

文章编号: 1674—8247(2024)06—0091—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.015

非均匀顶推力作用下大断面矩形顶管 隧道管节施工力学性能研究

陈 然 刘炳杰 崔光耀

(北方工业大学, 北京 100144)

摘 要:为研究非均匀顶推力下大断面矩形顶管隧道管节的施工力学性能,本文依托某城市火车站涉铁预埋地下通道工程,通过建立模型,设置 5 种不同非均匀顶推力工况,对比分析了不同工况下管节最大主应力、最小主应力和剪应力的变化趋势。研究结果表明,在非均匀顶推力作用下,各工况各管节初始顶推时最大主应力、最小主应力和剪应力值最大;随着管节所承受不均匀顶推力增加,同一工况同一管节所受最大主应力、最小主应力和剪应力随之增加;随着顶管工程进行,各管节最大主应力、最小主应力和剪应力也随之减小。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词:矩形顶管隧道;大断面;管节;非均匀顶推力;施工力学

中图分类号:U45

文献标志码:A

Study on the Mechanical Properties of Large-section Rectangular Pipe Jacking Tunnel Segments under the Action of Non-uniform Jacking Force

CHEN Ran LIU Bingjie CUI Guangyao

(North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: To study the construction mechanical properties of large-section rectangular pipe jacking tunnel segments under non-uniform jacking force, this paper relied on the railway pre-buried underpass project at a city railway station. By establishing a model and setting up five different scenarios with varying non-uniform jacking forces, a comparative analysis was conducted on the trends of maximum principal stress, minimum principal stress, and shear stress in the tunnel segments under different scenarios. The results indicate that under non-uniform jacking forces, the maximum principal stress, minimum principal stress, and shear stress in each segment reach their peak values during the initial jacking phase of each scenario. As the non-uniform jacking forces borne by the segments increase, the maximum and minimum principal stresses and shear stress experienced by the same segment under the same scenario also increase. As the pipe jacking project progresses, the maximum and minimum principal stresses and shear stresses in each segment decrease accordingly. The research findings provide a reference for similar engineering projects.

Key words: rectangular pipe jacking tunnel; large section; tunnel segment; non-uniform jacking force; construction mechanics

目前关于顶管法施工的研究主要有:刘波^[1]等通过建立三维有限元计算模型模拟顶管法施工可能引起

收稿日期:2024-05-15

作者简介:陈然(2000-),硕士研究生。

引文格式:陈然,刘炳杰,崔光耀.非均匀顶推力作用下大断面矩形顶管隧道管节施工力学性能研究[J].高速铁路技术,2024,15(6):91-97.

CHEN Ran, LIU Bingjie, CUI Guangyao. Study on the Mechanical Properties of Large-section Rectangular Pipe Jacking Tunnel Segments under the Action of Non-uniform Jacking Force[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):91-97.

的隧道及地表变形,根据结果提出了控制措施和监测方案;荣亮^[2]通过工程实践,在复杂情况下,合理选择注浆参数,以控制地表沉降;刘永辉^[3]等依托工程对浅覆粉土中大断面矩形顶管施工引起的地面沉降分布特征及变化规律进行了总结;孙宇赫^[4]通过现场实测和数值模拟研究了顶管法对周围土体沉降、分层沉降以及水压力的影响规律并对施工技术参数进行了优化;屈克军^[5]通过现场监控、数值模拟和理论分析等手段分析了流固耦合效应对开挖面极限支护力、破坏模式及孔隙水压力的影响;王素伟^[6]结合顶管法工程案例分析了工程中的顶管机和管材选型、土仓压力等问题并提出了解决方案;陈楠^[7]通过数值分析和室内模型试验研究了大直径钢顶管的土压力分布、管土摩阻力、曲线钢顶管受力和钢顶管结构稳定性,进而对工程中钢顶管选择和布置提出指导建议;王明胜^[8]等通过室内泥浆性能试验确定了触变泥浆的配合比并结合现场确定了顶管隧道工程触变泥浆减阻技术应用效果良好;刘招伟^[9]通过模拟试验得到了矩形顶管隧道施工中触变泥浆套的形成规律;胡新朋^[10]依托郑州某大断面矩形顶管隧道工程,建立三维荷载-结构分析模型,进行管节接头技术研究;ZHANG^[11]等针对类矩形隧道的较大弯矩问题,提出一种新型 DIJP 接头,并通过试验和数值模拟研究了螺栓位置改进的效果以及其余优化方案的改善效果;申昊冲^[12]等以顶管承插破口焊接接头受弯试验为基础研究了试件承载与破坏形式,并通过建立模型分析了类矩形承插钢板连接接头的性能;XUE^[13]通过一系列室内试验和现场试验,研究了大直径过江盾构隧道双层密封垫的荷载变形和密封性能,并分析了双层密封垫的失效模式;王湛^[14]结合实际工程通过建立数值模型与前人计算模型对比,研究了过江隧道管片接缝密封垫张开和错台时的防水失效机制;周仲贺^[15]通过工程实例介绍了大断面矩形顶管隧道管节内角部高强钢筋张拉施工技术。刘顺水^[16]依托某火车站地下通道工程,建立软弱地层近接下穿高铁超大矩形顶管盾构隧道施工力学模型。刘朝钦^[17]通过建立软弱地层超大矩形顶管盾构隧道模型研究了不同内摩擦角因子、黏聚力因子、埋深因子时开挖面位移和支护应力差率曲线。

综上,国内外研究多集中于顶管法施工监测、钢管选择布置及管节接头性能研究,针对大断面矩形顶管隧道在非均匀顶推荷载下管节力学性能的研究较少,本文依托某城市大断面矩形顶管隧道工程,通过数值模拟研究不同位置各管节在非均匀顶推力影响下的力学性能。

1 工程概况

本工程为某城市火车站涉铁预埋地下通道工程。该通道由南向北穿过福厦铁路和既有深杭铁路,采用2台盾构机和4台超大断面矩形顶管机施工,工程地理位置如图1所示。

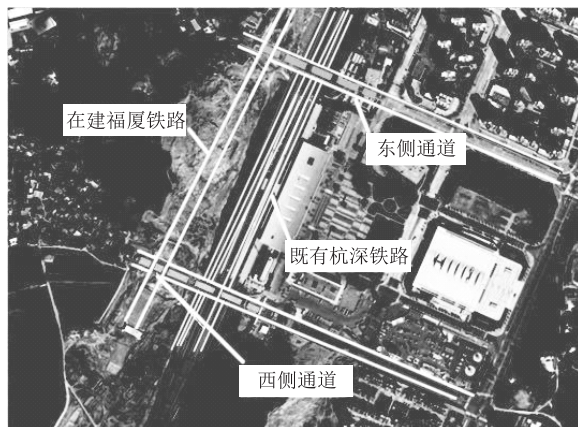


图1 工程地理位置示意图

东侧地下通道,道路红线为40 m,全长778 m,顶管段长212 m,类矩形断面12.6 m×7.65 m,壁厚0.8 m,标准管节长1.8 m,线间净距5 m,呈3‰下坡。西侧地下通道:道路红线为40 m,全长820 m,顶管段长265.6 m,顶管截面为类矩形,尺寸12.6 m×7.65 m,壁厚0.8 m,标准管节长1.8 m,线间净距2.5 m,呈3‰下坡。本文依托工程大断面矩形顶管隧道部分里程需要穿越复合地层。东侧地下通道顶管区间洞身地质主要是中风化花岗岩,强风化花岗岩,全风化花岗岩和粉质黏土,洞顶上以素填土和粉质黏土为主。西侧地下通道顶管区间洞身地质主要是中风化花岗岩,全风化花岗岩,素填土和粉质黏土,洞顶上以素填土和粉质黏土为主。同时,经勘察西侧地下通道全线无崩塌、滑坡、岩溶、土洞、采空区等不良地质现象。

2 参数确定及模型建立

2.1 参数确定

该大断面顶管隧道工程选用整环管节为C50P10预制钢筋混凝土管,管壁厚0.8 m,其外轮廓为12.6 m×7.65 m的矩形。对于顶管隧道,由于顶进距离不同,管节断面所需的允许顶力也各不相同。为保证施工中隧道结构的安全,需考虑管节材料、顶进加压方式、受力面积以及接触状态等因素对允许顶力大小的影响。在工程顶进过程中,由于选择触变泥浆进行减阻,考虑到本工程顶管管节节数为20节,顶管机开挖轮廓面积,覆盖土层厚度,管节外周长等。通过计

算,本工程中允许顶力为 792 900 kN,顶管机顶推力为 28 869.47 kN,开挖面迎面阻力为 9 007.91 kN,管节摩擦力为 10 238.4 kN。

计算模型以素填土、粉质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩作为地层材料,C50P10 钢筋混凝土作为衬砌材料,材料参数通过现场勘察、室内试验以及相关规范获得,具体参数如表 1 所示。

表 1 围岩及管节参数表

材料	密度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^3$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
素填土	18.60	4	0.37	5.0	25.0
粉质黏土	19.20	50	0.37	19.9	30.5
全风化花岗岩	17.60	32	0.32	16.5	26.0
强风化花岗岩	21.00	130	0.30	46.0	40.0
管节	28.00	34 500	0.20	—	—

2.2 模型建立

利用 Abaqus 有限元软件批量建立顶管隧道施工模型,如图 2 所示。顶管轮廓为 12.6 m×7.65 m 的矩形。依据弹塑性理论,隧道开挖对围岩的影响范围为 3~5 倍洞径,为消除边界效应,模型跨度 120 m,高度 50 m。隧道所在土层选用摩尔-库伦强度准则,管节满足弹性准则,采用塑性损伤模型。该工程顶管管节长 1.8 m,选取 20 段正常顶进施工的管节进行施工模拟。在 Abaqus 中采用生死单元功能实现管节前方土层开挖,利用位移控制实现管节顶进,顶进完成后通过在管节尾部施加荷载模拟顶推力作用下顶管隧道施工受力过程。每两节管节之间通过设置接触模拟实际施工过程中的接缝错台和接缝张开,在管节与土层之间设置耦合接触,忽略吊装孔、注浆孔等影响因素,土层设置为均质土层,边界条件为约束模型底部及四周位移。

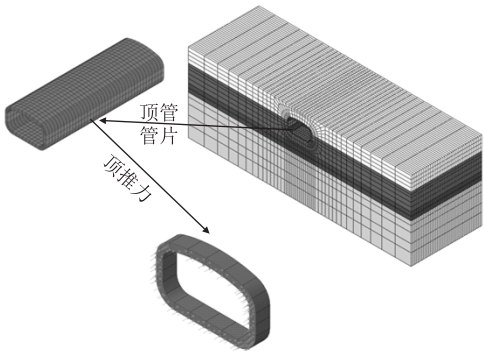


图 2 顶管施工模型图

为更好地分析计算,对管节及管节接缝进行编号,每 5 m 设置 1 个监测断面,在每个监测断面布置 20 个监测点,并对监测点进行编号,如图 3 所示。

在施工过程中考虑到非均匀千斤顶推力作用可能

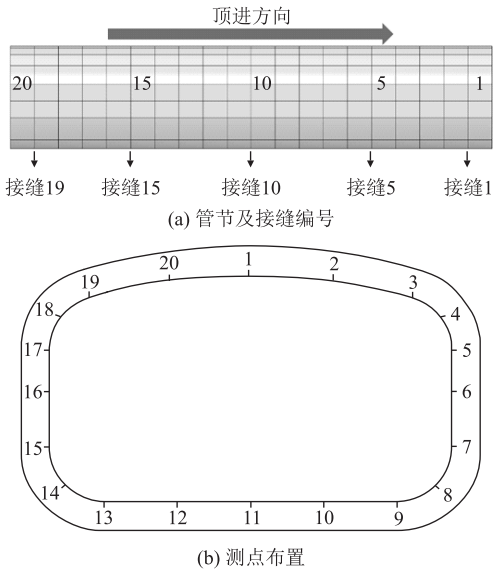


图 3 管节编号及测点布置图

对管节施工力学性能产生不良影响,因此结合该工程存在管节尺寸巨大的实际情况,将千斤顶作用于顶管上后管节的受力区域分成 A、B、C 和 D 4 部分,如图 4 所示。考虑到该工程顶管段主要穿越“上软下硬”复合地层,即可以通过调节 A 区和 C 区的推力分配研究“上下不均”推力对管节结构性能的影响,计算工况如表 2 所示。

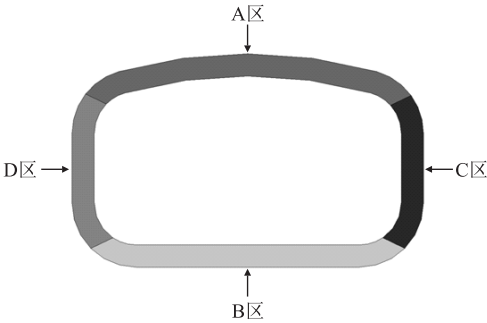


图 4 管节分区示意图

表 2 推力计算工况表(%)

工况	A	B	C	D
1	25.0	25.0	25.0	25.0
2	24.5	25.0	25.5	25.0
3	24.0	25.0	26.0	25.0
4	23.5	25.0	26.5	25.0
5	23.0	25.0	27.0	25.0
6	22.5	25.0	27.5	25.0

注:表中 B 区、D 区推力分配维持不变,仅改变 A 区、C 区推力分配

3 管节应力计算结果及分析

选取图 3(a)所示正常顶进施工中第 5、第 10 及第 15 管节进行管节应力分析。

3.1 最大主应力分析

提取模型计算结果中各管节在隧道正常顶进施工过程中处于不同位置时管节的最大主应力云图,如图5所示(以各工况10管节初始顶推时为例)。

由图5可知,随着不均匀推力的增加,各工况同一管节初始顶推时的最大主应力逐渐提升,提取各管节云图的最大主应力,绘制出顶推管节数与最大主应力的关系,如图6所示。

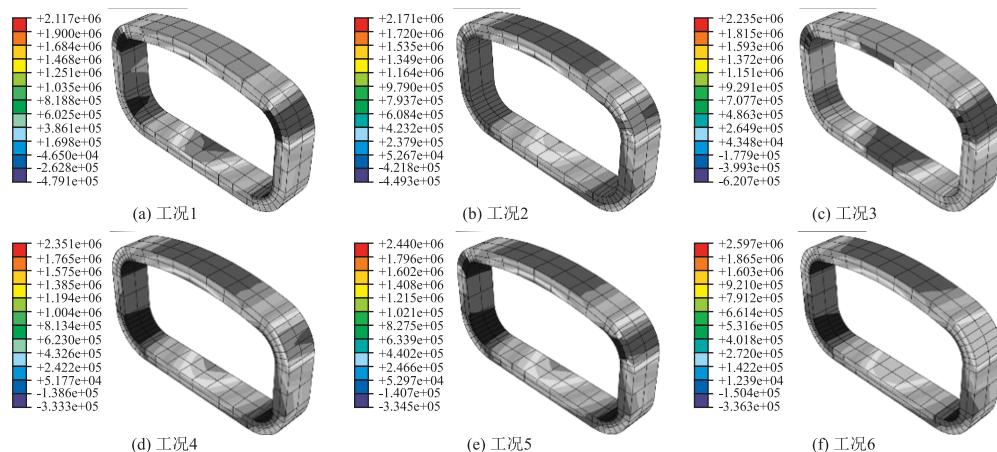


图5 最大主应力云图(MPa)

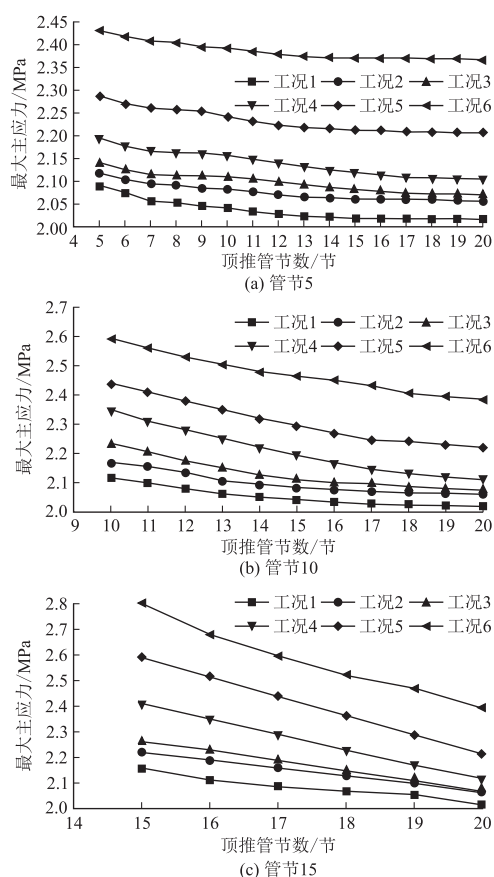


图6 管节最大主应力图

由图6可知,各管节初始顶推最大主应力随着顶进管节数量的增加而增加。对某一工况的某管节来说,随着管节顶推数的增加,最大主应力逐渐减小,最后趋于平稳。与工况1(均匀顶推力)相比,工况2~

工况6(非均匀顶推力)的最大主应力均有明显提升。对于管节5来说,与工况1相比,工况2~工况6的最大主应力最大值分别增加了1.340%、2.440%、4.976%、9.426%和16.364%;对于管节10来说,工况2~工况6的最大主应力最大值分别增加了2.551%、5.574%、11.053%、15.257%和22.674%;对于管节15来说,工况2~工况6的最大主应力最大值分别增加了2.964%、4.863%、11.672%、19.917%和29.643%。随着A区与C区所受不均匀推力比例的增加,工况2~工况6最大主应力增加比例逐渐上升。

实际工程中,管节最大主应力增加会导致管节变形,当最大主应力超过管节材料的抗拉强度极限值时,管节可能会发生拉裂缝病害。

3.2 最小主应力分析

提取模型计算结果中各管节在隧道正常顶进施工过程中处于不同位置时管节的最小主应力云图,如图7所示(以各工况10管节初始顶推时为例)。

由图7可知,随着不均匀推力的增加,各工况同一管节初始顶推时的最小主应力逐渐提升,提取各管节云图的最小主应力,绘制出顶推管节数与最小主应力的关系,如图8所示。

由图8可知,各管节初始顶推最小主应力随着顶进管节数量的增加而减小并逐渐趋于平缓。与工况1(均匀顶推力)相比,工况2~工况6(非均匀顶推力)的最小主应力均有所提升。对于管节5来说,与工况1相比,工况2~工况6的最小主应力最大值分别

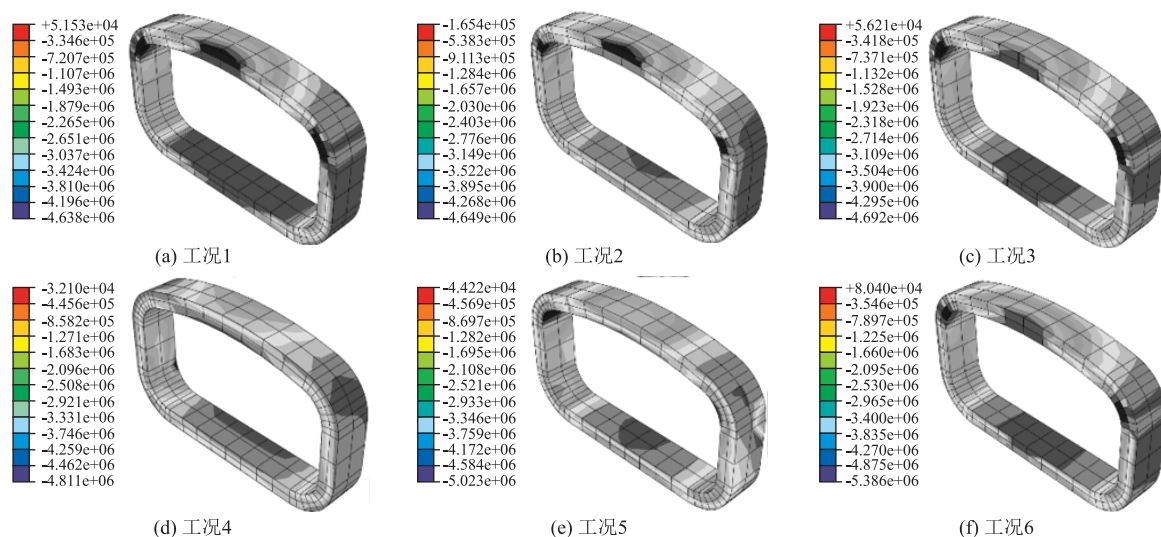


图7 最小主应力云图 (MPa)

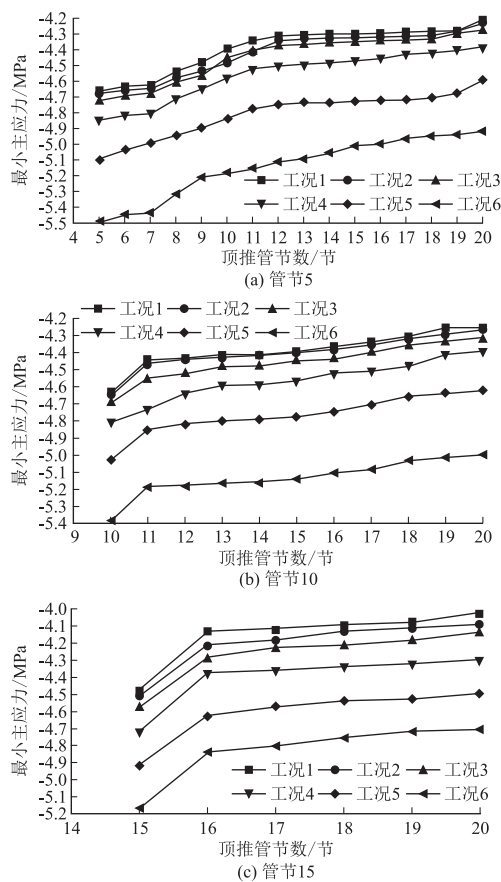


图8 管节最小主应力图

增加了 0.024 MPa、0.066 MPa、0.189 MPa、0.440 MPa 和 0.838 MPa;对于管节 10 来说,工况 2~工况 6 的最小主应力最大值分别增加了 0.010 MPa、0.054 MPa、0.173 MPa、0.385 MPa 和 0.748 MPa;对于管节 15 来说,工况 2~工况 6 的最小主应力最大值分别增加了 0.030 MPa、0.015 MPa、0.246 MPa、0.442 MPa 和

0.699 MPa。这是因为顶管工程施工的进行,顶管所受顶推力的影响逐渐降低,其自身应力逐渐趋于平衡。

3.3 剪应力分析

提取模型计算结果中各管节在隧道正常顶进施工过程中处于不同位置时管节的剪应力云图,如图 9 所示(以各工况管节 10 初始顶推时为例)。

由图 9 可知,在管节顶管施工过程中,当顶进管节数相同时,不同工况的剪应力随着管节所受不均匀推力比例的变化(C 区增加,A 区减少)而增加。提取各管节云图的剪应力,绘制出顶推管节数与剪力的关系如图 10 所示。

由图 10 可知,与工况 1(均匀顶推力)相比,工况 2~工况 6(非均匀顶推力)的剪应力随着 A 区(减小)和 C 区(增加)所受不均匀推力比例的增加而增加,各工况管节剪应力的最大值均出现在首次顶推管节,同一工况下先推管节剪应力的最大值均高于后顶推管节剪应力的最大值,随着管节顶推数的增加剪应力逐渐减小并趋于平缓。工况 1 中管节 5、管节 10 和管节 15 的剪应力最大值分别为 4.654 MPa、4.283 MPa 和 4.049 MPa,与工况 1(均匀顶推力)相比,工况 2~工况 6(非均匀顶推力)的剪应力均有提升。对于管节 5 来说,与工况 1 相比,随着非均匀顶推力不断增加,工况 2~工况 6 的剪应力最大值分别增加了 0.709%、2.084%、4.491%、7.735% 和 13.193%;对于管节 10 来说,工况 2~工况 6 的最大主应力最大值分别增加了 1.237%、3.199%、6.304%、10.810% 和 16.694%;对于管节 15 来说,工况 2~工况 6 的最大主应力最大值分别增加了 0.988%、2.713%、5.656%、9.434% 和 15.683%。随着 A 区与 C 区所受不均匀推力比例的增加,工况 2~工况 6 剪应

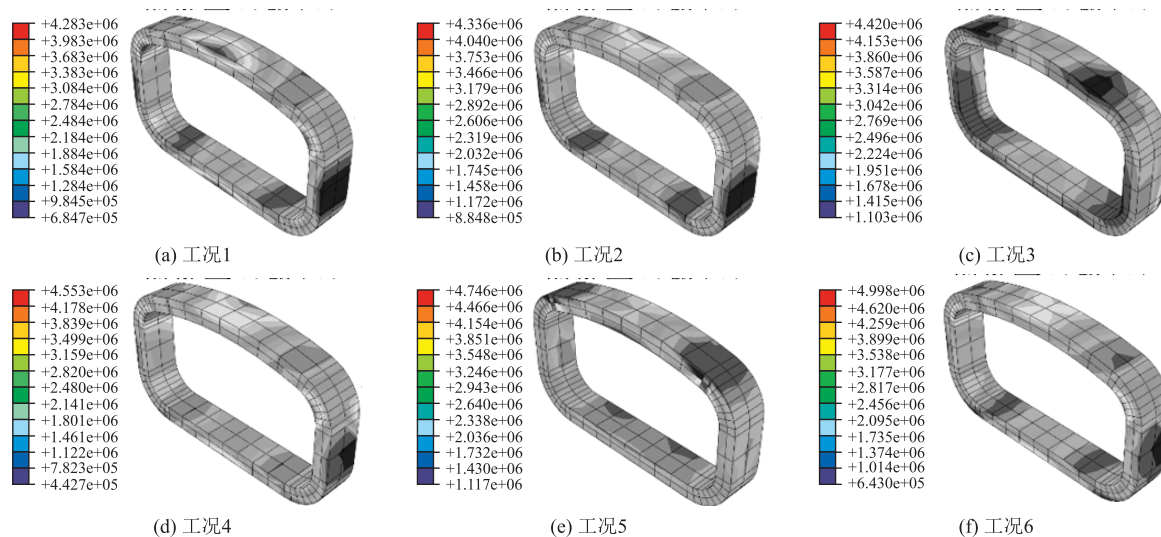


图9 剪应力云图(MPa)

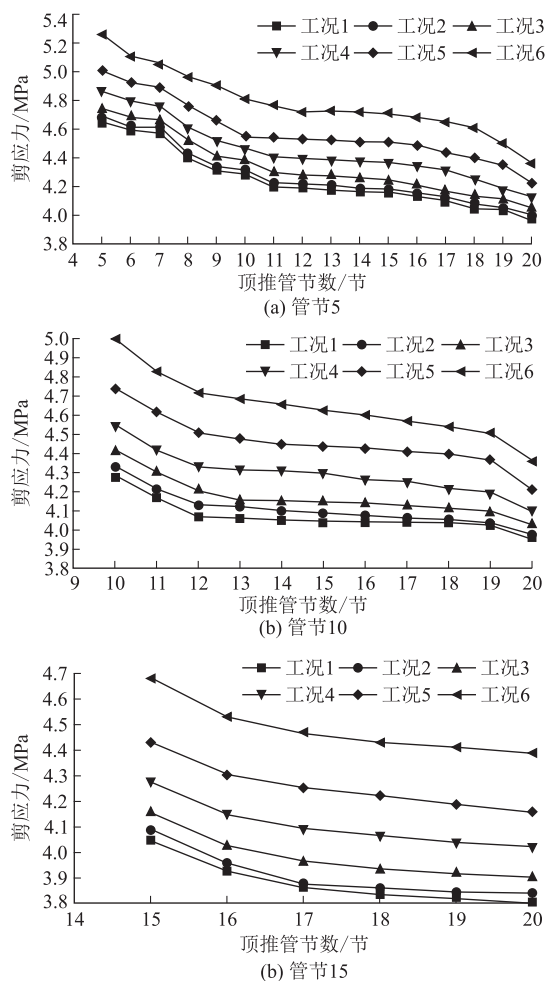


图10 管节剪应力

力增加比例逐渐上升。

实际工程中,管节剪应力的增加会导致管节内应力分布的不均匀性增加,导致某些区域应力集中出现剪切破坏,进行引发管节出现裂缝或破损,降低管节承

载力和使用寿命。

4 结论

(1)在非均匀顶推力作用下,管节最大主应力、最小主应力主要集中在仰拱、拱底内部和左拱肩、右拱肩外部附近;剪应力主要集中在仰拱、拱底外部和左拱肩、右拱肩内部附近。

(2)各管节最大主应力、最小主应力和剪应力最大值出现在初始顶推时,随着关节所承受不均匀顶推力(C区顶推力增加,A区顶推力减小)的逐渐增加,同一工况同一管节的最大主应力、最小主应力和剪应力也随之增加。

(3)随着顶进管节数量的增加,管节的最大主应力随之增加,但最小主应力和剪应力则出现减小并趋于平缓。

参考文献:

- [1] 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 Dingwen, LIU Songyu, 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.
- [2] 荣亮,杨红军. 郑州市下穿中州大道超大断面矩形隧道顶管姿态控制技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1097-1102.
RONG Liang, YANG Hongjun. Attitude Control Technology for Super-large Cross-section Rectangular Pipe-jacking Machine: Case Study on Tunneling Crossing underneath Zhongzhou Avenue in Zhengzhou[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(10): 1097-1102.
- [3] 刘永辉,李明宇,吕聪,等. 浅覆土矩形顶管施工中地面沉降变化规律及分布特征研究[J]. 建筑技术, 2020, 51(2): 226-

- 229.
- LIU Yonghui, LI Mingyu, LYU Cong, et al. Study on Law and Distribution Characteristics of Ground Settlement used by Construction of shallow-overburden Rectangular Pipe Jacking [J]. Architecture Technology, 2020, 51(2): 226–229.
- [4] 孙宇赫. 顶管施工岩土环境效应监测与控制技术研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- SUN Yuhe. Study on Monitoring and Control Technology of Geotechnical Environmental Effect in Pipe Jacking Construction[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [5] 屈克军. 考虑流固耦合效应的浅埋矩形顶管隧道开挖稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 2055–2062.
- QU Kejun. Face Stability Analysis of Shallow Rectangular Pipe Jacking Tunnel Considering Fluid-solid Coupling Effect [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 2055–2062.
- [6] 王素伟. 特大管径长距离机械顶管施工技术应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- WANG Suwei. Study on Application of Construction Technology of Long-distance Mechanical Pipe Jacking with Extra-large Diameter [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [7] 陈楠. 复杂环境中大直径钢顶管的受力特性研究[D]. 上海交通大学, 2012.
- CHEN Nan. Research on Force Characteristics of Large Diameter Steel Roof Pipe in Complex Environment [D]. Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [8] 王明胜, 刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 182–189.
- WANG Mingsheng, LIU Dagang. Test of Thixotropic Slurry Properties and Study of Resistance-reducing Technology for Pipe Jacking Tunnel Construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182–189.
- [9] 刘招伟, 杨朝帅. 矩形顶管隧道施工中触变泥浆套形成规律及减阻效果试验[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 568–576.
- LIU ZhaoWei, YANG ZhaoShuai. Forming Law of Thixotropic Mud Holster and Test of Reducing Resistance Effect in Rectangular Pipe Jacking Tunnel Construction [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(4): 568–576.
- [10] 胡新朋. 大断面矩形混凝土顶管隧道管节接头结构研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 65–68.
- HU Xinpeng. Study on Segment Joint Structure of Concrete Pipe Jacking Tunnel with Large Rectangular Section [J]. Railway Engineering, 2017, 57(8): 65–68.
- [11] ZHANG W X, De Corte W, Liu X, et al. Optimization Study on Longitudinal Joints in Quasi-rectangular Shield Tunnels[J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(2): 11020573.
- [12] 申昊冲, 王欣杰, 李翀, 等. 超大断面类矩形钢顶管纵向接头优化及受弯性能分析[J]. 铁道建筑, 2022, 62(5): 123–127.
- SHEN HaoChong, WANG Xinjie, LI Chong, et al. Optimization and Bending Performance Analysis of Longitudinal Joint of Large Section Rectangular Steel Pipe-jacking [J]. Railway Engineering, 2022, 62(5): 123–127.
- [13] XUE, ZHOU, Shunhua, et al. Evaluation and Experimental Study on the Sealant Behaviour of Double Gaskets for Shield Tunnel Lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75(5): 81–89.
- [14] 王湛. 水下盾构隧道弹性密封垫防水失效数值模拟研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1164–1168.
- WANG Zhan. Numerical Study on Waterproof Failure Mechanism of Elastic Sealing Gasket of Underwater Shield-bored Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(11): 1164–1168.
- [15] 周仲贺, 王俊澎. 大断面矩形顶管隧道管节角部新型连接施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(12): 2032–2039.
- ZHOU Zhonghe, WANG Junpeng. Progressive Construction Technology for Corner Connection of Large Cross-section Rectangular Pipe Jacking Segment [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(12): 2032–2039.
- [16] 刘顺水. 软弱地层下穿高铁超大矩形顶管盾构隧道施工稳定性研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 6–12.
- LIU Shunshui. A Study on Stability of Super-large Rectangular Pipe-jacking Shield Tunnel for High-speed Railway Underpassing Soft Ground[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 6–12.
- [17] 刘朝钦. 软弱地层超大矩形顶管盾构隧道开挖面稳定性研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 36–40.
- LIU Chaoqin. Study on Stability of Excavation Face of Super-large Rectangular Pipe-jacking Shield Tunnel in Soft Ground [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 36–40.

(上接第77页)

- DS SOLIDWORKS Corporation, CHEN Chaoxiang, HU Qideng. SOLIDWORKS Sheet Metal and Welding Tutorial: 2019 Edition [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [7] DS SOLIDWORKS 公司, 戴瑞华, 杭州新迪数字工程系统有限公司. SOLIDWORKS 零件与装配体教程(2022版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- DS SOLIDWORKS Corporation, DAI Ruihua, Hangzhou Xindi Digital Engineering Systems Co., Ltd. SOLIDWORKS Parts and Assemblies Tutorial: 2022 Edition [M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [8] DS SOLIDWORKS 公司. SOLIDWORKS 二次开发与 API 教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- DS SOLIDWORKS Corporation. SOLIDWORKS Secondary Development and API Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [9] 方宜, 卓建成, 杜梦飞. 数字孪生在轨道交通智能建造业中的应用发展[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(1): 68–73, 78.
- FANG Yi, ZHUO Jiancheng, DU Mengfei. Application and Development of Digital Twin in Intelligent Construction of Rail Transit [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1): 68–73, 78.