

# 曲线盾构隧道施工期管片破损机理研究

朱 斌

(中铁二十一局集团轨道交通工程有限公司, 250117, 济南)

**摘 要** [目的] 盾构隧道管片破损会引起隧道渗水, 会影响结构承载力, 危及运营安全, 故有必要对管片结构破损的机理展开研究。[方法] 通过调研统计得出管片病害的发生规律和影响因素, 采用 ABAQUS 软件对不同千斤顶水平推力下管片细部结构、环向螺栓、纵向螺栓以及凹凸榫的受力特征进行数值分析。[结果及结论] 管片破损病害发生率自拱顶至拱腰再到拱底逐渐增大, 拱底区破损病害发生率最高; 管片破损与千斤顶分区推力大小关系密切。数值模拟结果表明: 随着总推力值的增大, 螺栓最大主应力值逐渐减小, 凹凸榫处最大主应力会迅速增加; 推力越大, 纵向螺栓应力值则越小; 当推力过大时, 纵向螺栓拉应力趋于 0, 管片纵向收缩, 管片受到的压力急剧增大。

**关键词** 曲线盾构隧道; 管片破损; 调研统计; 千斤顶推力; 有限元模拟

**中图分类号** U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.10.020

## Study on the Segment Damage Mechanism of Curved Shield Tunnels during Construction Stage

ZHU Bin

(China Railway 21st Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., 250117, Jinan, China)

**Abstract** [Objective] Damage to shield tunnel segments will cause water seepage in the tunnel, affecting the structural bearing capacity and endanger the operational safety. Therefore, it is necessary to study the mechanism of segment structure damage. [Method] Through investigation and statistics, the occurrence law and influencing factors of segment diseases are obtained. ABAQUS software is used to conduct a numerical analysis on the force characteristics of segment detail structure, circumferential bolts, longitudinal bolts and concave-convex tenons under different jack horizontal thrusts. [Result & Conclusion] The incidence of segment damage increases gradually from vault to hance and then to arch bottom, and the incidence of damage in arch bottom area is the highest. The segment damage is closely related to the thrust value of the jack partitions. Numerical simulation results show that with the increase of the total thrust value, the maximum principal stress

value of the bolt decreases gradually, while the value at the concave-convex tenon increases rapidly. The greater the thrust, the smaller the longitudinal bolt stress value. When the thrust is too large, the longitudinal bolt tensile stress tends to 0, the segment shrinks longitudinally, and the pressure on the segment increases sharply.

**Key words** curved shield tunnel; segment damage; investigation and statistics; jack thrust; finite element simulation

管片破损会引起隧道渗水, 产生长期耐久性问题, 甚至会影响结构承载力危及运营安全。国内外有众多学者通过试验和数值计算, 研究了盾构隧道管片开裂行为。文献[1]通过现场试验对管片的力学行为进行了研究。文献[2]分析了注浆压力、盾构推力和盾壳挤压力作用下的管片变形和应力规律。文献[3]认为施工期管片破损主要与盾构推力、倾角及偏差相关。文献[4-5]研究了管片结构的受力特性, 提出了不同破坏形式下管片结构的劣化规律。文献[6]对小半径曲线隧道施工中土体位移和管片内力的变化规律进行了研究。文献[7]研究了不同工序与曲率半径下新建曲线盾构隧道对既有隧道变形的影响。文献[8]对管片结构的受力和塑性变形进行了研究, 分析了因地层损失而导致不同椭圆度变形情况下管片结构的受力规律。

本文基于对某曲线盾构隧道管片破损情况的调研, 运用 ABAQUS 软件建立 3 环管片的精细化模型, 采用荷载结构法开展管片结构的数值模拟计算, 对不同千斤顶推力水平下管片细部结构、环向螺栓、纵向螺栓以及凹凸榫的受力特征进行研究。

## 1 工程背景

某盾构隧道为双洞单线隧道。区间盾构段设计里程为 DK7 + 320.000—DK7 + 946.113, 线路左、右线的最小曲线半径分别约为 451 m、448 m, 最大纵坡为 26.56‰。

该区间采用直径为 8.8 m 的土压平衡盾构, 盾

构推进系统包括 19 组千斤顶油缸,每组千斤顶作用在管片端面上的位置与纵向螺栓孔的点位一一对应。同样地,将纵向螺栓孔的点位按油缸组号进行标记,分为 1—19 号螺栓点位,千斤顶分为 A—F 组,对应的管片也被分为 A—F 区,EF 侧为掘进方向向外侧,如图 1 所示。钢筋混凝土管片外径为 8 500 mm,厚为 400 mm,宽为 1 600 mm,混凝土强度等级 C55,抗渗等级 P12,管片采用 7 分块方式(4 片标准块 B1、B2、B3、B4,2 片邻接块 L1、L2,1 片封顶块 F)。

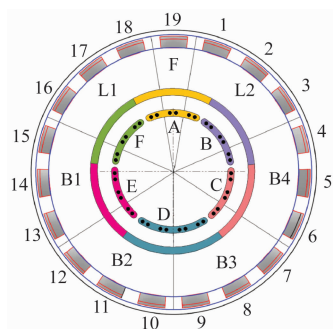


图 1 推进油缸及千斤顶分区

Fig. 1 Propulsion cylinders and jack partition areas

## 2 管片破损现场调研分析

管片破损多见于螺栓手孔处,破损边缘表现为压碎状;压溃严重时,管片表面会发生剥落和掉块,根据管片压溃范围和压溃深度的不同,将破损分成 PS- I、PS- II、PS- III 三类情况进行统计。管片破损分类及判别标准见表 1,不同分类情形下管片破损情况见图 2。

表 1 管片破损分类及判别标准

Tab. 1 Grades and identification criteria of shield tunne segment damages

破损分类	破损程度	判别标准
PS- I	轻微破损	压溃范围小于 20 cm × 20 cm,或压溃深度不大于 1.5 cm
PS- II	中度破损	压溃范围介于 20 cm × 20 cm ~ 30 cm × 30 cm,或压溃深度介于 1.5 ~ 2.5 cm
PS- III	严重破损	压溃范围大于 30 cm × 30 cm,或压溃深度大于 2.5 cm,钢筋外露

管片螺栓处点位破损发生率的统计结果见图 3。破损率可反映出管片对于盾构施工参数相对更为敏感的螺栓处点位。其中,11 号点位处的管片轻微破损率、中度破损率和严重破损率最高,分别为 11.1%、18.2% 和 6.3%;15 号点位处的管片轻微破

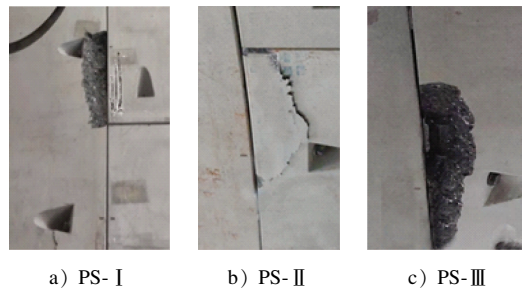


图 2 不同分类等级下管片破损图

Fig. 2 Segment damage diagrams at different grades

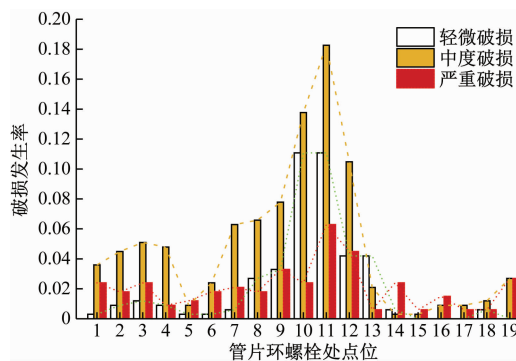


图 3 不同点位处的管片破损率

Fig. 3 Segment damage rate at different points

损率、中度破损率和严重破损率最低,分别为 0%、0.3% 和 0.6%。总体而言,11 号点位破碎累积率最高(35.6%),15 号点位破碎累积率最低(0.9%);轻微、中度和严重破损率随环向螺栓点位的变化趋势相同,螺栓点位破损率从拱顶至拱腰再到拱底逐渐增大,其中拱底区破损发生率最高。

管片螺栓处点位破损的发生率呈现出显著的区域分布特征。具体而言,相同分区内的点位破损累积率较为接近,而不同分区间的累积率则存在显著差异。这种区域分布特征与管片千斤顶的分区特征相吻合,从而暗示了管片破损的发生与千斤顶分区推力之间存在着密切关系。

由管片环千斤顶处区位破损发生率的统计结果可以看出(见图 4):D 区的管片轻微破损率、中度破损率和严重破损率最高,分别为 6.3%、10.8% 和 5.4%;F 区的管片轻微破损率、中度破损率和严重破损率最低,分别为 0%、0.6% 和 2.4%;总体而言,D 区的破损累积率最高(22.5%);F 区的破损累积率最低(3.0%);三类破损情况沿区位的破损率变化趋势都相同,均从拱顶至腰部再到拱底区表现为破损率逐渐增大的过程,且底部区破损发生的概率最高。这与管片环螺栓处点位破损率统计的规律相同。其中 B 区(右上拱腰)与 E 区(左下拱腰)的

区位破损率要远远大于 C 区(右下拱腰)与 F 区(左上拱腰)的区位破损率,这表明管片 B、E 分区对盾构施工参数更为敏感,同时这与该处盾构掘进路线为右转弯曲线隧道区间关系密切。

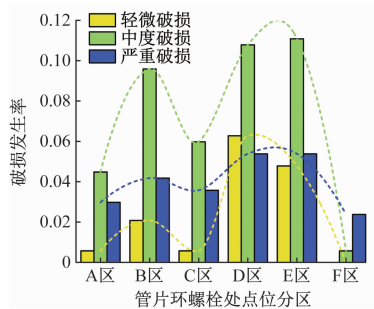


图 4 不同区的管片破损率  
Fig. 4 Segment damage rate in different areas

3 施工期管片的受力机理研究

现场调研发现,千斤顶推力作为施加在管片上的最大外力,不同推力条件下的管片受力存在差异,施工中分区推力的控制与管片破损病害关系密切。本节通过 ABAQUS 软件建立 3 环管片的精细化模型,对不同千斤顶推力水平下管片细部结构、环向螺栓、纵向螺栓以及凹凸榫的受力特征进行数值分析。

3.1 模型概况

以盾构管片为模拟对象,将其视为理想弹塑性材料,并采用 C3D8R 型和 C3D6 型等实体单元对管片进行模拟。同时,螺栓也被视为理想弹塑性材料,并采用 B31 梁单元进行模拟。为反映施工中管片与管片间的相互作用,选取 3 环管片(1.6 m×3)构建管片模型。其中,前 2 环管片(靠近千斤顶)位于盾构机盾壳内,因此不考虑水土压力荷载,后 1 环为整环结构,对其进行受力性能分析。盾构管片三维模型如图 5 所示。

在模型中,管片与千斤顶之间采用面-面接触(硬接触)关系,而管片与管片之间采用线性接触。螺栓嵌入到管片中。模型边界条件对管片千斤顶接触端不施加约束,使其为自由端;对第三环管片施加 z 方向的约束,并在其端面相对于圆环中心施加连续分布式铰接约束,以确保管片端面只能在 x、y 平面内发生位移;而转动自由度被限制。第一环和第二环管片由于位于盾壳内考虑,其地层压力由盾壳承担。目标分析环为第三环,模型荷载施加示意图如图 6 所示。

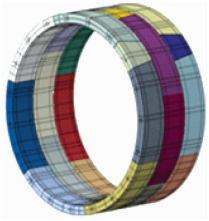


图 5 盾构隧道管片模型  
Fig. 5 Shield tunnel segment model

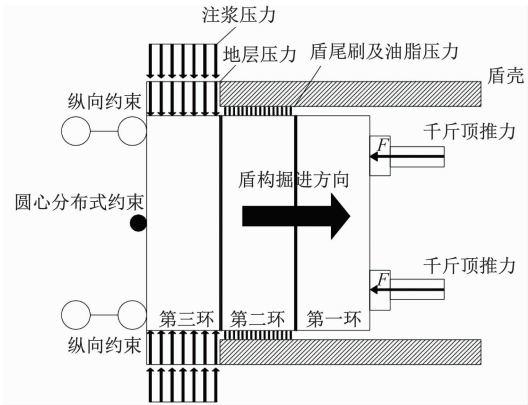


图 6 模型荷载施加示意图  
Fig. 6 Model load application diagram

模型各参数按工程中实际物理力学参数选取,见表 2。

表 2 模型相关的物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters related to the model					
模型结构	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	泊松比	弹性模量/ GPa	接触	
				法向刚度/ ( $\text{MN}/\text{m}^3$ )	切向摩擦 因数
斜螺栓	7 800	0.29	206		
管片	2 600	0.2	35.5		
管片界面				365 000	0.55

3.2 荷载施加及工况设置

如图 6 所示,模型所考虑的荷载主要包括地层压力、注浆压力、盾尾刷及油脂压力及千斤顶推力;注浆压力为 0.2 MPa 的均匀压力,盾尾刷及油脂压力为 0.4 MPa 的均匀压力。地层压力计算以本文中依托工程盾构区间的地质条件作为计算参数,计算区间为超浅埋隧道,采用全覆土土压力进行围岩压力计算,水土压力计算采用水土分算,将相关的各项参数代入计算得:顶部垂直土压力  $P_1$  为 146.15 kN/m<sup>2</sup>;底部抗力  $P_2$  为 178.82 kN/m<sup>2</sup>;顶部侧压力  $q_1$  为 58.46 kN/m<sup>2</sup>;底部侧压力  $q_2$  为 91.44 kN/m<sup>2</sup>。



为了研究在不同千斤顶总推力下管片结构的受力特征,不考虑千斤顶偏角影响,将千斤顶分区推力均匀度取为实际掘进中的均值水平(0.33),总推力分别为 2 922 kN、5 843 kN、11 686 kN、23 373 kN、46 746 kN 和 93 492 kN 六种情形下的工况,各工况下的千斤顶分区推力见表 3。

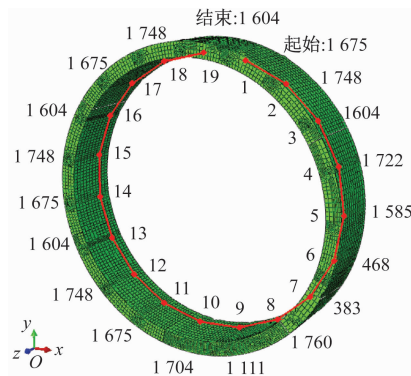
表 3 各工况下的千斤顶分区推力

Tab.3 Thrust of jack partition under various working conditions

工况	总推力/ kN	不同分区千斤顶推力大小/(kN/m <sup>2</sup> )					
		A	B	C	D	E	F
工况 1	2 922	788	525	525	1 050	700	700
工况 2	5 843	3 150	2 100	2 100	4 200	2 800	2 800
工况 3	11 686	6 300	4 200	4 200	8 400	5 600	5 600
工况 4	23 373	12 600	8 400	8 400	16 800	11 200	11 200
工况 5	46 746	25 200	16 800	16 800	33 600	22 400	22 400
工况 6	93 492	50 400	33 600	33 600	67 200	44 800	44 800

### 3.3 千斤顶推力对管片受力的影响分析

对不同总推力工况下管片的最大主应力进行分析,创建目标分析环(第三环)内表面节点应力提取的路径,图中 1-19 号分别对应纵向螺栓分布的点位,如图 7。提取管片环最大主应力数据并绘制不同推力下管片纵向螺栓点位的最大主应力影响图,如图 8。



注:圈内数字为点位;圈外数字为模型节点编号。

图 7 管片应力提取路径

Fig. 7 Segment stress extraction path

从图 8 可以看出,管片内环表面左侧与右侧的最大主应力呈现对称分布,对比 6 号与 15 号点位发现,左侧拱腰内环表面的最大主应力值稍大于右侧拱腰内环表面的最大主应力值,可能原因是左侧分区推力要稍大于右侧分区推力。另外,最大主应力的最大值位于 1 号点位,最小值位于 6 号点位,从拱

顶到拱腰再到拱底,管片内环表面最大主应力值变化是一个由大变小再增大的过程。

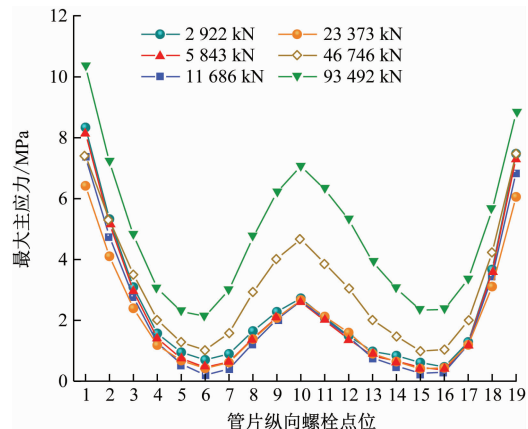


图 8 纵向螺栓处的管片最大主应力

Fig. 8 Maximum principal stress of segments at the longitudinal bolt

在不同的推力工况下,随着推力的增大,各点位处的最大主应力变化呈现先减小后增大的趋势,在拱腰(6、15)、拱顶(1、19)和拱底(10)处趋势表现明显。以拱腰(6 号点位)为例进行说明:当总推力从 2 922 kN 增大至 11 686 kN 时,最大主应力由 0.70 MPa 降低至 0.20 MPa;当总推力从 11 686 kN 再增大至 93 492 kN 时,最大主应力由 0.20 MPa 增加至 2.13 MPa。这表明推力控制在合适水平时,可减小第三环所受到的最大主应力,这个时候推力给管片提供了纵向的约束,有利于管片结构的受力;但当推力过大时,管片所受到的最大主应力会急剧增大,这时推力有可能造成管片结构的压碎。

### 3.4 千斤顶推力对螺栓受力的影响分析

#### 3.4.1 环向螺栓受力分析

随着总推力值的增大,螺栓最大主应力值逐渐减小;推力 11 686 kN 时,相对推力 2 922 kN 条件下最大主应力最值减小了 0.78%,减小的趋势不是很大;推力为 46 746 kN 时最大主应力最值减小了 6.9%;推力 93 492 kN 时最大主应力最值则减小了 17.2%;由此可见总推力越大,环向螺栓应力减小的幅度也随着变大,在盾构掘进过程中应尽量控制推力的稳定,且不宜过大,减少螺栓应力的波动,避免螺栓松弛引起管片间发生位移。环向螺栓最大主应力-推力变化图见图 9。

#### 3.4.2 纵向螺栓受力分析

图 10 为纵向螺栓最大主应力-推力变化图。由图 10 可知:随着总推力值的增大,螺栓最大主应力

值逐渐减小到趋于 0; 推力 2 922 ~ 46 746 kN 时, 最大主应力下降的趋势接近一条斜线, 推力 46 746 ~ 93 492 kN 时, 最大主应力接近一条趋于水平的直线。由此可见, 当推力较小时 (小于 46 746 kN), 纵向螺栓应力值与总推力呈现出反比关系, 推力越大, 纵向螺栓应力值则越小; 当推力过大时 (大于 46 746 kN), 导致管片纵向收缩, 此时螺栓不受拉, 管片受到的压力会急剧增大。

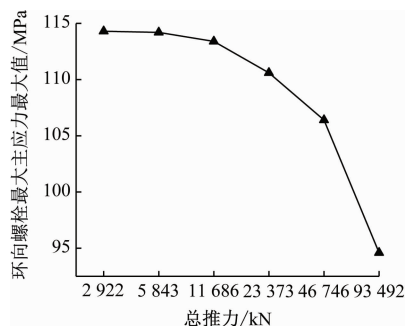


图 9 环向螺栓最大主应力-推力变化图

Fig. 9 Maximum principal stress-thrust variation diagram of the circumferential bolt

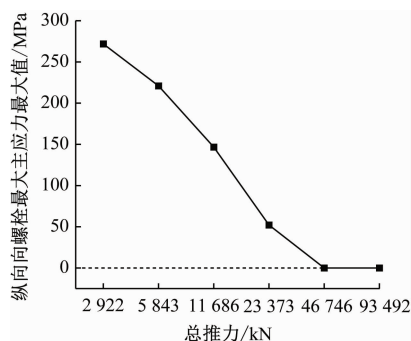


图 10 纵向螺栓最大主应力-推力变化图

Fig. 10 Maximum principal stress-thrust variation diagram of the longitudinal bolt

### 3.5 千斤顶对凹凸榫受力的影响分析

通过对纵向螺栓应力的分析, 当推力小于 46 746 kN 时, 纵向螺栓的最大主应力最值出现的位置都在右拱腰处 (6 号点位), 因此该点位处容易导致凹凸榫产生应力集中, 提取该点位处的管片进行凹凸榫应力分析, 得到在不同推力工况下管片凹凸榫的最大主应力云图见图 11。

在不同推力工况下, 管片凹凸榫处都出现了明显的应力集中现象。取管片 6、7、8 号点位处最大主应力的平均值作为该块管片的最大主应力均值, 并将各工况下管片凹凸榫处最大主应力最值与管片最大主应力均值进行对比, 如图 12 所示。

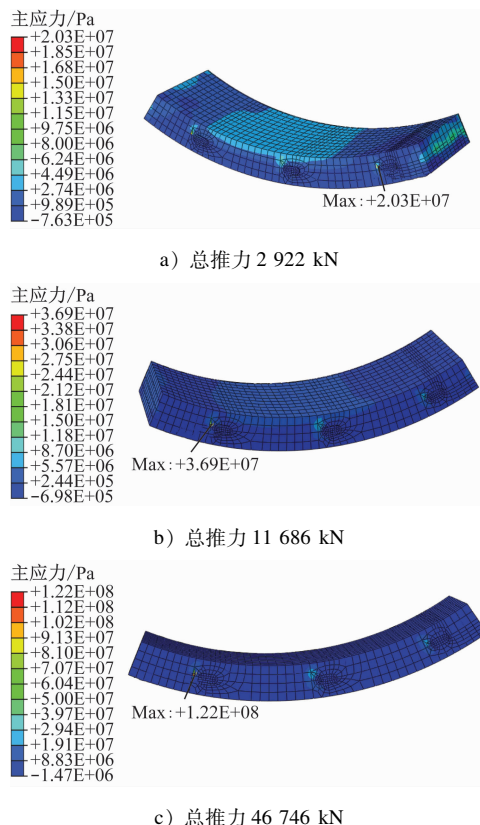


图 11 管片凹凸榫处的最大主应力云图截图

Fig. 11 Screenshot of the maximum principal stress nephogram at the tenons segment concave-convex

从图 12 中可以看出: 管片最大主应力均值在 1.0 ~ 4.6 MPa 范围, 凹凸榫最大主应力最值在 20.3 ~ 242.0 MPa 范围; 随着盾构推力的增大, 凹凸榫最大主应力增大幅度越大; 推力小于 23 373 kN 时, 管片平均最大主应力随推力的波动并不明显, 但当推力大于 23 373 kN 时, 管片平均最大主应力的增加趋势与凹凸榫最大主应力的增幅一致。由此可见: 凹凸榫是管片结构中的薄弱环节, 其受到的最大主应力为管片的近 10 ~ 50 倍, 当推力过大时, 凹凸榫处最大主应力会迅速增加, 极易造成凹凸榫附近混凝土被破坏。

## 4 结语

本文基于对某曲线盾构隧道管片破损情况的调研, 运用 ABAQUS 软件建立了 3 环盾构管片的精细化模型, 对不同千斤顶总推力条件下的管片细部结构、环向螺栓、纵向螺栓以及凹凸榫的受力特征进行了数值模拟计算, 得到主要结论如下:

1) 管片破损病害发生率自拱顶至拱腰再到拱底逐渐增大, 拱底区破损病害发生率最高; 将管片

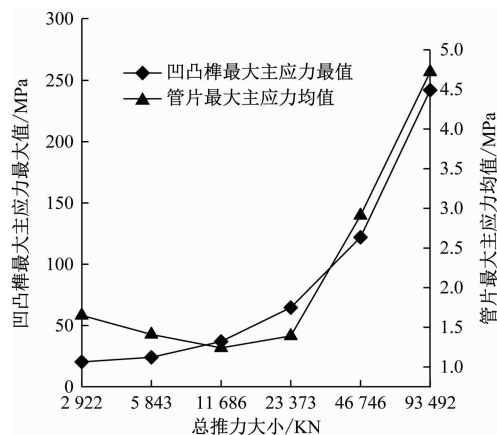


图12 管片及凹凸榫最大主应力-推力变化图

Fig. 12 Maximum principal stress-thrust variation diagram of the segment and the concave-convex tenon

纵向螺栓分布依照千斤顶分区情况划分为6个区,现场调研发现管片破损病害发生率呈现出一定的区域分布特征,同一分区内各螺栓处点位的病害发生率相对接近,不同分区内病害发生率则相差较大,施工期管片病害的发生与千斤顶分区推力关系密切。

2) 按照管片纵向螺栓分区来看,B区(右上拱腰)与E区(左下拱腰)的破损发生率远大于C区(右下拱腰)与F区(左上拱腰),右转弯曲线掘进中盾构施工参数对管片B、E分区带来的影响更大。

3) 不同推力大小对螺栓点位处应力有影响。随着推力的增大,螺栓点位处的最大主应力变化呈现先减小后增大的趋势,当推力控制在合适水平时,可减小管片所受到的最大主应力;但当推力过大时,管片所受到的最大主应力会急剧增大,这时推力有可能造成管片结构的压碎。

4) 随着总推力值的增大,螺栓最大主应力值逐渐减小;总推力越大,环向螺栓应力减小的幅度也越大。在盾构掘进过程中应尽量控制推力的稳定,尽量减少螺栓应力的波动,避免螺栓应力松弛导致管片间发生位移。

5) 在推力较小时,纵向螺栓应力值与总推力呈现出反比关系,推力越大,纵向螺栓应力值则越小;当推力过大时,此时纵向螺栓拉应力趋于0,管片纵向收缩,管片受到的压力会急剧增大。

6) 凹凸榫受到的最大主应力为管片的近10~50倍,当推力过大时,凹凸榫处最大主应力会迅速增加,凹凸榫附近混凝土最易发生破坏。

## 参考文献

- [1] 王明年,黄海斌,曹金文,等. 大直径盾构管片在盾壳内的力学行为实测分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 175.  
WANG Mingnian, HUANG Haibin, CAO Jinwen, et al. Field tests on mechanical behavior of segmental linings inside shell of large diameter shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 175.
- [2] 陈俊生,莫海鸿. 盾构隧道管片施工阶段力学行为的三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3482.  
CHEN Junsheng, MO Haihong. Three-dimensional finite element analysis of mechanical behavior of shield tunnel segment during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3482.
- [3] 宋克志,袁大军,王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 619.  
SONG Kezhi, YUAN Dajun, WANG Mengshu. Segmental mechanical analysis of shield tunnel during construction stage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 619.
- [4] 卢岱岳,苏昂,何川,等. 新建盾构隧道纵向裂纹病害规律统计与数值分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10): 135.  
LU Daiyue, SU Ang, HE Chuan, et al. Statistical and numerical analysis of longitudinal crack damage in new-built shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10): 135.
- [5] 何川,张建刚,杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 85.  
HE Chuan, ZHANG Jiangang, YANG Zheng. Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the Wuhan Yangtze River tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 85.
- [6] 苏文渊. 小曲率半径转弯段盾构施工隧道特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
SU Wenyuan. Study on the characteristics of shield tunnel turning segment with small curvature radius[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [7] 邓碧,张俊伟,诸葛绪松,等. 软土地层并行曲线隧道施工顺序对既有隧道的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 170.  
DENG Bi, ZHANG Junwei, ZHUGE Xusong, et al. Influence of construction sequence of parallel curved tunnels on existing tunnels in soft soil stratum[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 170.
- [8] 丁小彬,韩东霖. 运营盾构隧道不同椭圆度变形情况下受力性能分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 141.  
DING Xiaobin, HAN Donglin. Analysis of mechanical performance of operational shield tunnels under different ovality deformations[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 141.

· 收稿日期:2023-07-30 修回日期:2023-09-28 出版日期:2024-10-10  
Received:2023-07-30 Revised:2023-09-28 Published:2024-10-10  
· 通信作者:朱斌,高级工程师,50093737@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license