

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.09.014

# 超大直径盾构隧道接头抗弯性能 影响因素研究

何历超<sup>1</sup>, 姜瑜<sup>1,2</sup>

(1. 北京市首发高速公路建设管理有限责任公司, 北京 100161; 2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084)

**摘要:** 为研究超大直径盾构隧道接头抗弯性能及其影响因素, 依托北京东六环改造工程, 通过 ABAQUS 有限元软件建立管片-接头三维精细化数值模型, 充分考虑材料非线性和衬砌结构局部几何特征, 开展不同条件下的超大直径盾构隧道接头抗弯性能数值模拟研究。通过设置多组压弯荷载组合工况, 对比分析了不同轴力、斜螺栓角度和螺栓预紧力条件下接头抗弯刚度和极限承载力的变化规律, 得到了接头转角与抗弯强度的对应关系, 揭示了不同因素对接头抗弯性能的影响趋势, 分析了螺栓接头沿长度方向的应力分布特征。结果表明: 超大直径盾构隧道接头的弯矩-转角曲线大致可分为 3 个阶段, 即快速上升段、平稳增长段和下降段。随着轴力的增大, 接头的抗弯刚度呈现增长趋势, 且轴力较小时增速较快; 接头的极限抗弯承载力也与轴力呈正相关, 增加轴力可大幅提升接头极限抗弯强度; 随着斜螺栓角度的增加, 接头抗弯刚度表现为先增后减的变化趋势。当斜螺栓角度为 56° 时, 接头的抗弯刚度最大。随着斜螺栓角度的增大, 管片接头的极限抗弯承载力在不断提高; 螺栓预紧力对接头的极限抗弯承载力影响较小, 但对接头抗弯刚度存在显著影响; 接头连接螺栓在接缝面附近位置表现出一定程度的应力集中, 其余位置应力相对较小。

**关键词:** 隧道工程; 抗弯性能; 数值模拟; 盾构隧道; 超大直径

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 09-0110-06

## Study on Influencing Factors of Bending Performance of Extra Large Diameter Shield Tunnel Joint

HE Li-chao<sup>1</sup>, JIANG Yu<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Shoufa Expressway Construction Management Co., Ltd., Beijing 100161, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** To study the bending performance of joints in extra large diameter shield tunnel and its influencing factors, a 3D refined numerical model of segment joints is established by ABAQUS finite element software based on the reconstruction project of Beijing East Sixth Ring Road, and the numerical simulation of bending performance of extra large diameter shield tunnel joints is carried out under different conditions considering the material nonlinearity and local geometric characteristics of lining structure. By setting multiple groups of bending load combination conditions, the variation rules of bending stiffness and ultimate bearing capacity of joints under different axial forces, inclined bolt angles and bolt preloads are compared and analyzed. The corresponding relationship between joint rotation angle and bending strength is obtained, the influence trend of different factors on the bending performance of joints is revealed, and the stress distribution characteristics of the bolted joints along the length direction are analyzed. The result shows that (1) The curve of bending moment vs. rotation angle of extra large diameter shield tunnel joints can be roughly divided into 3 stages,

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 北京市首都公路发展集团有限公司科研项目 (2021-4)

作者简介: 何历超 (1982-), 男, 博士研究生, 高级工程师. (helichao@bchd.com.cn)

namely, the fast rising stage, the steady growth stage, and the falling stage. With the increase of axial force, the bending stiffness of the joints shows an increasing trend, and the growth rate is faster when the axial force is small. (2) The ultimate bending capacity of the joints is also positively related to the axial force, increasing the axial force can greatly improve the ultimate flexural strength of the joints. (3) With the increase of inclined bolt angle, the bending stiffness of the joints shows the trend of first increasing and then decreasing. When the inclined bolt angle is  $56^\circ$ , the bending stiffness of the joints reaches the maximum value. With the increase of inclined bolt angle, the ultimate bending bearing capacity of segment joints is increasing. (4) The bolt preload has little influence on the ultimate bending capacity of the joints, but it has significant influence on the bending stiffness of the joints. (5) The connecting bolt of joints shows a certain degree of stress concentration near the joint surface, while the stresses at other positions are relatively small.

**Key words:** tunnel engineering; bending resistance; numerical simulation; shield tunnel; ultra-large diameter

## 0 引言

目前针对直径6 m左右的地铁隧道研究较多,管片接头力学特性更加明确。通过理论研究、试验研究及数值模拟分析,可以更好地了解接头的服役性能。其中,接头的极限承载力、刚度和非线性变形特征是研究人员重点关注的领域。Liu等<sup>[1-2]</sup>以盾构隧道管片纵向螺栓接头为研究对象,借助试验方法全面分析了隧道管片纵缝的破坏机理,并揭示了错缝拼装对结构的影响。周海鹰等<sup>[3]</sup>基于衬砌结构荷载试验,对影响接头抗弯刚度的主要因素进行分析,并建立纵向接头抗弯刚度计算模型。张稳军等<sup>[4-7]</sup>对螺栓形式、螺栓等级、螺栓预紧力等因素对盾构隧道接头力学性能和变形规律进行数值模拟研究。张景<sup>[8]</sup>以志波模型为基础,采用解析方法推导了纯弯、拉弯条件下环间接头抗弯刚度的解析公式,并对各影响因素的敏感程度及影响方式进行深入研究。Li等<sup>[9-10]</sup>采用三维有限元法研究分析伦敦地铁中螺栓铸铁隧道的受力特性,考虑了外部荷载、锚杆预紧力等实际工程因素下隧道行为,对实际工程具有一定的指导意义。

随着隧道断面尺寸的增大,管片厚度增大,接头数量增多,造成接缝面构造趋于复杂,材料非线性和几何非线性特征愈发明显<sup>[11]</sup>。因此,不少专家学者针对大断面盾构隧道接头进行了深入研究。张力等<sup>[12]</sup>对狮子洋隧道和长江隧道的管片接头抗弯刚度进行计算,并据此建立大断面隧道管片接头抗弯刚度取值经验公式。郑庆坂等<sup>[13]</sup>将横向刚度和纵向刚度联合起来,推导得到大断面矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度解析解,并对管片宽厚比、管片厚度等因素的影响进行了研究。张力等<sup>[14-17]</sup>结合理论分析、数值模拟和试验研究等多种方法分析了手孔及

螺栓数量及布设位置、尺寸等对管片接头抗弯性能及设计参数的影响。郑勇波等<sup>[18]</sup>探究了混凝土碳化深度对接头抗弯性能的不利影响。目前,小直径盾构隧道接头力学性能研究成果无法较好地适用于大直径盾构隧道,因此,大直径盾构隧道接头力学性能及影响因素研究是必要且具有意义的。

综上所述,目前针对管片接头力学性能的研究大多局限于小直径盾构隧道,而本研究依托北京东六环改造工程,通过ABAQUS有限元软件建立超大直径盾构隧道管片-接头三维精细化模型,对超大直径盾构隧道接头抗弯性能的影响因素进行研究。

## 1 工程概况

东六环改造工程起于京哈高速施园桥南2 km,终于潞苑北大街,全线长度16 km,采用明挖法与盾构法相结合的施工方法。其中,盾构段隧道内径14.1 m,衬砌厚度650 mm,环宽2 000 mm,属于超大直径盾构隧道。衬砌采用“1+2+7”式分块,错缝拼装。衬砌管片为C60钢筋混凝土,混凝土抗渗等级为P12。管片间采用斜螺栓连接,管片环向通过30颗M36螺栓,纵向通过56颗M36螺栓连接,螺栓等级为8.8级。

## 2 管片-接头三维精细化数值模型

以盾构隧道标准块为研究对象,建立管片-接头三维数值模型,如图1所示。管片内径为14 100 mm,厚度为650 mm,环宽2 000 mm,圆心角为 $38.57^\circ$ 。管片间通过3根8.8级M36斜螺栓连接,手孔采用左二右一等间距交错布置。为了便于收敛,忽略榫槽及密封垫的影响。

混凝土材料等级为C60,弹性模量为36.2 GPa,泊松比为0.2。混凝土采用塑性损伤本构模型,塑性

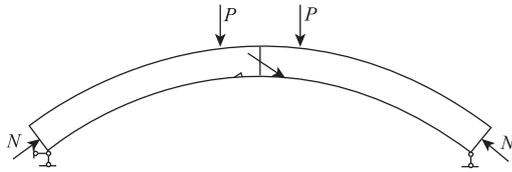


图 1 力学模型图

Fig. 1 Mechanical model

损伤本构通过引入损伤因子，能够较好地模拟混凝土材料刚度退化的现象<sup>[19]</sup>。以文献 [19] 的公式计算混凝土参数，混凝土计算参数如表 1 所示。螺栓采用双线性弹塑性本构，弹性模量采用 210 GPa。

表 1 C60 混凝土计算参数

Tab. 1 C60 concrete calculation parameters

压应力/ MPa	非弹性应变/ ( $\times 10^{-3}$ )	受压损伤 因子	拉应力/ MPa	非弹性应变/ ( $\times 10^{-3}$ )	受拉损伤 因子
33.53	0	0	2.850	0	0
35.95	0.327	0.102 8	2.725	0.050	0.062 2
37.57	0.458	0.133 2	2.277	0.086	0.119 1
38.50	0.698	0.185 9	1.875	0.120	0.186 7
34.12	1.350	0.332 6	1.257	0.194	0.357 1
23.21	2.536	0.579 2	0.944	0.260	0.497 8
14.44	4.017	0.778 1	0.449	0.560	0.817 8
11.10	4.993	0.850 1	0.331	0.792	0.896 0
4.42	10.481	0.967 6	0.178	1.711	0.971 9
3.12	14.051	0.982 7	0.143	2.285	0.982 9

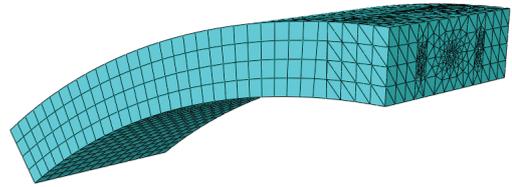
管片加载采用四点弯曲加载方式，左侧设置固定铰支座，右侧设置活动铰支座。管片两侧施加均布面力模拟轴力作用，竖向通过在管片上分割出小区域施加面力近似模拟集中力。接缝面附近施加竖向位移荷载，螺栓处施加预紧力。模型的边界条件及加载方式如图 1 所示。

管片与螺杆、管片与管片之间采用面-面接触关系，管片混凝土之间摩擦系数为 0.5，管片与螺杆间的摩擦系数为 0.46。单元设置为 C3D10。螺帽与混凝土之间采用 Tie 连接。图 2 为管片和螺栓的三维精细化模型。

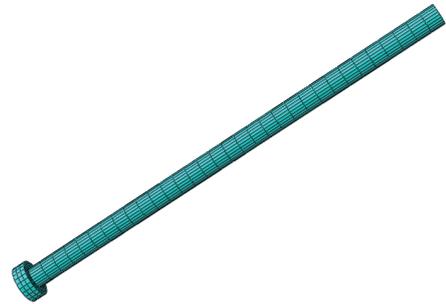
### 3 接头抗弯性能分析

#### 3.1 轴力对接头抗弯性能的影响

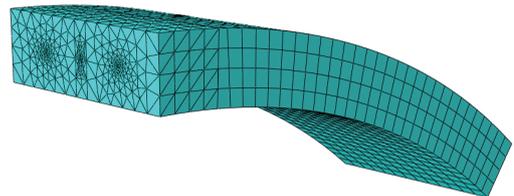
依据东六环地层荷载情况及设计说明书，分别施加轴力为 3 000, 6 000 kN 及 9 000 kN 来探究轴力对于盾构隧道接头抗弯性能的影响。提取接头的弯矩-转角曲线如图 3 所示。可以看出，管片接头的弯矩-转角曲线大致呈现“三折线”阶段。第 1 阶段是



(a) 左管片



(b) 斜螺栓



(c) 右管片

图 2 管片-接头三维精细化模型

Fig. 2 Segment-joint 3D refinement model

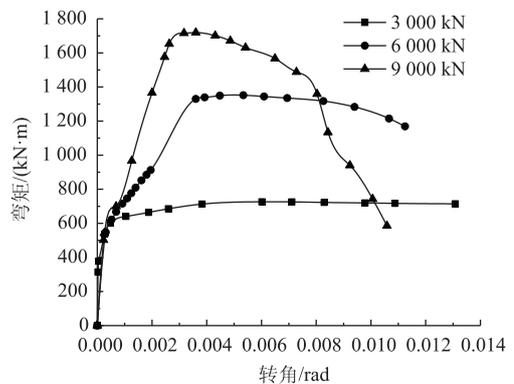


图 3 不同轴力作用下的管片接头弯矩-转角曲线

Fig. 3 Curves of bending moment vs. rotation angle of segment joint under different axial forces

施加轴力时管片闭合，接缝面全断面受压，接头处呈现较大的抗弯刚度。随着弯矩的进一步增大，管片发生张开，接缝面受压面积减小，螺栓进入受拉状态，此时管片接头的抗弯刚度下降。当弯矩大于极限弯矩时，发生屈服，接头的弯矩-张开度曲线呈现下降趋势。

提取张开量 6 mm 时螺栓应力云图如图 4 所示。可以看出, 斜螺栓应力最大处均位于接缝面处, 其次螺帽处同样出现了应力集中现象。随着轴力的增大, 螺栓应力增大。当轴力为 9 000 kN 时, 螺栓的最大 Mises 应力达到了 603.7 MPa, 接近了螺栓的屈服极限。

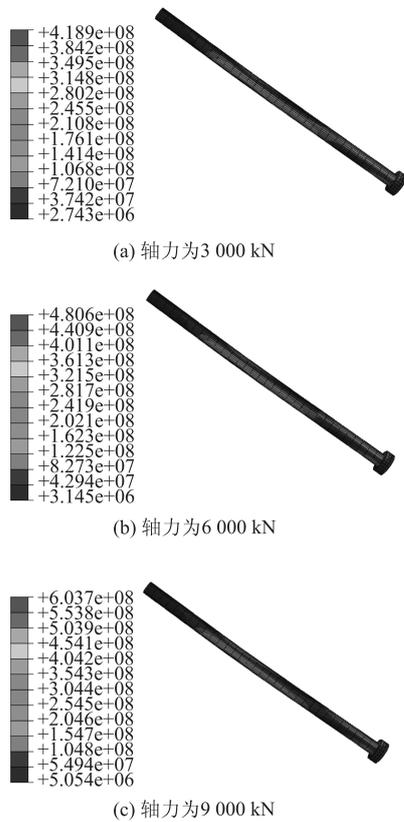


图 4 不同轴力条件下螺栓应力应变云图 (单位: Pa)

Fig. 4 Stress-strain nephograms of bolt under different axial forces (unit: Pa)

管片接头的抗弯刚度计算公式为  $K = \frac{M}{\theta}$ , 即为弯

矩-张开度曲线的切线斜率, 因为第 1 阶段管片尚未张开, 因为轴力作用接头表现出较大的抗弯刚度。第 3 阶段管片已进入破坏阶段, 忽略此时的抗弯刚度, 通过拟合计算第 2 阶段的抗弯刚度即为管片接头处的抗弯刚度, 计算结果见表 2。可以看出, 随着轴力的增大, 接头的抗弯刚度也呈现增长趋势, 当轴力较小时增速较快。

表 2 抗弯刚度计算表

Tab. 2 Bending stiffness calculation table

轴力/kN	抗弯刚度/(MN · m · rad <sup>-1</sup> )
3 000	42
6 000	200
9 000	298

管片接头的极限抗弯承载力如表 3 所示, 当轴力从 3 000 kN 上升到 6 000 kN 时, 极限抗弯承载力提高了 86.2%, 当轴力从 6 000 kN 上升到 9 000 kN 时, 极限承载力提高了 26.9%。随着轴力的提高, 管片接头的极限抗弯承载力也相应地提高, 但受到轴力的影响却在显著下降。

表 3 极限抗弯承载力

Tab. 3 Ultimate flexural capacity

轴力/kN	极限抗弯承载力/(kN · m <sup>-1</sup> )
3 000	726
6 000	1 352
9 000	1 716

### 3.2 斜螺栓角度对接头抗弯性能的影响

目前斜螺栓角度通常依据工程经验确定, 但斜螺栓角度的变化可能会引起管片接头力学性能的变化。保持斜螺栓在管片接缝面位置不变, 工程调研结果显示, 目前国内常用的斜螺栓角度分别为 52° ~ 60°, 建立不同斜螺栓角度的管片接头模型, 探究斜螺栓角度对盾构隧道接头抗弯性能的影响。接头的弯矩-转角曲线如图 5 所示, 可以看出, 接头的弯矩-转角曲线均呈现“三折线”趋势。抗弯刚度与斜螺栓角度呈现先增后减的趋势, 当斜螺栓角度为 56° 时, 接头的抗弯刚度最大。随着斜螺栓角度的增大, 管片接头的极限抗弯承载力在不断地提高。当斜螺栓角度从 52° 增长到 60° 时, 极限抗弯承载力从 1 246 kN · m 增长到 1 440 kN · m, 提高了 15.56%。

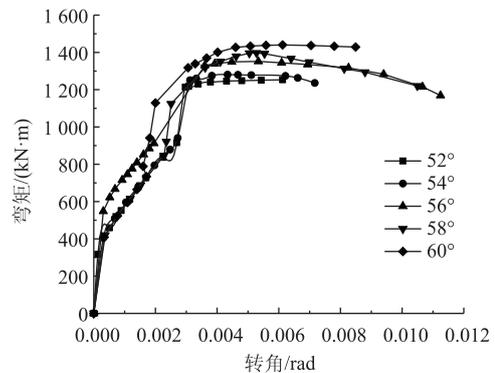


图 5 不同斜螺栓角度作用下的管片接头弯矩-转角曲线

Fig. 5 Curves of bending moment vs. rotation angle of segment joint under different inclined bolt angles

由图 5 可以看出, 当转角达到 0.003 8 时, 管片达到极限承载能力。进一步提取转角为 0.003 8 时中间螺栓杆上侧节点的 Mises 应力, 如图 6 所示。可以看出, 斜螺栓应力呈现双线性趋势。随着斜螺栓角度的增加, 螺栓应力最大位置从接缝面附近向螺帽

处移动。当角度过大时,螺栓最大应力位置回到接缝面附近。当斜螺栓角度为 $56^\circ$ 时,螺栓应力达到最大值,为288 MPa,螺栓仍处于弹性阶段,说明螺栓受力状态良好。

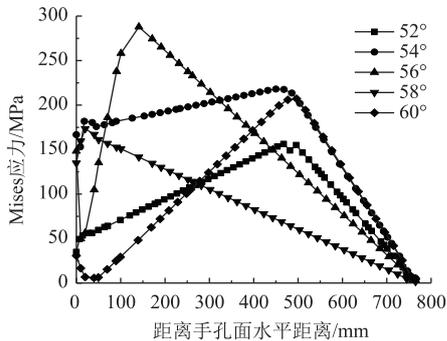


图6 不同斜螺栓角度作用下的螺栓 Mises 应力曲线

Fig. 6 Mises stress curves of bolts under different inclined bolt angles

### 3.3 螺栓预紧力对接头抗弯性能的影响

螺栓预紧力可以提高螺栓的使用寿命和可靠性,但过高的预紧力可能会造成管片局部压溃,甚至导致连接的失效,因此探究螺栓预紧力对接头抗弯性能的影响是十分必要的。分别对单根螺栓施加预紧力0, 50, 100 kN, 接头的弯矩-转角曲线如图7所示。可以看出,螺栓预紧力对管片接头的极限承载能力影响不大,但对管片接头的抗弯刚度却有着明显的影响。当螺栓的预紧力增加时,管片接头的抗弯刚度也会随之增加。当无预应力时,管片达到极限状态的转角为0.003 9,而提高螺栓预紧力到100 kN时,转角则下降到0.002 1,下降了46.2%,也可以有效地避免管片接头的防水失效。

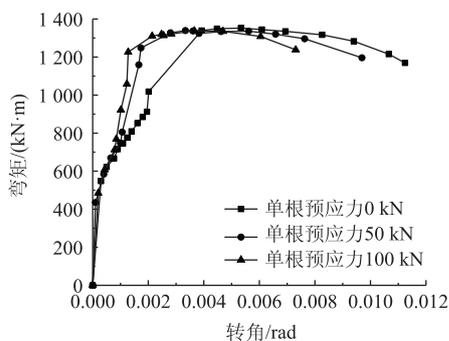


图7 不同螺栓预紧力作用下的管片接头弯矩-转角曲线

Fig. 7 Curves of bending moment vs. rotation angle of segment joint under different bolt preload

## 4 结论

为了研究超大直径盾构隧道接头抗弯性能的

影响因素,建立超大直径盾构隧道管片-接头三维精细化模型。通过数值计算结果可以得出以下结论:

(1) 在压弯荷载作用下,管片接头的弯矩-张开度曲线呈现“三折线”阶段。

(2) 随着轴力的增大,接头的抗弯刚度呈现增长趋势,且轴力较小时增速较快。轴力的增大也会引起管片接头极限抗弯承载能力的提升。

(3) 抗弯刚度与斜螺栓角度呈现先增后减的趋势,当斜螺栓角度为 $56^\circ$ 时,接头的抗弯刚度最大。随着斜螺栓角度的增大,管片接头的极限抗弯承载力在不断地提高。

(4) 螺栓预紧力对管片接头的极限抗弯承载力影响不大,但对抗弯刚度却有着显著的影响,抗弯刚度随着预紧力的增大而增大。

### 参考文献:

#### References:

- [1] LIU X, DONG Z, BAI Y, et al. Investigation of the Structural Effect Induced by Stagger Joints in Segmental Tunnel Linings: First Results from Full-scale Ring Tests [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 1-18.
- [2] LIU X, ZHANG C, ZHANG C G, et al. Ultimate Load-carrying Capacity of the Longitudinal Joints in Segmental Tunnel Linings [J]. Structural Concrete, 2017, 18: 693-709.
- [3] 周海鹰, 陈廷国, 李立新. 地铁区间盾构隧道衬砌纵向接头抗弯刚度试验研究 [J]. 工业建筑, 2010, 40 (7): 59-61, 122.  
ZHOU Hai-ying, CHEN Ting-guo, LI Li-xin. Study on Joint Bending Stiffness and Influencing Factors of Metro Shield Tunneling Lining [J]. Industrial Construction, 2010, 40 (7): 59-61, 122.
- [4] 张稳军, 张云旆, 宋晓龙. 盾构隧道弯螺栓接头力学特性受预紧力影响的数值研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (增2): 203-206.  
ZHANG Wen-jun, ZHANG Yun-pei, SONG Xiao-long. Numerical Study on Mechanical Behavior of Bent Bolted Connection in Shield Tunnel under Effect of Preload [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (S2): 203-206.
- [5] 张稳军, 宋晓龙, 张新新. 盾构隧道复合管片环向直螺栓接头抗弯性能的影响因素研究 [J]. 施工技术, 2017, 46 (增2): 82-86.  
ZHANG Wen-jun, SONG Xiao-long, ZHANG Xin-xin. Study on Influence Factors of Flexural Performance of

- Shield Tunnel Composite Segment Circumferential Straight-bolt Joint [J]. Construction Technology, 2017, 46 (S2): 82-86.
- [6] 张稳军,张新新,张云旆.斜螺栓等级对盾构隧道接头受力和变形的影响[J].地下空间与工程学报,2018,14(增1):227-234.  
ZHANG Wen-jun, ZHANG Xin-xin, ZHANG Yun-pei. Influence of Inclined Bolt Grade on Bearing Capacity and Deformation of Shield Tunnel Joint [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (S1): 227-234.
- [7] 张稳军,张琪,张高乐.天津滨海Z2号线盾构隧道接头螺栓比选及抗弯刚度研究[J].岩土工程学报,2019,41(增1):113-116.  
ZHANG Wen-jun, ZHANG Qi, ZHANG Gao-le. Selection of Bolted Joints and Bending Stiffness of Shield Tunnel of Z2 Metro Line in Tianjin Binhai New Area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (S1): 113-116.
- [8] 张景.盾构隧道环间接头抗弯刚度计算及其影响因素研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):104-112.  
ZHANG Jing. Study on Calculations and Influence Factors of Bending Stiffness of Segment Ring Joints of Shield Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (4): 104-112.
- [9] LI Z L, SOGA K, WANG F, et al. Behaviour of Cast-iron Tunnel Segmental Joint from the 3D FE Analyses and Development of a New Bolt-spring Model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41: 176-192.
- [10] LI Z L, SOGA K, WRIGHT P. Behaviour of Cast-iron Bolted Tunnels and Their Modelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 250-269.
- [11] 刘四进,封坤,何川,等.大断面盾构隧道管片接头抗弯力学模型研究[J].工程力学,2015,32(12):215-224.  
LIU Si-jin, FENG Kun, HE Chuan, et al. Study on the Bending Mechanical Model of Segmental Joint in Shield Tunnel with Large Cross-section [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (12): 215-224.
- [12] 张力,封坤,肖明清,等.大断面盾构隧道管片接头抗弯刚度取值研究[J].隧道建设,2019,39(4):619-625.  
ZHANG Li, FENG Kun, XIAO Ming-qing, et al. Bending Stiffness Values for Segment Joint of Shield Tunnel with Large Cross-section [J]. Tunnel Construction, 2019, 39 (4): 619-625.
- [13] 郑庆坂,潘伍,覃永杰,等.大断面矩形盾构隧道等效抗弯刚度研究[J].科学技术与工程,2020,20(23):9590-9596.  
ZHENG Qing-ban, PAN Wu, QIN Yong-jie, et al. Study on Equivalent Bending Stiffness of Large Section Rectangular Shield Tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (23): 9590-9596.
- [14] 张力,封坤,何川,等.盾构隧道管片接头破坏特征及损伤特性试验研究[J].土木工程学报,2021,54(5):98-107.  
ZHANG Li, FENG Kun, HE Chuan, et al. Experimental Study on Failure Behaviors and Damage Characteristics of Segmental Joints of Shield Tunnels [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54 (5): 98-107.
- [15] 张力,封坤,方若全,等.盾构隧道原型管片接头抗弯性能试验[J].土木工程学报,2017,50(增2):220-230.  
ZHANG Li, FENG Kun, FANG Ruo-quan, et al. Experiment Study on Flexural Performance of Prototype Segment Joint of Shield Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (S2): 220-230.
- [16] 张力,封坤,何川,等.盾构隧道管片接头三维精细化数值模拟研究[J].隧道建设,2020,40(8):1169-1175.  
ZHANG Li, FENG Kun, HE Chuan, et al. Three-dimensional Refined Numerical Simulation of Segmental Joint of Shield Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40 (8): 1169-1175.
- [17] 张力,苏芮,何川,等.纯压弯受力下大断面盾构隧道管片接头抗弯足尺试验研究[J].隧道建设,2020,40(7):997-1003.  
ZHANG Li, SUN Rui, HE Chuan, et al. Full-scale Experimental Study on Bending Performance of Segmental Joints of Large Cross-section Shield Tunnel under Pure Compressive Bending Condition [J]. Tunnel Construction, 2020, 40 (7): 997-1003.
- [18] 郑勇波,白廷辉,李晓军.考虑碳化的地铁盾构隧道纵缝接头抗弯力学模型研究[J].土木工程学报,2021,54(12):94-103.  
ZHENG Yong-bo, BAI Ting-hui, LI Xiao-jun. Study on Bending Mechanical Model of Longitudinal Joint in Metro Shield Tunnel Considering Concrete Carbonization [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54 (12): 94-103.
- [19] 刘巍,徐明,陈忠范.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J].工业建筑,2014,44(增1):167-171,213.  
LIU Wei, XU Ming, CHEN Zhong-fan. Parameters Calibration and Verification of Concrete Damage Plastic Model by ABAQUS [J]. Industrial Construction, 2014, 44 (S1): 167-171, 213.