

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.030

大断面矩形顶管隧道施工围岩变形与力学特性

张俊岱¹, 余芳涛^{2,3}, 王永鑫², 倪伟伟¹

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048;
3. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对城市繁华地段大断面矩形顶管隧道施工引起围岩扰动与破坏问题, 依托郑州市红专路大断面矩形顶管隧道实际工程, 采用 FLAC^{3D}有限差分法数值计算, 建立三维数值模型, 进行了大断面近距离多个平行矩形顶管隧道施工围岩变形与力学特性的研究。研究表明: 大断面近距离多个平行矩形顶管引起的地面沉降与沉降槽宽度, 后期顶管施工影响明显大于先期施工; 在顶管隧道顶进过程, 靠近始发井围岩沿隧道轴线方向围岩土体切应力较大, 远离始发井切应力较小; 考虑了盾构机的掌子面推力与盾壳、管节顶进过程的泥皮套摩阻力, 同步注浆压力, 提出一种综合考虑盾构机、管节顶进以及同步注浆的三维数值模拟方法。

关键词: 矩形顶管; 隧道; 数值模拟; 地表沉降; 围岩应力

中图分类号: U459.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0168-06

Deformation and Mechanical Performance of Surrounding Rock in a Large-section Rectangular Pipe-jacking Tunnel Construction

ZHAGN Jundai¹, SHE Fangtao^{2,3}, WANG Yongxin², NI Weiwei¹

(1. China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Focusing on the surrounding rock disturbance and damage caused by the construction of large-section rectangular pipe jacking tunnel in this particular area, a large section rectangular pipe jacking tunnel located in Hongzhuan road, Zhengzhou, was taken as an example. The FLAC^{3D} finite difference method was used to calculate the surrounding rock deformation and mechanical performance of large-section parallel rectangular pipe jacking tunnels within a close range. Results indicate that: the maximum ground settlement and the settlement tank width caused by the soil loss of the post-construction pipe jack are greater than those of the pre-constructed pipe jacking tunnels; during the jacking process of the tunnel, the surrounding rock near the starting shaft has a large shear stress along the axis of the tunnel, and the shear stress is lower for those far from the starting well; considering the thrust of the face of the shield machine, the mud-sleeve friction resistance of the jacking process of both pipe joint and shield shell, and the simultaneous grouting pressure, a 3D numerical simulation method was proposed which considers the shield tunneling machine, pipe jacking and simultaneous grouting.

Keywords: rectangular pipe jacking; tunnel; numerical simulation; surface settlement; shear stress

随着城市化进程进一步推进, 地上空间资源已不能满足需求, 故地下空间的开发和利用越来越受

到重视, 为了减少地表大开挖对地面交通的影响, 地下非开挖技术应运而生, 其中就包括矩形顶管隧道

技术^[1]。顶管法是一种新型的地下工程暗挖技术,特别是在城市建筑密集、交通繁忙路段、超浅埋及超大断面的隧道工程中有着极为明显的优势。顶管施工虽然将作业面移至地下,但仍不可避免地会对周围土体产生扰动^[2],围岩扰动将会带动周边土体变形,导致地面与地下建筑物产生不均沉降,甚至破坏。因此,有必要对顶管施工中扰动区土体的变形和强度特性进行研究,以便预估施工对周围环境的影响及其危害程度,采取有效防治措施,避免施工病害发生。施工过程中,土体受到扰动,平衡状态打破,土体经历挤压、剪切、扭曲等复杂应力路径,受扰动的土体再固结是地层变形的一个主要原因^[3]。

许多学者对此做了一些研究,魏纲等^[4]采用随机介质理论,推导出双圆盾构隧道施工时正常工况和旋转工况下由于土体损失引起的土体沉降计算公式,发现地面沉降预测结果与实测值比较吻合。侯公羽等^[5]对地铁隧道盾构施工真实过程和开挖卸荷效应进行数值模拟与计算,发现开挖卸荷效应对应力场与位移场的数值模拟结果有较大影响。魏刚等^[6]通过对地面出入式盾构法隧道施工引起的土体垂直变形计算方法进行研究,提出了一套全新的适用于地面出入式盾构法施工引起土体垂直变形的计算公式。林志等^[7]通过对上海复兴东路隧道施工现场监测分析,得出在近间距盾构施工中,后推进的盾构隧道的地层位移场及其结构内力均比先建隧道产生的影响要大。Zou 等^[8]采用有限元软件 3D ABAQUS 模拟沿海填海区车辆荷载作用下隧道施工引起的土体性状,发现预测结果与实测值吻合较好。刘树佳等^[9]对软土地区盾构施工参数对土体位移影响研究,发现盾构虽然埋深较大,但随着时间推移,开挖时所产生的扰动效应仍会影响浅部地层以及地表位置的土体位移。刘元雪等^[10]采用可以考虑土体小应变特性的本构模型与修正剑桥模型对盾构隧道施工进行了数值分析,发现小应变本构模型计算相对于修正剑桥模型计算对盾构施工质量敏感。唐晓武等^[11]对盾构与土体相互作用引起的土体变形特征进行计算。于宁等^[12]利用有限元方法对某盾构隧道工程进行了三维的变形模拟分析,所得计算结果与实测土体变形规律能较好地吻合。还有部分学者^[13-15]研究了盾构隧道施工引起地层变形规律,并推导了盾构掌子面推进过程中引起的三维地面沉降计算公式,该公式反映了盾构机掌子面推进过程中地面沉降变形的全过程。

虽然已有的工作对隧道开挖过程中的应力与沉降变形方面做出了一些研究,但是对于大断面近间距平行顶管不同步施工中地表沉降变化规律方面的研究相对较少。本文以郑州市红专路大断面矩形顶管隧道工程为研究对象,进行了隧道施工过程中开挖附近土体的沉降变形和应力数值模拟计算,分析了土性参数对地层扰动的影响,为顶管隧道施工技术提供理论指导。

1 矩形顶管隧道工程概况与数值分析方法

1.1 工程概况

红专路矩形顶管隧道位于红专路与中州大道交叉口,西接红专路姚寨路交叉口,东接龙湖商务外环,工程全长 801.263 m。根据隧道断面设计图,建立两大两小四条隧道,如图 1 所示。1#隧道、4#隧道为高度 5.4 m、跨度 7.5 m 的矩形断面人行隧道;2#隧道、3#隧道为高度 7.25 m、跨度 10.1 m 的矩形断面车行隧道。隧道埋深均为 4 m,各隧道间距均为 1 m,如图 2 所示。



图 1 顶管施工平面图

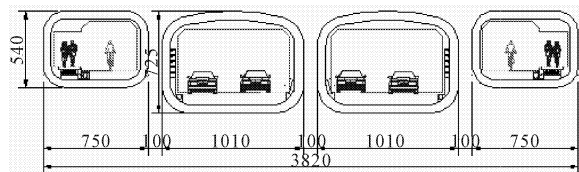


图 2 顶管段横断面图(单位:cm)

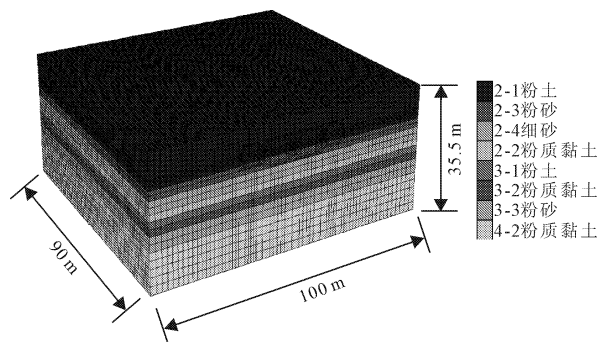
1.2 矩形顶管隧道数值模型与计算参数

矩形顶管隧道整体数值模型的长、宽、高为 100.0 m × 90.0 m × 35.5 m,如图 3(a)所示。四个隧道埋深均为 4.8 m,隧道间距均为 1 m,如图 3(b)所示,土层分布,如图 3(a)所示。模型单元个数为 184 320 个,节点个数 193 830 个。

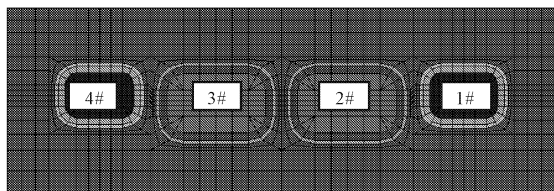
矩形顶管隧道数值模拟采用 FLAC^{3D}数值软件,地层材料采用摩尔-库仑本构模型,依据勘察报告,地层分布与参数选取如表 1 所示。顶管盾构机采用壳体单元模拟,预制管节与注浆弱化层采用实体单元模拟,如图 4 所示,参数选取如表 2 所示。

表 1 各土层初始地应力参数

土层分布	埋深/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
1 填土	-1.5~0.5	10.0	18.00	25.0	6.0	1.67
2-1 粉土	-1.5~-8.5	12.0	17.00	33.6	13.4	1.92
2-2 粉质黏土	-8.5~-11.5	20.5	15.90	18.0	6.8	1.97
2-3 粉砂	-11.5~-14.0	0.0	26.00	29.8	13.6	2.04
2-4 细砂	-14.0~-16.0	0.0	32.00	30.0	14.8	2.07
3-1 粉土	-16.0~-18.0	13.0	20.00	28.0	20.0	1.98
3-2 粉质黏土	-18.0~-21.0	19.5	13.75	30.0	25.0	1.88
3-3 粉砂	-21.0~-24.0	0.0	31.20	28.0	14.4	2.06
4-1 粉质黏土	-35.0~-24.0	25.5	17.50	30.0	25.0	2.00



(a) 整体模型



(b) 局部模型

图 3 模型尺寸及细部结构示意图

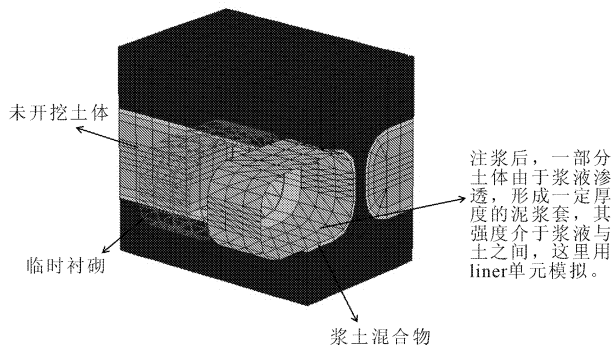


图 4 顶管施工数值模拟

表 2 隧道施工支护参数

名称	单元类型	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比 μ	厚度/m
临时衬砌	shell 单元	2.5	20.000	0.27	0.04
管节	实体单元	2.5	2.800	0.20	0.55/0.60
注浆弱化层	实体单元	1.8	0.021	0.17	0.20
泥浆套	liner 单元	2.2	0.024	0.17	0.20

1.3 矩形顶管隧道施工数值模拟方法

矩形顶管隧道施工数值模拟几个假定条件:(1) 土体各向同性,且是连续的、均质的;(2) 推进过程不考虑轴线的偏移,地层损失完全是施工的影响;(3) 不考虑地下水的影响;(4) 不考虑时间效应(土体蠕变)的影响;(5) 工具管机头对土体作用复杂,简化掌子面受力;(6) 注浆作用效果一致,泥浆套形成完整。

矩形顶管隧道施工数值模拟方法:

(1) 机头模拟。将土体定义为空单元来模拟顶进过程,由于顶管机和管道刚度远大于周围土体刚度,可将其看做弹性材料,因此施加刚度很大的临时衬砌(shell 结构单元)来模拟,同时在开挖面设弹性面并施加法向应力(土仓压力)维持掌子面的稳定。

(2) 管节顶进。顶管衬砌用实体单元模拟,顶进过程中,管道与周围土体之间会产生摩擦力(为便于分析和编程,产生静摩擦力),在数值模拟中,通过施加切应力来模拟这部分摩擦阻力,然后模型进入力学平衡计算。

(3) 同步注浆。在顶管机和顶管隧道结构与围岩交界处施加径向应力,模拟注浆压力。计算中用 liner 单元模拟管节与土体之间的滑移层,滑移层厚度即为注浆填充的工具管与管道之间环形空腔的厚度。注浆过程中考虑泥浆的渗透,会将管土之间的一部分土体弱化,形成泥浆与土的混合物。数值模拟中,假定浆土混合物的力学参数介于泥浆液与土体之间。

(4) 正面推进力的模拟。由于地层在天然应力状态下的平衡被打破,开挖导致临空面附近的土体应力得到释放,当正面附加推力小于该处土体的静止土压力时,会出现欠挖现象,土体向临空面移动,具体表现为地表沉降;当正面附加推力大于该处土体的静止土压力时,掌子面前方土体受到挤压,进而引起地表隆起现象。在实际操作中,通常控制顶管

推进中的前舱压力控制在刀盘中心处土体主动和被动土压力范围内,尽可能减小顶管顶进对周围土层及临近构筑物产生的影响。

(5) 在数值模拟中,为了更加符合实际的施工情况,通过在顶管单元和周围土层之间设置接触面结构单元,来模拟顶管推进的滑移过程。计算中用 liner 单元模拟管节与土体之间的滑移层,liner 结构单元是 3 个节点(每个节点各有 6 个自由度,3 个移动和 3 个旋转)的扁平有限单元,能抵抗膜及弯矩荷载,不但能承受主方向的拉压应力,还能模拟管道与土体之间的分离及随后的重新接触,以及管道片与土体之间的摩擦相互作用。

(6) 顶管注浆层切向应力的模拟。根据力的相互作用原理,顶管机掘进过程中,在顶进轴线上始终存在一组近似平衡的动态力系。千斤顶的推力作用属于外部荷载,通过掌子面前方的贯入阻力以及工具管、管段与周围土体之间的侧摩阻力(沿程阻力)来平衡。顶管法施工依靠工具管对土层施加正面推进力,并通过掘进机头对土层施加挤压力,加上管壁与土层的摩擦力以及管壁注浆层的切向应力等,与挖掘面正前方的水、土压力的合力形成了一组平衡力系。因此,顶进阻力由两部分组成,包括工具管前端刀脚的贯入阻力,另一部分是管壁与土体之间的摩阻力,这部分阻力占到了顶进阻力的绝大部分,称为沿程阻力。在模拟切向应力的作用时,可以对管壁周围相邻的土体施加沿推进方向的均布荷载,大小取单位面积上的摩擦阻力。

2 大断面矩形顶管施工数值计算结果

郑州红专路矩形顶管具有断面较大,四个断面平行近间距,以及不同步先后顶管施工相互影响等施工特点,顶管隧道施工会引起地层不均匀沉降及围岩稳定性问题,将会对周边地下与地面环境造成较大影响。

2.1 地表及地层位移变化规律

数值模拟关键施工参数如下:掌子面推进力为 1 倍的矩形隧道中心点土压力,注浆压力为 0.5 倍的上覆土层土压力,泥皮套摩阻系数为 0.01(泥皮套摩阻力为泥皮套摩阻系数与上覆土层土压力乘积),上覆地层厚度为 4.8 m,四个顶管隧道间距均为 1 m。顶管自东向西顶进,先施工 1#、3# 顶管,由东侧始发并始发,掘进完毕在西侧接收并解体吊出,再运至始发井,施工 2#、4# 顶管。

1# 顶管与 3# 顶管引起地表沉降分布规律均符合 Peck 公式的正态分布特征。由于 1# 顶管相对

3# 顶管的横断面面积较小,3# 顶管施工引起地表最大沉降明显较大,这是由于面积较大的顶管隧道,开挖引起地层损失率较大。相对而言,3# 顶管施工过程中引起地表不均匀沉降也较大,因此,在 3# 顶管施工期间,密切关注土体变形引起周边建筑物的破坏。如图 5(b)和图 6(a)所示。

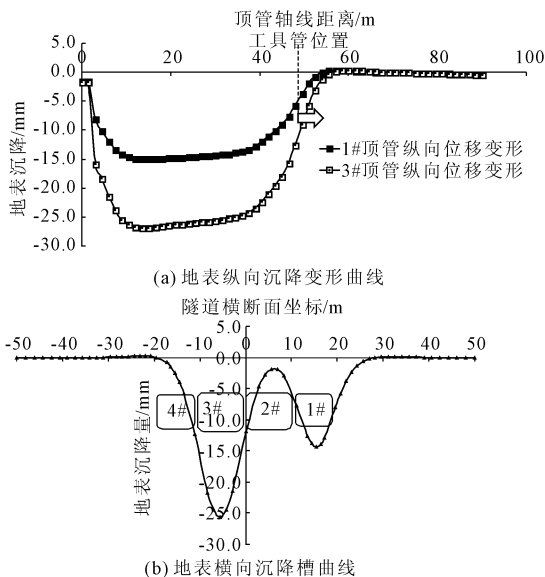


图 5 1#、3# 顶管施工完成地表位移变形

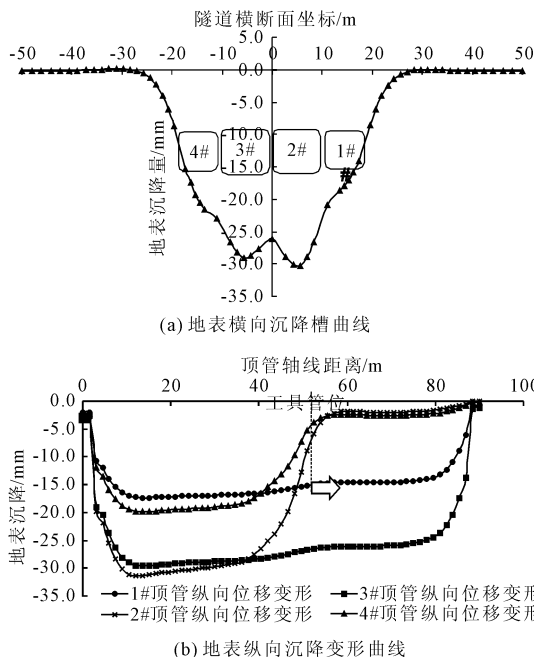


图 6 顶管施工完成地表位移变形

顶管断面越大,与周围土体的接触作用越明显。顶管在顶进过程中,在相同顶进距离下顶管将受到更大的摩阻力作用,泥浆套触变性能对于超大直径顶管的长距离顶进将产生较大影响。由计算结果可以看出,断面面积较大的矩形顶管隧道施工引起的

地层最大沉降变形较大,地层损失较大;断面面积较大的矩形顶管隧道开挖瞬间引起的地表倾斜率较大,不利于上覆地层中管线的安全,而且在 1 倍矩形隧道中心点土压力的掌子面推进力作用下,掌子面正前方地表隆起量较小,隆起数值约为 1 mm,如图 5 (b)所示。图 7 表示掌子面正前方随着深度变化的沿隧道轴向方向位移,表明掌子面推进力对正前上方土体影响较大,掌子面推进力对正前下方土体影响较小,大约在矩形隧道底部 5 m 以内。

1# 和 3# 顶管隧道施工方式为平行同步施工,两顶管中轴线间距 20.9 m,从图 8 可以看出,由于施工间距较大,在施工过程中两顶管相互之间的扰动并不明显,但在 2# 和 4# 顶管施工过程中,由于施工间距只有 1 m,后施工顶管对已完成顶管隧道引起的扰动比较明显,后施工顶管由于土体损失引起的最大地面沉降值和沉降槽宽度都要大于先施工顶

管隧道。而且,后施工顶管在 1# 和 3# 顶管对土体造成扰动的基础上,相当于对土体进行了二次扰动,因此,造成地层扰动变形明显加剧。

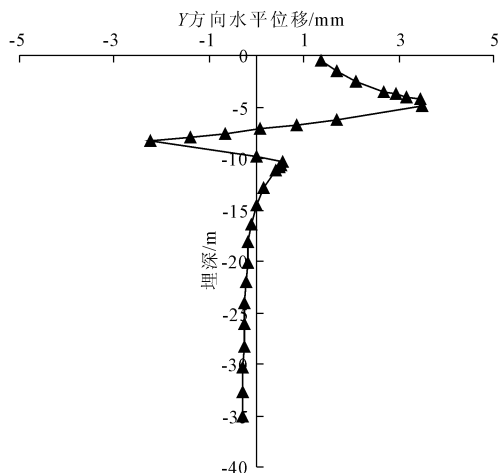


图 7 掌子面正前方沿隧道轴向方向位移随深度变化规律

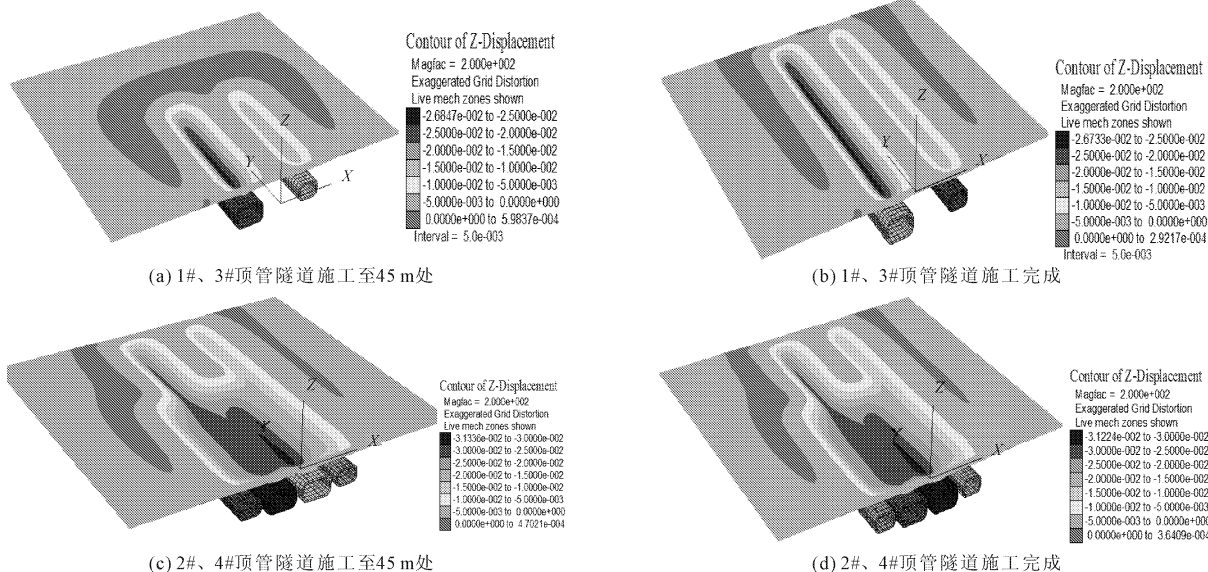


图 8 顶管隧道施工地表沉降位移云图

由图 9 可知,1# 和 3# 顶管、2# 和 4# 顶管单独施工引起的地表沉降叠加之后,与四个顶管先后施工引起的地表总沉降变形结果一致,因此,矩形隧道群开挖引起地表沉降可以近似认为是多个单一沉降槽累积叠加的结果。

2.2 隧道围岩与衬砌结构应力变化规律

由图 10 可知,顶管周围土体处于主压状态,顶管推进,当泥皮套形成较为完整时,可以认为泥皮套的摩擦系数为纯泥浆的摩擦系数,泥皮套减摩效果最好。在隧道顶进过程中,泥皮套摩阻力向围岩扩散范围较小,近间距的隧道相互影响较小。如图 11 所示为隧道施工引起隧道轴线方向的应力云图,表

明靠近始发井围岩沿隧道轴线方向切应力较大,远离始发井围岩切应力较小。随着隧道掌子面的推进,靠近始发井端的围岩切应力逐渐增大。

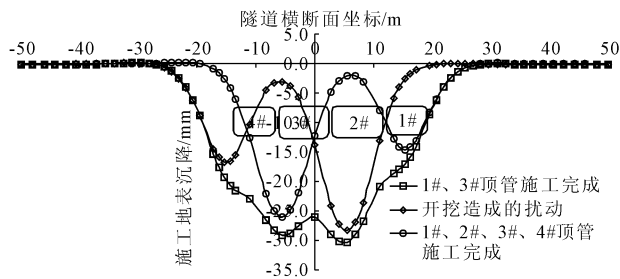
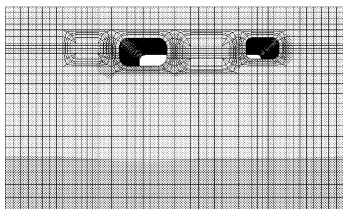
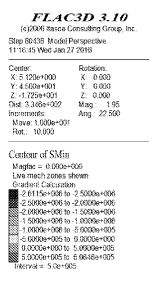
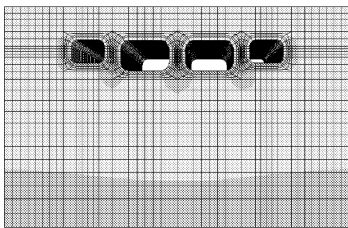
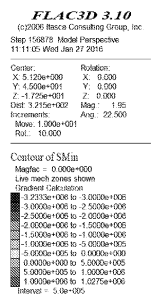


图 9 顶管不同步施工引起的地表沉降变形



(a) 1#、3#顶管施工完成



(b) 2#、4#顶管施工完成

图 10 顶管隧道围岩大主应力云图

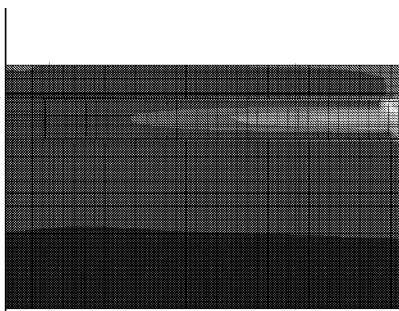
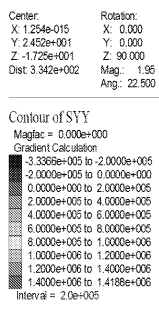


图 11 3# 隧道施工引起隧道轴线方向的应力云图

3 结 语

以郑州市红专路大断面矩形顶管隧道工程实例,进行了大断面矩形顶管隧道施工三维数值模拟,分析了施工过程中开挖附近土体的沉降变形和应力分布规律。得出以下结论:

(1) 针对顶管施工流程与施工技术,采用壳体单元与掌子面推进力模拟盾构机,施加切应力模拟管节顶进过程中泥皮套摩阻力,施加法向面力模拟同步注浆,提出一种综合考虑盾构机、管节顶进以及同步注浆的三维数值模拟方法。

(2) 后施工顶管由于二次扰动其地层损失引起的最大地面沉降值和沉降槽宽度都要大于先施工顶管隧道;断面面积较大的矩形顶管隧道开挖瞬间引起的地表倾斜率及扰动范围都较大,不利于上覆地

层中管线的安全。

(3) 靠近始发井围岩沿隧道轴线方向切应力较大,远离始发井围岩切应力较小。随着隧道掌子面的推进,靠近始发井端的围岩切应力逐渐增大。

参考文献:

- [1] 彭立敏,王 哲,叶艺超,等.矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设,2015,35(1):1-8.
- [2] 魏 纲,陈春来,余剑英.顶管施工引起的土体垂直变形计算方法研究[J].岩土力学,2007,28(3):619-624.
- [3] 张 云,殷宗泽,徐永福.盾构法隧道引起的地表变形分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):388-392.
- [4] 魏 纲,朱 奎,陈伟军.不同施工工况下双圆盾构引起的土体沉降研究[J].岩土工程学报,2011,33(3):477-482.
- [5] 侯公羽,刘宏伟,李晶晶,等.基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J].岩石力学与工程学报,2013,31(S1):2915-2924.
- [6] 魏 纲,姜 鑫,张鑫海,等.地面出入式盾构法隧道施工引起的土体垂直变形[J].岩土力学,2018,39(3):993-1001.
- [7] 林 志,朱合华,夏才初.近间距双线大直径泥水盾构施工相互影响研究[J].岩土力学,2006,27(7):1181-1186.
- [8] Zou Baoping, Wang Jianxiu, Tian Qian, et al. Numerical analysis of the soil deformation caused by tunneling under vehicle loads in the coastal reclamation area[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015,1:1-11.
- [9] 刘树佳,白廷辉,廖少明,等.软土地区盾构施工参数对土体位移影响的滞后性试验研究[J].岩土力学,2017,38(3):857-865.
- [10] 刘元雪,施建勇,许 江,等.盾构法隧道施工数值模拟[J].岩土工程学报,2004,26(2):239-243.
- [11] 唐晓武,朱 季,刘 维,等.盾构施工过程中的土体变形研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):417-422.
- [12] 于 宁,朱合华.盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J].岩土力学,2004,25(8):1330-1334.
- [13] 魏 纲,张世民,齐静静,等.盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):3317-3323.
- [14] 杨 俊,邵生俊.地铁盾构隧道穿越高架桥梁基的力学行为分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):190-194.
- [15] 赵丽雅,许宏发,晋学辉,等.盾构隧道下穿铁路群的路基加固及沉降分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):85-90.