b) of the pipe jacking

放、体积、含水量和空隙水压力的变化,特别是土体结构或组构的破坏和变化.尤其在粉土中顶进开挖时,土体稍经扰动就会使土体的力学参数发生较大的变化,且容易引起固结和次固结沉降(刘建航和侯学渊,1991).参照盾构法隧道施工(张云等,2002),盾构掘进过程中土体应力释放会导致土体变形模量的减小.随着上覆土体的有效应力减小,其变形模量呈非线性减小,而变形增大;反之,在盾构正前方土体由于挤压而压密,空隙水压力消散,其有效应力增大,致使压缩模量增大.在顶管施工中也存在类似的现象.

从以上原因分析可知:

(1)离顶管越近受到的扰动就越大,土层变形也越大;离顶管越远受到的扰动就越小,土层变形也越小.

(2)顶管施工过程中造成的各种地层损失,这些地层损失会引起地表变形.造成这些地层损失的原因是多方面的,而有些能够通过提高顶管施工技术最大化降低其损失.

(3)顶管施工对土体的扰动使土体内应力状态和土体性质发生了改变.根据应力状态,可将隧道周围土体分为挤压扰动区、剪切扰动区、卸荷扰动区和固结区,这些应力状态划分的区域是随着顶管顶进而不断向前推进的.

7 结论

(1)隧道开挖引起的地表沉降主要原因是施工对土层的扰动发生水平和竖向的变形,由于顶管隧道施工的工法造成管节持续移动,对土体造成连续扰动,沉降难以避免;然而,当减小管节与土体的建筑空隙,避免顶管机与管节衔接处的沉降突变,对减小地表变形是切实可行和可靠的.

(2)地表变形与顶管顶进距离的关系,大致可以分为微小上升、微小沉降、沉降急剧增大及沉降平缓 4 个阶段;在距离开挖面 1 倍管径处地表监测点变形基本趋于稳定.

(3)顶管机在进出洞和停机转接过程中土体沉降最大,所以在进出洞区域应根据环境要求进行必要的土体加固,并且尽量减少停机转接时间,减少土层沉降.

(4)数值模拟分析表明隧道开挖引起的地层变形的主要原因是地层损失;优化施工方案是控制沉降的重要步骤,开挖过程中的动态跟踪注浆是关键;在沉降控制的敏感区域内,同时通过二次注浆来弥补泥浆套保压不足的问题,以稳定土体沉降.

References

Fang, Y.G., Mo, H.H., Zhang, C.Y., 2003. Theoretic and Testing Analysis of Soil Deformation in the Area of Disturbance Caused by Pipe-Jacking. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(4): 601－605 (in Chinese with English abstract).

Feng, H. N., Gong, X. N., Xu, R. Q., 2004. Finite Element Analysis of Influence of Pipe-Jacking Construction on Environments. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(7): 1158－1162 (in Chinese with English abstract).

He, Y. Z., 2005. Pipe Jacking Construction Method and the

Stability of the Cutting Face. *Trenchless Technology*, 22(1): 1－9(in Chinese).

Huang, H.H., Hu, X., 2003. 3D Numerical Analysis on Construction Mechanics Effect of Pipe-Jacking. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(3): 400－406(in Chinese with English abstract).

Liu, J.H., Hou, X.Y., 1991. Shield Tunnel. China Building Industry Press, Beijing (in Chinese).

Sun, J.H., 2007. Study on Tunneling Construction Equipment and Technology for Large Section and Rectangular Underground Passageway. *Building Construction*, 29(4): 225－229(in Chinese).

Wang, X.R., Zhang, Z., Jia, X.F., 2015. Analysis of Numerical Simulation of Tunnel Excavation Based on High Performance Parallel Finite Element Computing. *Earth Science*, 40(12): 2119－2124(in Chinese with English abstract).

Wen, S.L., 2011. Research on Environmental Impact during the Construction of Large Cross-Section Rectangle Pipe Jacking. *China Municipal Engineering*, (5): 37－39(in Chinese with English abstract).

Yan, Z.G., Zhu, H.H., Li, X.Y., et al., 2005. 3D-FEM Analysis on Stability of Shaft with Con-Duit Jacked Synchronously in Two Directions. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 27(8): 891－896(in Chinese with English abstract).

Yu, L.Q., Chen, C.C., 1998. The Pipe Jacking Construction Technology. China Communications Press, Beijing (in Chinese).

Zhang, Q.H., Zhu, Z.L., Yang, J.L., et al., 1999. Theory Analysis and Testing Study of Soil Disturbance Caused by Shield-Driven. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 18(6): 699－703(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Yin, Z.Z., Xu, Y.F., 2002. Analysis on Three-Dimensional Ground Surface Deformations due to Shield Tunnel. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(3): 388－392(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

房营光,莫海鸿,张传英,2003.顶管施工引起的土体扰动区的实测理论与分析.岩石力学与工程学报,22(6):601－605.

冯海宁,龚晓南,徐日庆,2004.顶管施工环境影响的有限元计算分析.岩石力学与工程学报,23(7):1158－1162.

何宜章,2005.顶管施工方法与切削面的稳定.非开挖技术,22(1):1－9.

黄宏伟,胡昕,2003.顶管施工力学效应的数值模拟分析.岩石力学与工程学报,22(3):400－406.

刘建航,侯学渊,1991.盾构法隧道.北京:中国建筑工业出版社.

孙继辉,2007.大断面矩形地下通道掘进施工设备与技术研究.建筑施工,29(4):225－229.

王晓睿,张振,贾晓风,2015.基于高性能并行计算的隧道开挖数值模拟.地球科学,40(12):2119－2124.

温锁林,2011.大断面矩形顶管施工对环境影响研究.中国市政工程,(5):37－39.

闫治国,朱合华,李向阳,等,2005.顶管同步顶进工作井稳定性三维数值分析.岩土工程学报,27(8):891－896.

余彬泉,陈传灿,1998.顶管施工技术.北京:人民交通出版社.

张庆贺,朱志隆,杨俊龙,等,1999.盾构推进引起土体扰动理论分析及试验研究.岩石力学与工程学报,18(6):699－703.

张云,殷宗泽,徐永福,2002.盾构法隧道引起的地表变形分析.岩石力学与工程学报,21(3):388－392.