

盾构隧道变阻滑移锚式接头抗剪性能研究

张稳军^{1,2}, 李嘉豪¹, 张高乐^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 盾构隧道管片接头是整体衬砌结构的薄弱环节, 接缝张开量超限极易导致结构出现不同程度的损伤和破坏。针对盾构隧道环间大变形问题, 提出了一种变阻滑移锚式接头, 并基于有限元软件 ABAQUS, 建立了接头-管片三维精细化数值模型, 考虑管片厚度、强度、轴力等影响因素对接头-管片结构抗剪性能及破坏机理展开深入研究。结果表明: 管片强度对接头-管片结构抗剪刚度及结构损伤影响较小; 不同轴力下管片损伤及套杆应力分布情况不一致, 随着轴力的逐渐增加, 摩擦力增大后会分担一部分剪力, 造成管片损伤相应减小, 而套杆损伤程度相对增加; 管片较薄时难以充分发挥接头力学性能, 甚至会在管片内侧表面出现裂缝进而影响衬砌结构安全。该研究成果可为新型接头的设计与加工提供技术参考。

关键词: 盾构隧道; 抗大变形; 锚式接头; 抗剪性能; 数值分析

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Research on Shear Performance of Non-Constant Resistance and Slip Anchor Joint of Shield Tunnels

ZHANG Wenjun^{1,2}, LI Jiahao¹, ZHANG Gaole^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The segment joint of shield tunnel is the weak link of the whole lining structure. The joint opening displacement exceeding limit can easily lead to different degrees of damage and destruction to the structure. Aimed at the problem of large deformation between shield tunnel rings, a non-constant resistance and slip anchor joint is proposed in this paper. Based on the finite element software ABAQUS, a three-dimensional refined numerical model of joint-segment is established. Considering the

influence factors such as segment thickness, segment strength and segment axial force, the shear performance and failure mechanism of joint-segment structure are studied in depth. The results show that the segment strength has little effect on the shear stiffness and structural damage of the joint-segment structure. At different axial forces, the segment damage and the stress distribution of the sleeve rod are inconsistent. With the gradual increase of the axial force, the friction force also increases and shares part of the shear force, resulting in a corresponding decrease in the damage of the segment, while the damage degree of the sleeve rod is relatively increased. When the segment is thin, it is difficult to give full play to the mechanical properties of the joint, and even cracks, appear on the inner surface of the segment, which will affect the safety of the lining structure. The research results of this paper can provide technical reference for the design and processing of new joints.

Key words: shield tunnel; large-deformation resistance; anchor joint; shear performance; numerical analysis

盾构隧道衬砌结构主要由预制管片拼装而成, 接头作为连接管片的关键构件, 承担着传递拉力、剪力和弯矩的重要作用。因此, 管片接头的力学性能对衬砌结构整体受力存在重大影响^[1]。螺栓是最普遍的传统接头形式, 但其安装和紧固仍须采用人工完成, 存在质量难以保证、施工效率低等问题, 可能导致衬砌管片力学性能下降, 在复杂条件下大直径盾构隧道中的使用受到限制^[2]。为满足盾构隧道衬砌结构的性能提升要求, 已研发多种新型接头和复合管片^[3-6]。

国内外学者结合理论分析、数值模拟和试验研

收稿日期: 2023-02-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978460)

第一作者: 张稳军(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程设计和施工。

E-mail: wjzhang@gxu.edu.cn

通信作者: 张高乐(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道与地下工程设计、施工及防灾减灾。

E-mail: zhanggaole100@tju.edu.cn



论文
拓展
介绍

究等多种方式对接头的力学性能进行了深入研究。张力等^[7]建立考虑复杂接缝面构造的接头抗弯承载力理论模型,分别进行有螺栓接头和无螺栓接头抗弯破坏试验对理论模型进行验证,分析了有、无螺栓对接头抗弯承载力的影响。何历超等^[8]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,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。李红洲^[9]采用数值模拟方法,分析了不同轴力和弯矩组合作用下,接头张开量、侧向位移、应力及应变、接缝面交错处应变和损伤特征变化规律。周静等^[10]分析了混凝土强度、预应力筋预应力值、侧壁厚度对接头受力性能的影响。张一鸣等^[11]建立了接头抗弯承载能力的计算模型,推导出接头极限弯矩和转角刚度的计算公式。李保军等^[12]采用数值模拟的方法对连接螺栓锈蚀后盾构隧道接头极限承载力和抗弯刚度的变化进行分析,揭示了接头承载力退化机理。Salemi等^[13]基于直接剪切试验,建立管片环间剪切接触模型,明确了带沟槽缝面管片接触点剪切模量和法向应力的关系式。郭瑞等^[14]分析研究了管片环缝接头在剪力作用下的受力、变形和破坏特征,得到了管片接头混凝土接触面的静摩擦系数。阳文胜等^[15]基于纵缝接缝的原型抗剪试验,获得剪力和纵缝错动变形的五阶段关系曲线,提出五阶段抗剪强度的实用计算公式。张景轩等^[16]开展纵向接头抗剪足尺试验和数值模拟,分析不同工况下错台的力学特征,探究管片接头受剪过程和承载机理。张冬梅等^[17]通过数值模拟研究了环向接缝顺剪、逆剪和切向剪切时的错台现象和破

坏特征,分析了斜螺栓、凹凸榫对环缝抗剪特性的影响。张稳军等^[18]系统地研究了管片环间榫式结构受剪时的损伤范围及损伤高度、环缝极限剪切承载力以及环缝抗剪刚度。

目前,有关接头力学性能的研究主要集中于抗弯性能,而对接头抗剪性能的研究相对较少,有必要进一步开展接头抗剪性能研究。此外,与传统螺栓接头相比,新型接头结构形式更为复杂,在同等受力条件下的变形模式也将越发难辨。因此,研究新型接头的抗剪性能对于推进其实际应用而言尤为重要。

本文针对盾构隧道环缝张开量超限易导致结构损伤和破坏的问题,提出了一种变阻滑移锚式接头。借助有限元软件 ABAQUS,建立了考虑塑性损伤的三维精细化数值计算模型,针对盾构隧道锚式接头的抗剪性能展开分析。通过建立 7 组不同工况模型,研究变阻锚式接头的应力分布模式及变形规律,为深入理解变阻锚式接头的力学性能提供参考。

1 接头构造及作用机理

1.1 接头构造

针对盾构隧道环缝张开量超限易导致接头出现拉伸变形过大、进一步造成管片损伤和破坏的问题,本文提出一种变阻滑移锚式接头,如图 1 所示。接头结构主要由套筒、套杆、滑动块及挡板组成。接头通过千斤顶挤压进行拼装。

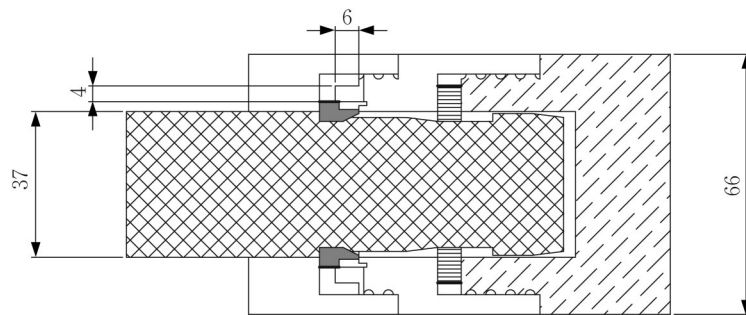


图 1 盾构隧道变阻滑移锚式接头(单位:mm)

Fig. 1 Non-constant resistance and slip anchor joint of shield sunnels (unit:mm)

图 1 中黑色斜线部分表示接头套筒底座,黑色网格部分表示接头套杆,黑色横线部分表示 A 型滑动块,灰色阴影部分表示为 B 型滑动块,滑动块与接头套杆部分发生摩擦接触为整个接头结构提供

抗力。

盾构管片拼装时,在拼装推力作用下,将套杆向内推入。套杆表面设有滑坡,在推力作用下,由滑动块组成的滑动环沿坡面滑动,滑动块沿径向张

开,在滑动块离开斜坡后,可平行滑动一段距离,在到达凹槽后,具有回弹空间,在弹簧环拉力作用下,弹簧及滑动块可回到初始位置,紧密包裹套杆,接头依靠各部件间的摩擦力保持整体状态。为保护管片衬砌结构安全,避免推进力过大对管片造成一定损伤,同时方便施工,可通过降低顺推进方向的滑坡坡度来减小拼装推力,从而实现高效率、高质量的拼装。

1.2 接头抗大变形作用机理

盾构隧道变阻滑移锚式接头结构根据键销原理实现其抗拉能力,作用机理可分为三个阶段:初始抗拉阶段、允许滑移阶段及最终抗拉阶段。

初始抗拉阶段,在管片经受外荷载致使两环管片发生张开时,套杆会相对受拉向外滑移,此时B型滑动块将沿着套杆坡面往上滑移,此时抗拉力主要由套筒内部的挡板结构及B型滑动块与各部件间摩擦力提供。图2为初始抗拉阶段示意图。

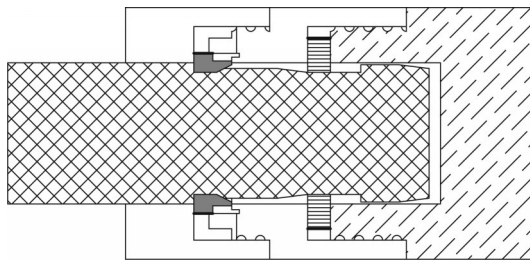


图2 初始抗拉阶段

Fig. 2 Stage of initial resistance to tension

允许滑移阶段,在B型滑动块离开斜坡后,此时抗力主要由B型滑动块与套杆间摩擦力提供,抗拉力相对较小,因此在出现大变形后,套杆可继续向外位移。图3为允许滑移阶段示意图。

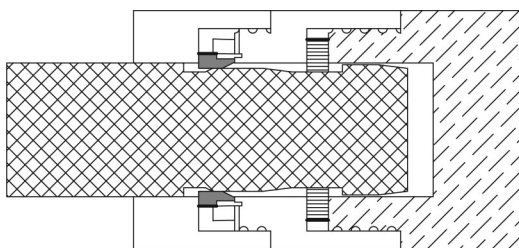


图3 允许滑移阶段

Fig. 3 Stage of allowable slip

最终抗拉阶段,在位移达到预设值后,A型滑动块与套杆销面接触,A型滑动块随即受剪,此时抗拉力陡升。图4为最终抗拉阶段示意图。

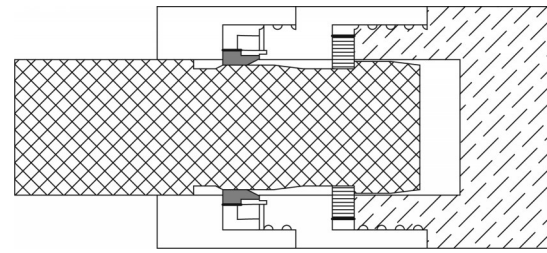


图4 最终抗拉阶段

Fig. 4 Stage of final resistance to tension

2 接头-管片结构抗剪性能研究

2.1 数值模型

2.1.1 材料参数及本构模型

接头材料选取M1合金钢,盾构管片混凝土材料分别取C40、C50、C60,箍筋材料为HRB400,具体材料参数如表1所示。

表1 接头及管片材料参数

Tab. 1 Material parameters of joints and segments

| 构件 | 材料 | 屈服强度/MPa | 弹性模量/MPa | 泊松比 |
|-------|--------|----------|--------------------|-----|
| 接头 | M1 | 480 | 2.10×10^5 | 0.3 |
| 箍筋 | HRB400 | 400 | 2.00×10^5 | 0.3 |
| 混凝土管片 | C40 | | 32 500 | 0.2 |
| 混凝土管片 | C50 | | 34 500 | 0.2 |
| 混凝土管片 | C60 | | 36 000 | 0.2 |

为真实反映接头-管片结构受剪时破坏机理,需充分考虑混凝土材料刚度退化及非线性特征。本文选择塑性损伤本构模型(CDP模型)作为混凝土本构模型。C40、C50及C60混凝土损伤因子如图5、图6所示。

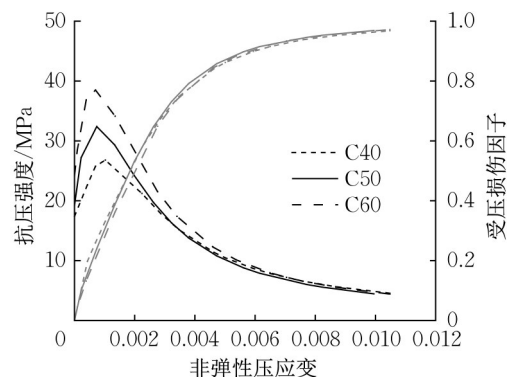


图5 混凝土受压损伤因子图

Fig. 5 Damage parameter of concrete compression

2.1.2 边界条件和加载方式

为保证数值分析的精确性,模型边界条件参考

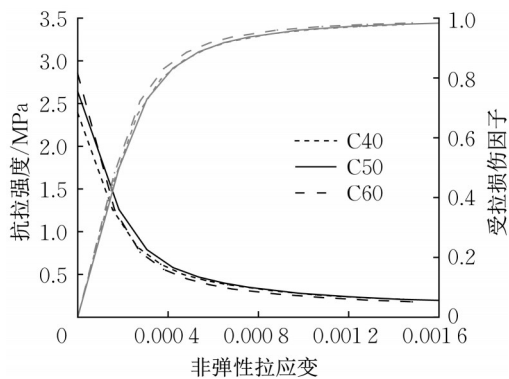


图6 混凝土受拉损伤因子图

Fig. 6 Damage parameter of concrete tension

文献[19]设定边界约束,其中两侧管片仅允许水平方向滑动,其余方向进行约束,因此在数值分析中对两侧管片底面除水平方向外皆进行约束,中间管片不施加约束。通过对中间管片的上表面施加位移荷载来模拟实现剪切过程,两侧管片的两端施加轴力 N 。图7所示为模型边界条件及荷载示意图。

2.1.3 接触关系

(1) 接头部分

接头各部件材料刚度相同,因此选择网格划分稀疏的接触面为主控制面。挡板与套筒间通过焊接连接,因而挡板与套筒间采用Tie连接。除此外,接

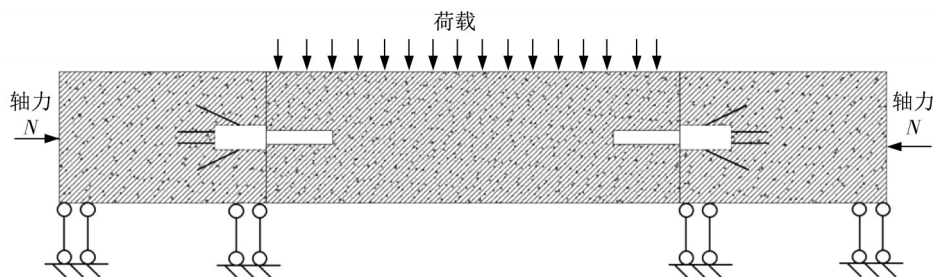


图7 模型边界条件及荷载

Fig. 7 Boundary conditions and loads of model

2.2 工况设计

为研究接头-管片结构抗剪性能及相互适应性,以增加接头经济效应,提高工程实际应用价值,考虑管片厚度、强度和轴力三个影响因素对接头-管片结构抗剪性能展开深入研究,具体工况如表2所示。

2.3 结果分析

(1) 管片强度对接头抗剪性能影响

图10为不同管片强度下错台量-剪力关系曲线。

由图可知,管片不同混凝土强度不会改变错台量-剪力关系曲线趋势,但会改变最终抗剪强度值。

触关系还包括:滑动块与套杆接触、滑动块与套筒接触、滑动块与滑动块接触。由于套杆与套筒间接产生的影响可忽略不计,因此不考虑其相互接触,建模中在套杆与套筒间设有一定空间。

(2) 管片部分

套筒前端空心部分与混凝土间采用Tie连接,后端实心部分采用软件中Embedded功能嵌入至混凝土管片中;锚筋与套筒间采用Tie连接与Embedded连接,锚筋与混凝土管片间采用Embedded嵌入。接触对的切向属性设定为各向同性,摩擦系数设定为0.40。在结构受力时,滑动块、套筒、套杆等构件共同工作,在计算中假定接头在变形前后满足平截面条件,故设置接触面法向属性为不允许结点穿越的硬接触。

2.1.4 网格划分

本文所建立三维精细化模型中,除钢筋笼采用梁单元建立外,其余构件如混凝土管片、接头结构等皆采用三维实体单元建立。由于主要研究对象为接头对附近混凝土管片影响,因此对接头影响范围内的混凝土管片采用合理局部加密处理。接头结构网格划分结果如图8所示,整体模型示意图如图9所示。

在错台量达到1.00 mm之前,随着位移增加,剪力迅速增加,在错台量达到1.00 mm之后,剪力随位移增加而增加的速度逐渐降低,在错台量约为2.27 mm时,曲线逐渐持平,即随着位移增加,剪力基本不变。由此可知,随着管片强度的增加,抗剪刚度有所增加,但增加数值较小。

图11为不同管片强度下管片损伤云图及接头应力云图。

由图可知,在结构达到最大抗剪强度后,管片受拉损伤严重,套杆下端管片为主要受拉损伤区,受拉损伤区域向后贯穿至套杆后端管片附近,受拉损伤

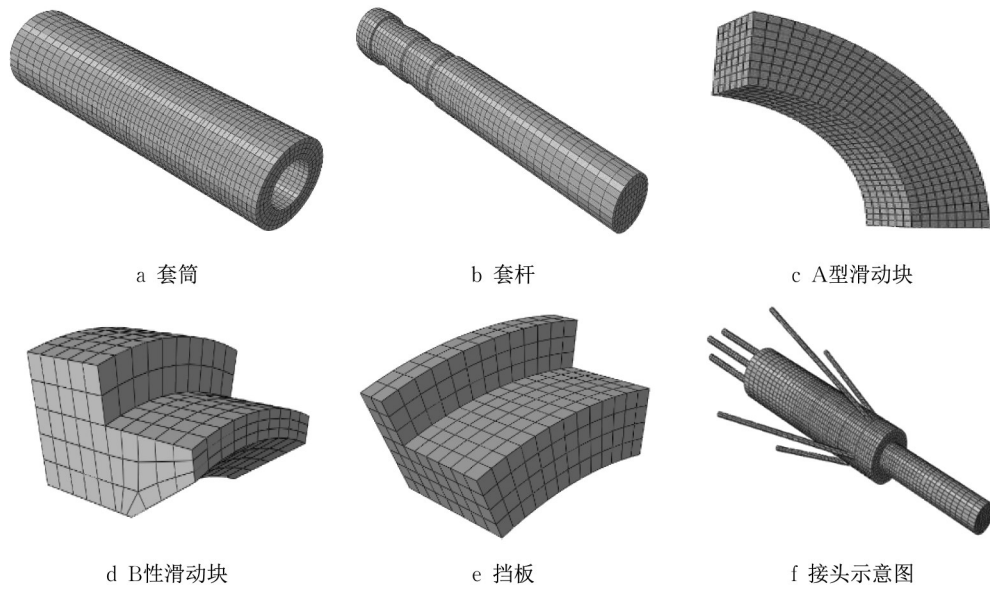


图8 接头结构网格划分结果

Fig. 8 Mesh results of joint structure

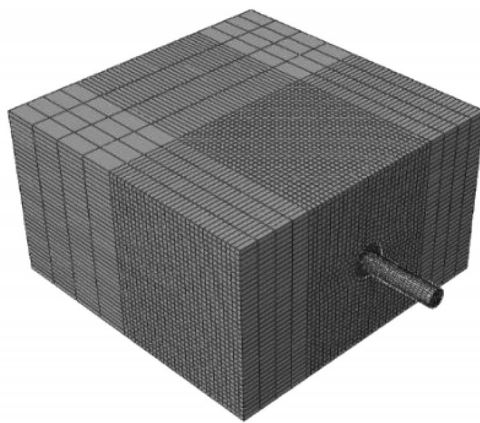


图9 整体模型示意图

Fig. 9 Whole model

表2 工况设计

Tab. 2 Working condition design

| 工况 | 管片厚度/ mm | 混凝土 标号 | 管片轴力 /kN | 套杆最小直径 R_1 /mm | 套筒外径 R /mm |
|----|-------------|-----------|-------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 200 | C50 | 50 | 32 | 66 |
| 2 | 350 | C50 | 50 | 32 | 66 |
| 3 | 500 | C50 | 50 | 32 | 66 |
| 4 | 350 | C40 | 50 | 32 | 66 |
| 5 | 350 | C60 | 50 | 32 | 66 |
| 6 | 350 | C50 | 100 | 32 | 66 |
| 7 | 350 | C50 | 150 | 32 | 66 |

区域向下贯穿至管片下表面;套杆周围管片上端区域主要呈现受压损伤,安全区域(无受压损伤区域)占比相对较大;观察套杆应力剖面云图可知,此时套杆中间段应力达到屈服的区域面积较大,可认为接头此时已经损伤。

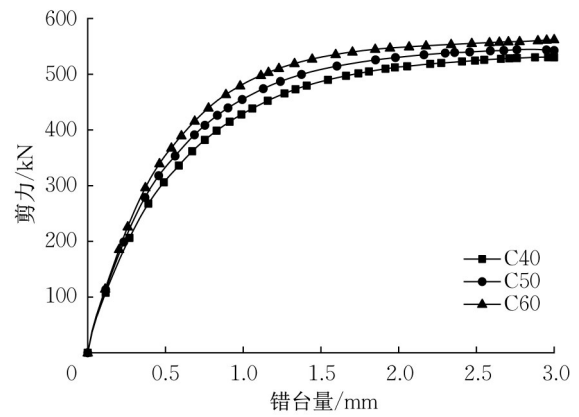


图10 不同管片强度下错台量-剪力关系曲线图

Fig. 10 Dislocation-shear force relationship at different segment strengths

对比图 11a、11b、11c,可以发现,随着管片强度增大,套杆的损伤愈加严重,这与随着管片强度增大抗剪强度逐渐增大的结果相一致。在剪力达到最大时管片损伤模式基本一致,主要受拉损伤区在套杆周围管片下端,在破坏时受拉损伤区域贯穿至下表面,且与接头后端附近管片损伤区域连接,此时管片下表面会出现较大裂缝。由上述对比可知,改变管片强度对接头抗剪刚度及结构损伤影响较小,因此不建议通过增加管片强度来提升结构抗剪性能。

(2)管片厚度对接头抗剪性能影响

图 12 所示为不同管片强度下错台量-剪力关系曲线图。

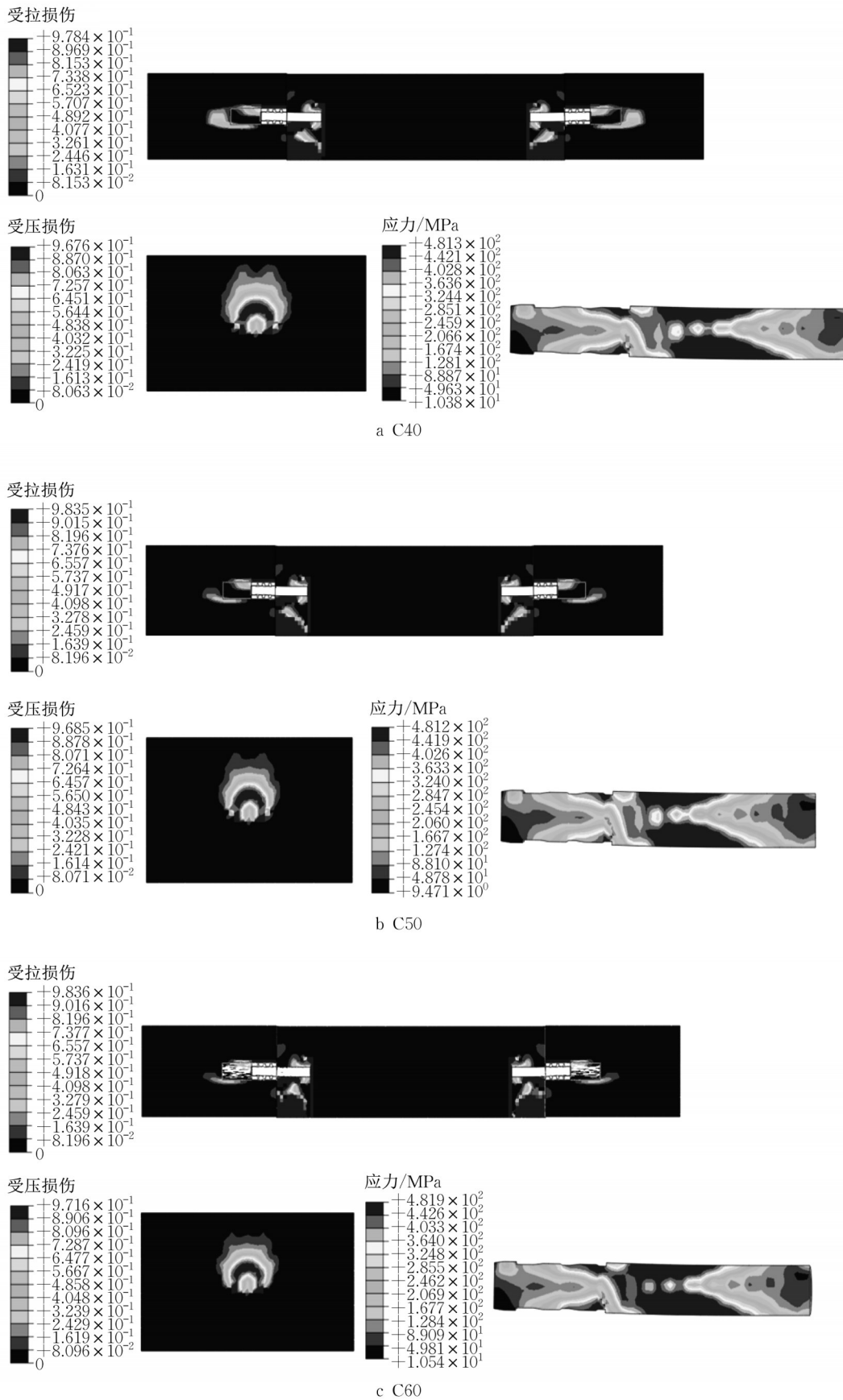


图 11 不同管片强度下管片损伤云图及套杆应力云图

Fig. 11 Nephogram of segment damage and sleeve rod stress at different segment strengths

由图12可知,各曲线发展特点基本一致,随着位移逐渐增加,剪力经历三个发展阶段,分别为迅速增加、缓慢增加及延性阶段。管片厚度会显著影响结构的抗剪强度及曲线开始持平时的位移值。由图中数据可知,增加管片厚度 H ,可以显著增加接头-管片结构的抗剪强度及抗剪刚度。

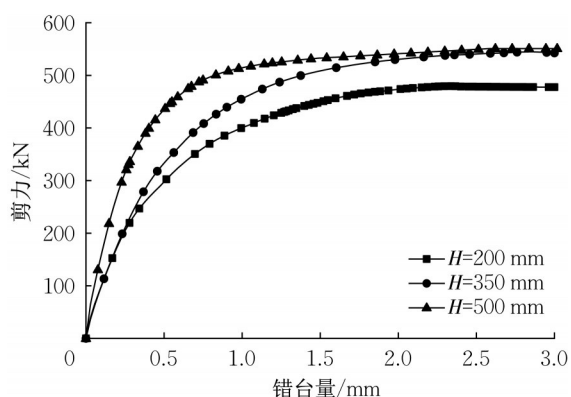


图12 不同管片厚度下错台量-剪力关系曲线图

Fig. 12 Dislocation-shear force relationship at different segment thicknesses

图13为不同管片厚度下管片损伤云图及接头应力云图。由图可知,随着管片厚度的逐渐增加,当管片厚度为200 mm时,管片受拉损伤严重,套杆下端管片为主要受拉损伤区,受拉损伤区域向后贯穿至套杆后端管片附近,受拉损伤区域向下贯穿至管片下表面。由接缝面受压损伤云图及套杆应力云图可以发现,套杆上端区域受压损伤严重,安全区域(无损伤)占比较小,套杆在此时应力达到屈服的区域较少,可以认为套杆并未出现明显损坏。

当管片厚度为350 mm时,管片受拉损伤相对套杆下端管片为主要受拉损伤区,受拉损伤区域向后贯穿至套杆后端管片附近,受拉损伤区域向下贯穿至管片下表面,直观表现为管片内侧混凝土裂缝。管片受压损伤区域主要在套杆附近区域,安全区域(无损伤)占比相对较大,套杆在此时应力达到屈服的区域较大,可认为套杆此时严重损伤。

当管片厚度为500 mm时,管片受拉损伤区域面积较小,未出现前两种工况中下侧受拉损伤区域贯穿至管片下表面的现象,即在承受剪力时,管片下表面不会出现裂缝及混凝土脱落现象;接缝面处管片

受压损伤区域面积较小,安全区域占比较大,此时管片仍处于安全状态;观察套杆应力云图可以发现,套杆中间段区域应力基本完全达到屈服,可认为此时接头出现严重损伤。

对比图13a、13b、13c,可以发现,为了充分发挥接头与管片性能,管片厚度可选择350 mm或500 mm,当管片厚度为350 mm时,在承受较大剪力时,管片下表面可能会出现裂缝,进而降低管片力学性能,减弱管片防水能力,因此,为保证管片综合性能安全,管片厚度在设计中应不小于500 mm。如此,既可以提升结构抗剪性能,也可降低结构受剪后对管片力学性能及防水能力的影响。值得注意的是,上述尺寸远大于6 m级直径盾构隧道管片厚度,而接近于10 m级或更大直径的盾构隧道管片厚度。由此可见,该接头更适用于大直径盾构隧道,其在常规尺寸隧道中的适用性有待进一步研究。

(3)管片轴力对接头抗剪性能影响

图14为不同轴力下管片损伤云图及接头应力云图。对比图14a、图14b、图14c,可以发现,不同轴力下管片损伤情况及套杆应力分布情况并不一致,随着轴力的逐渐增加,管片损伤程度逐渐减小,当轴力为50 kN时,管片受拉损伤严重,管片下表面可能会出现裂缝,而轴力大于50 kN的两种工况管片受拉损伤具有明显改善,受拉损伤区域较小,主要集中在接头周围,内表面不会出现裂缝,这对保护管片力学性能极为重要。随着轴力增加,套杆达到屈服强度的区域逐渐增加,即套杆损伤程度越来越大。这是由于,随着轴力逐渐增大,管片间摩擦力逐渐增大,摩擦力增大后会承担一部分管片应承担的力,因而管片损伤相应减小,套杆损伤程度相对增加。在实际工程中,较大的轴力有益于提升接头-管片结构的抗剪性能。

图15为管片不同轴力 N 下错台量-剪力关系曲线图。由图可知,曲线发展趋势与前述一致,随着位移逐渐增加,剪力依然可分为三个阶段,分别为迅速增加、缓慢增加及延性阶段,不同轴力下曲线达到持平段的位移荷载基本一致,约为2.50 mm。由图中数据可知,改变轴力对接头-管片结构抗剪性能具有显著影响。

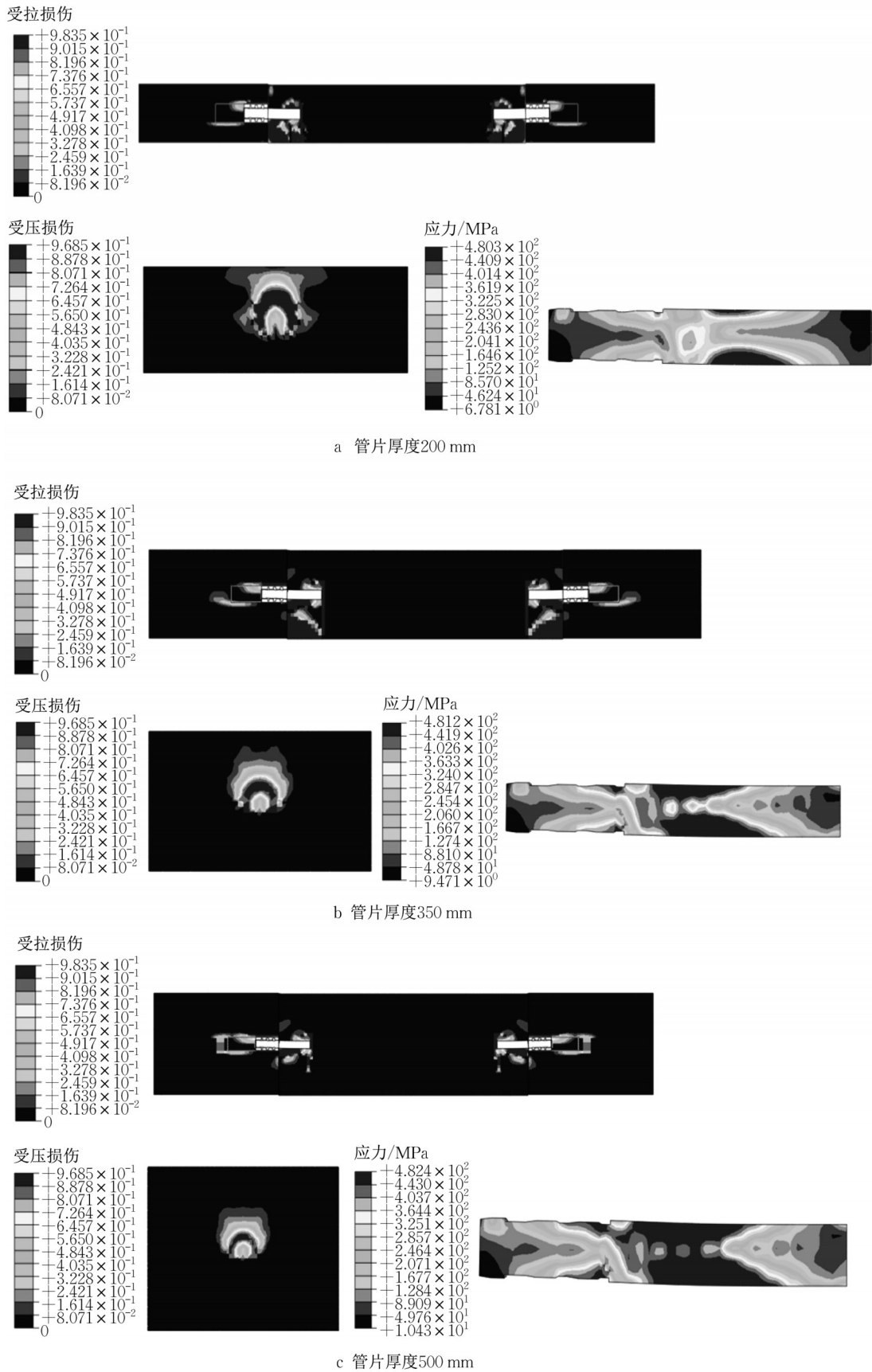


图 13 不同管片厚度下管片损伤云图及套杆应力云图

Fig. 13 Nephogram of segment damage and sleeve rod stress at different segment thicknesses

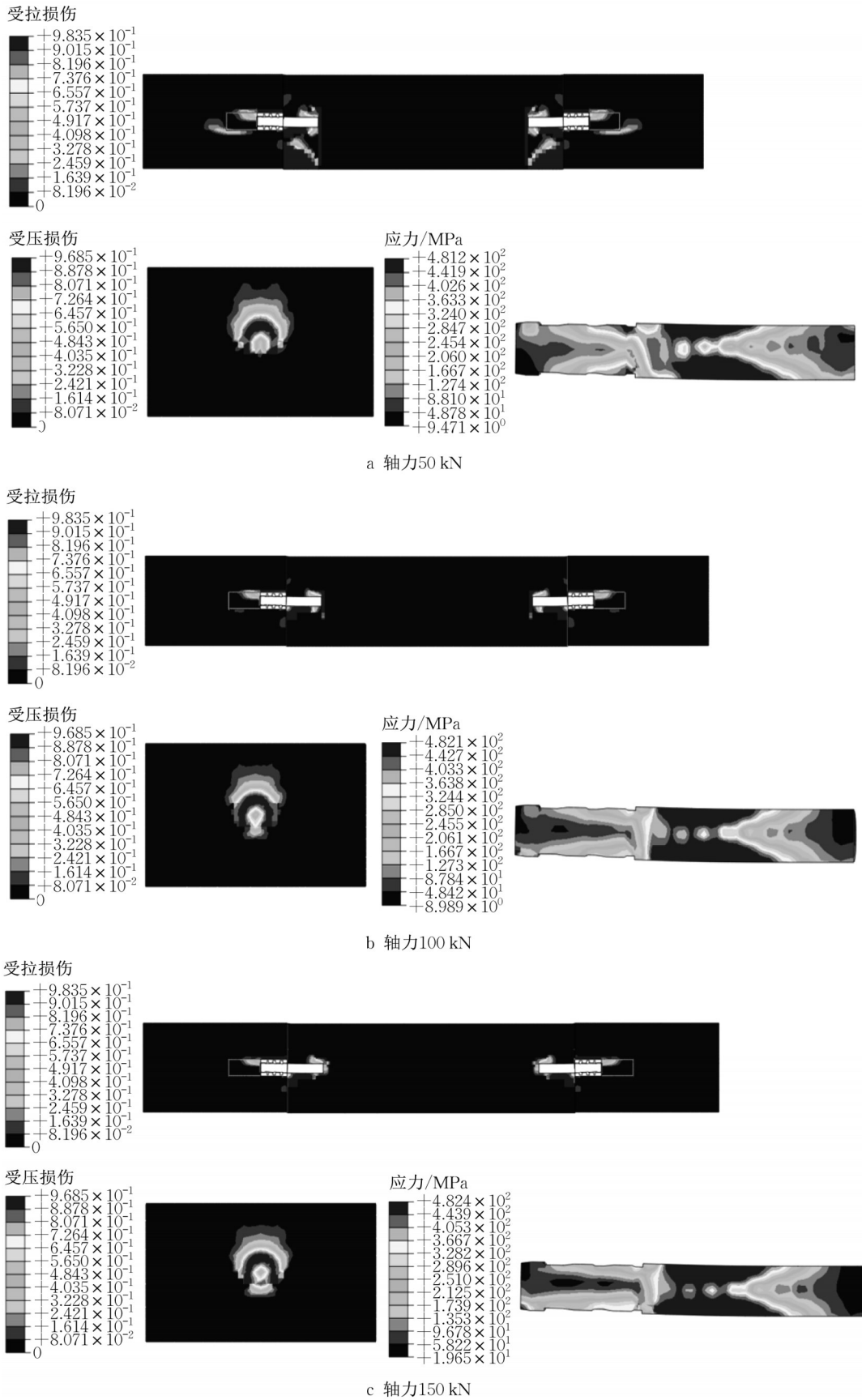


图 14 不同管片轴力下管片损伤云图及套杆应力云图

Fig. 14 Nephogram of segment damage and sleeve rod stress at different segment axial forces

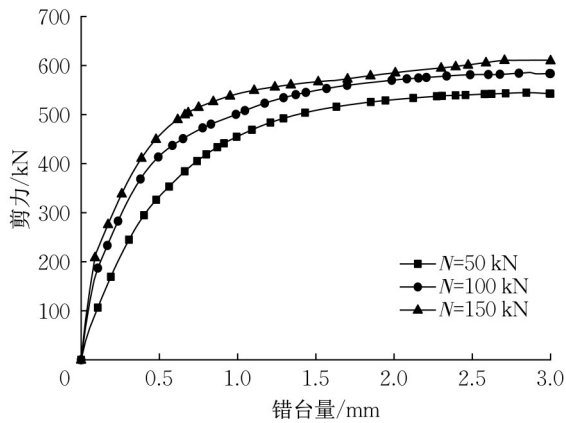


图 15 不同管片轴力下错台量-剪力关系曲线图

Fig. 15 Dislocation-shear force relationship at different segment axial forces

3 结论

本文针对盾构隧道变阻滑移锚式接头-管片结构的抗剪性能进行了研究,通过考虑管片强度、厚度和所受轴力的变化,探究了不同条件下接头结构的损伤分布特征和承载力变化规律,相关结论如下:

(1)盾构隧道变阻滑移锚式接头-管片结构在受剪条件下,错台量-剪力关系曲线主要经历三个阶段,在位移较小时,剪力随位移增大迅速增加,当达到某一位移时,随位移增大剪力缓慢增长,且剪力的增加趋势开始逐渐减缓,最终会出现延性阶段。

(2)随着管片强度增大,抗剪刚度有所增加,但增加幅度较小。不同管片强度下剪力达到最大时,管片损伤模式基本一致。管片强度对接头-管片结构抗剪刚度及结构损伤影响较小。

(3)增加管片厚度,可以显著增加接头-管片结构的抗剪强度及抗剪刚度。当管片厚度为 200 mm 或 350 mm,在承受较大剪力时,管片受损严重,管片力学性能降低。采用锚式接头对应的管片厚度应不小于 500 mm。

(4)不同轴力下管片损伤情况及套杆应力分布情况不一致,随着轴力的逐渐增加,管片损伤程度逐渐减小,但套杆达到屈服强度的区域逐渐增加,即套杆损伤程度越来越大。

作者贡献声明:

张稳军:概念体系、研究方法、撰写论文并审核。

李嘉豪:论文初稿、软件以及数据处理。

张高乐:审核和修改论文、软件处理。

参考文献:

- [1] 何川,曾东洋.盾构隧道结构设计及施工对环境的影响[M].成都:西南交通大学出版社,2007.
HE Chuan, ZENG Dongyang. Structural design of shield tunnel and construction impact on environment [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.
- [2] 严佳梁.盾构隧道管片接头形式的探讨与选择[J].建筑技术,2009,40(3):269.
YAN Jialiang. Discussion and selection of segment joint type of shield tunnel [J]. Architecture Technology, 2009, 40(3): 269.
- [3] ZHANG Wenjun, KOIZUMI A. Behavior of composite segment for shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4): 325.
- [4] ZHANG Wenjun. Study on mechanical behavior and design of composite segment for shield tunnel [D]. Tokyo: Waseda University, 2009.
- [5] 张稳军,金明明,苏忍,等.盾构隧道钢混复合管片的力学性能试验(英文)[J].中国公路学报,2016,29(5):84.
ZHANG Wenjun, JIN Mingming, SU Ren, *et al.* Experiment on mechanical properties of steel and concrete composite segment for shield tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(5): 84.
- [6] 张稳军,张高乐,雷华阳.基于塑性损伤的盾构隧道FRP-Key接头抗剪性能及布置方式合理性研究[J].中国公路学报,2017,30(8):38.
ZHANG Wenjun, ZHANG Gaole, LEI Huayang. Model test on thermomechanical coupling of shield tunnel lining under high fire temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 38.
- [7] 张力,何川,封坤,等.螺栓对盾构隧道管片接头抗弯承载力的影响[J].中国公路学报,2022,35(11):195.
ZHANG Li, HE Chuan, FENG Kun, *et al.* Influence of bolts on the compression-bending capacity of segmental joints of shield tunnels [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2022, 35(11): 195.
- [8] 何历超,姜瑜.超大直径盾构隧道接头抗弯性能影响因素研究[J].公路交通科技,2022,39(9):110.
HE Lichao, JIANG Yu. Study on influencing factors of bending performance of extra large diameter shield tunnel joint [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(9): 110.
- [9] 李红洲.矩形装配式隧道接头的抗弯压性能数值研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(6):152.
LI Hongzhou. Flexural and compressive properties of rectangular fabricated tunnel joint [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(6): 152.
- [10] 周静,夏樟华,陈树辉,等.预应力预制拼装管廊接头抗弯性能分析[J].市政技术,2022,40(3):153.
ZHOU Jing, XIA Zhanghua, CHEN Shuhui, *et al.* Analysis of

- flexural performance of prestressed prefabricated pipe gallery joints [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2022, 40(3): 153.
- [11] 张一鸣, 朱科峰, 黄小平, 等. 矩形钢顶管承插接头局部抗弯承载力计算[J]. *建筑施工*, 2021, 43(11): 2422.
ZHANG Yiming, ZHU Kefeng, HUANG Xiaoping, *et al.* Calculation of local bending capacity of rectangular steel pipe jacking socket joint [J]. *Building Construction*, 2021, 43(11): 2422.
- [12] 李保军, 钟毅, 张冬梅. 螺栓锈蚀对盾构隧道接头抗弯性能的影响研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(S2): 67.
LI Baojun, ZHONG Yi, ZHANG Dongmei. Effect of bolt corrosion on bending behavior of segmental joints of shield tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(S2): 67.
- [13] SALEMI A, ESMAEILI M, SERESHKI F. Normal and shear resistance of longitudinal contact surfaces of segmental tunnel linings [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77: 328.
- [14] 郭瑞, 何川, 苏宗贤, 等. 盾构隧道管片接头抗剪力学性能研究[J]. *现代隧道技术*, 2011, 48(4): 72.
GUO Rui, HE Chuan, SU Zongxian, *et al.* Study of shearing mechanical properties of segment joints of shield tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(4): 72.
- [15] 阳文胜, 高浩, 杨国富, 等. 大断面矩形隧道预制装配式管片接头抗剪性能研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(S1): 583.
YANG Wensheng, GAO Hao, YANG Guofu, *et al.* Study on shear behavior of prefabricated segment joints in large section rectangular tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(S1): 583.
- [16] 张景轩, 方砚兵, 封坤, 等. 输气盾构隧道环间新型连接构造抗剪性能研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(S1): 573.
ZHANG Jingxuan, FANG Yanbing, FENG Kun, *et al.* Study on shear performance of a new connection structure between segment rings of shield-driven gas transmission tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(S1): 573.
- [17] 张冬梅, 刘杰, 李保军, 等. 大直径盾构隧道斜螺栓环缝抗剪特性研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(12): 142
ZHANG Dongmei, LIU Jie, LI Baojun, *et al.* Shearing behavior of circumferential joints with oblique bolts in large diameter shield tunnel [J]. *China Journal of Highway and Transportation*, 2020, 33(12): 142.
- [18] 张稳军, 张琪, 张高乐, 等. 天津地铁1.2 m管片环间榫式接头抗剪性能分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(4): 1040.
ZHANG Wenjun, ZHANG Qi, ZHANG Gaole, *et al.* Analysis on shear performance of 1.2 m segment ring tenon joint in Tianjin Metro [J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(4): 1040.
- [19] 张润东. 盾构隧道管片接头精细化数值模拟及多尺度力学对比分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
ZHANG Rundong. Fine numerical simulation and multi-scale mechanical comparative analysis of segment joint in shield tunnel [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.