

# 界面粘胶损伤下钢内衬装配式隧道管片接头力学性能研究

刘启倬<sup>1</sup>, 徐松<sup>2</sup>, 徐长节<sup>2\*</sup>, 郑凤曲<sup>2</sup>, 朱碧堂<sup>2</sup>, 刘阳峰<sup>2</sup>, 何建国<sup>3</sup>, 王光龙<sup>1</sup>

(1. 江西省交通投资集团有限责任公司项目建设管理公司, 江西 南昌 330052; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051)

**摘要:**【目的】为研究钢板的厚度、锚固件强度对盾构隧道接头部位加固效果。【方法】利用 ABAQUS 有限元软件建立内径 5.4 m 外径 6 m 的左右各 1/2 标准块管片接头模型, 基于荷载-结构计算模型对钢板粘胶加固地铁隧道管片接头的力学性能进行研究。【结果】研究表明, 加固后管片接头的力学性能受到混凝土基体、钢板、锚栓三方面的影响。钢板加固接头的抗弯刚度明显提高, 10 mm 钢板可提升接头刚度 40%, 当钢板厚度为 20~30 mm 时, 随外荷载作用下, 结构所受弯矩不断增大, 后期结构损伤主要集中在接缝面、手孔附近和加载点下方, 钢板厚度超过 20 mm 并未引起结构损伤模式有较大变化, 钢板应力集中在远离接缝面的支座处, 证明该厚度下钢板能充分发挥组合结构受力优势。【结论】锚栓数量固定的情况下, 直径增加能有效提高加固后管片接头的协同受力。采用锚粘钢内衬加固后的管片接头由于受到接头部位受压区混凝土强度的限制, 钢板厚度增加接头刚度增加幅度衰减, 以 10~20 mm 钢板厚度最佳; 锚栓直径大于 M16 可保证结构间的有效连接。

**关键词:** 粘胶损伤; 粘钢加固; 装配式隧道; 管片接头; 力学性能

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

## Study on mechanical properties of fabricated tunnel segment joint with steel lining considering interfacial adhesive damage

LIU Qizhuo<sup>1</sup>, XU Song<sup>2</sup>, XU Changjie<sup>2\*</sup>, ZHENG Fengqu<sup>2</sup>, ZHU Bitang<sup>2</sup>, LIU Yangfeng<sup>2</sup>, HE Jianguo<sup>3</sup>, WANG Guanglong<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Provincial Communications Investment Group Co., Ltd Project Construction Management Company, Nanchang 330052, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Zhejiang Jiaogong Group Co. Ltd, Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** 【Objective】 To study the reinforcement effect of steel plate thickness and anchor strength on the joint of shield tunnel. 【Method】 Using ABAQUS finite element software, establish left and right half standard block pipe joint models with an inner diameter of 5.4 m and an outer diameter of 6 m. Based on a load structure calculation model, study the mechanical properties of steel plate adhesive reinforced subway tunnel pipe joint. 【Result】 The research results indicate that the mechanical properties of reinforced pipe joints are influenced by three aspects: concrete matrix, steel plate, and anchor bolt. The bending stiffness of steel plate reinforced joints is significantly improved. A 10 mm steel plate can increase the joint stiffness by 40%. When the thickness of the steel plate is 20~30 mm, the bending moment of the structure continuously increases under external loads. In the later stage, structural damage mainly concentrates on the joint surface, near the handhole, and below the loading point. A steel plate thickness exceeding 20 mm does not cause significant changes in the structural damage mode. The stress of the steel plate is concentrated at the support far away from the joint surface, proving that the steel plate can fully exert the stress advantage of the composite structure under this thickness. 【Conclusion】 When the number of anchor bolts is fixed, increasing the diameter can effectively improve the collaborative stress of the reinforced pipe joint. Due to the limitation of concrete strength in the compressed area of the joint, the stiffness increases of the joint decreases with the increase of steel plate thickness. The optimal thickness is 10~20 mm steel plate; An anchor bolt diameter greater than M16 ensures effective connection between structures.

**Key words:** Adhesive damage; Reinforced with steel; Fabricated tunnel; Segment joint; Mechanical property

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3009400); 国家自然科学基金重点项目(52238009); 江西省重点研发计划项目(20232BBE50014); 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2023C0001)

【研究意义】截止 2021 年底，中国内地累计有 50 个城市开通城市轨道交通运营线路约 9 192.6 公里，其中地铁 7 253.73 公里，占比约 78.9%<sup>[1]</sup>。随着大量地铁隧道的修建和投入运营，在管片施工或地铁运营中，由于盾构施工不当、临近工程施工、地面超载、土体压力或者地下水压力等的影响，伴随着服役时间的增加，越来越多的隧道出现渗漏水、管片裂损、大变形和道床脱空等病害<sup>[2]</sup>，影响列车的安全高效运行，亟需进行修复加固。地铁隧道作为城市大运力公共交通工具的载体和重要的人防工程，对于安全性能的要求极高，保障足够的隧道横向刚度、抵抗管环变形是确保地铁隧道服役性能的核心，但是近年来因横向刚度不足引起病害频发，众多城市地下隧道出现以渗漏水、结构损坏、形变为主的病害形式。

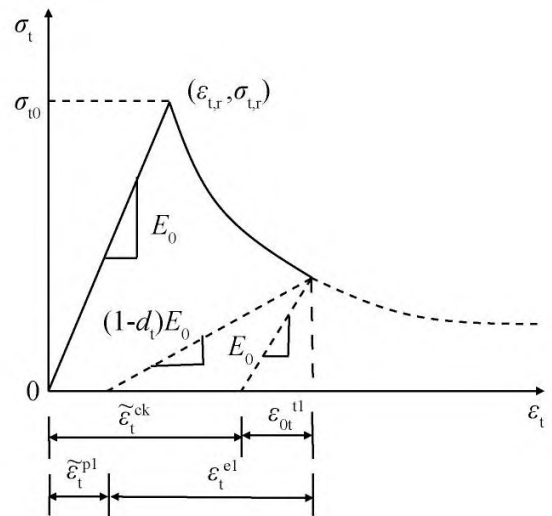
【研究进展】现如今针对已经出现形变病害的运营地铁隧道主要的加固手段有地层注浆<sup>[3]</sup>和刚性补强<sup>[4]</sup>两大类。通过地层注浆加固能有效调整隧道的变形，起到变形恢复和调整地层应力<sup>[5]</sup>。刚性补强加固方法主要有内张钢圈加固<sup>[6]</sup>、复合腔体加固<sup>[7]</sup>、芳纶布加法<sup>[8]</sup>、碳纤维布加固<sup>[9-10]</sup>，通过增强加固后隧道的横向刚度来提高形变隧道的刚性、延性<sup>[11]</sup>。其中钢环内衬加固技术由于对隧道净空占用少、加固效果好且运用广泛。该方法是使用刚性环氧树脂和锚栓作为连接件，半环分块钢环、牛腿、钢拉条作为刚性加固体，对形变管环进行内衬补强的技术，其中钢环可以使用诸如平钢板<sup>[15]</sup>、波纹钢板<sup>[12]</sup>、槽钢等钢材<sup>[13]</sup>。

【关键问题】尽管诸多学者已对钢板套衬加固盾构隧道力学性能开展了数值模拟及模型试验等工作<sup>[14-18]</sup>，但鲜有研究锚粘钢套衬加固隧道管片接头后形成的组合结构力学传递机理，尤其尚未明确加固衬砌受荷后结构损伤机理、锚栓和粘胶界面的贡献等。ZHAO 等<sup>[19-20]</sup>针对加固后钢混组合结构粘结界面的行为采用梁-弹簧单元，LIU 等<sup>[21]</sup>采用了三维实体单元模拟混合结构承载力变化，孙雅珍等<sup>[22]</sup>采用 cohesive 单元模拟了界面损伤变化，刘学增等<sup>[23]</sup>在 cohesive 单元基础上研究了 trace 单元下界面性能对承载力性能影响，但上述研究都未涉及到钢环内衬加固后既有隧道自身的损伤发展变化。【创新特色】因此，为丰富运营隧道加固技术，推动钢环内衬加固技术的发展及应用，为钢环内衬加固分段式管片的设计提供理论依据，本文考虑粘胶损伤下钢环内衬加固管片接头的力学性能及损伤发展进行研究，对现有管片接头加固钢板和锚栓参数进行分析。

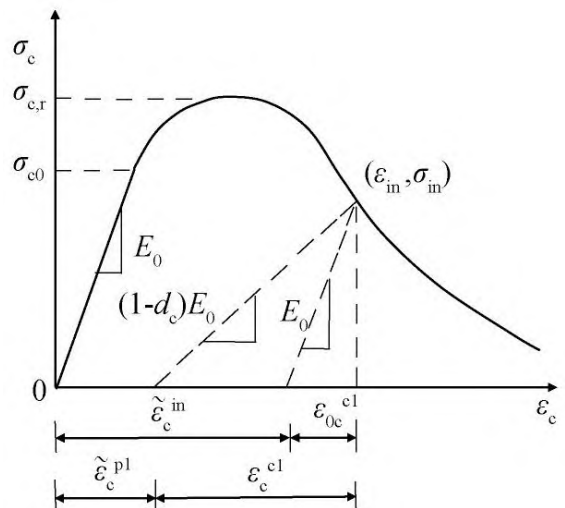
## 1 分析理论与刚度评价

### 1.1 混凝土 CDP 模型

在研究混凝土单轴受力状态下的应力和应变时，通常采用的是混凝土塑性损伤模型（concrete damaged plasticity model, CDP）。其中，混凝土本构关系应用最广泛的是《混凝土结构设计规范》（GB 50010-2010），相比欧洲规范和美国的应力应变曲线方程，《混凝土结构设计规范》具有损伤演化参数，收敛性更高。因此本文采用《混凝土结构设计规范》（GB 50010-2010）中的本构关系来研究 CDP 模型的参数取值，得到 CDP 应力应变关系曲线如图 1 所示。



(a) Compressive stress-strain curve



(b) Tensile stress-strain curve

图 1 CDP 模型混凝土应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain relationship curve of concrete in CDP model

## 1.2 内聚力本构模型

内聚力模型在断裂力学中被广泛应用于描述复合材料结构的连接界面，界面材料的力学特性通过内聚力-张开位移关系来描述，可以准确模拟界面的滑移、失效和剥离，用以模拟环氧粘胶界面损伤演化特性。

粘胶损伤主要指环氧粘胶结合层在应力超过粘胶的结合强度后粘胶层张开失效剥离的行为，粘胶损伤行为定义如下：损伤变量  $D$  初始值为 0，环氧树脂材料无损伤， $D$  从 0 单调增加到 1，即环氧树脂材料进入到损伤演化阶段，当  $D=1$  时，环氧树脂材料损伤失效。

各方向牵引力分量与损伤变量关系如式 (1)

$$t_n = \begin{cases} (1-D)K_{nn}\delta_n & \delta_n \geq 0 \\ K_{nn}\delta_n & \delta_n < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$t_s = (1-D)K_{ss}\delta_s$$

$$t_t = (1-D)K_{tt}\delta_t$$

式中： $K_{tt}$ 、 $K_{nn}$ 、 $K_{ss}$  为界面不同方向上的刚度；本文所使用的粘胶材料钢对钢拉伸抗剪强度标准值为 16.6 MPa，钢对 C45 混凝土正拉粘结强度为 3.9 MPa。

## 1.3 接头刚度量测方案

本次模拟主要观察管片结构在外荷载作用下内衬环加固接头力学性能表现，沿管片轴向施加恒定轴力作用后，持续施加竖向荷载逐渐增大，管片在正弯矩作用下接头靠近外弧面一侧压紧形成受压区，内弧面一侧张开变形，产生一定的转角  $\theta$ ，如图 2 所示，主要量测在此荷载下的管片接头内弧面竖向挠度  $a$  和接缝张开量  $2b$ 。

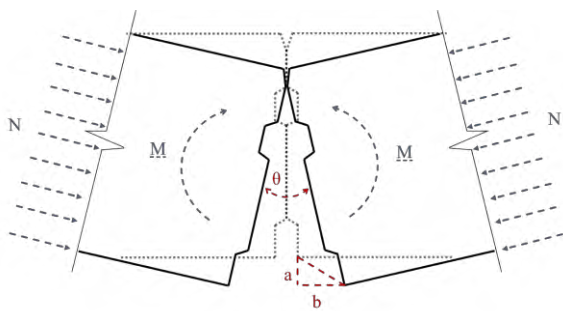


图 2 管片接头受力变形示意图

Fig.2 Diagram of stress deformation of segment joint

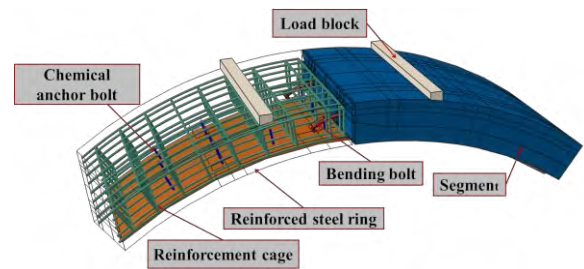
## 2 有限元模型建立

### 2.1 管片接头模型

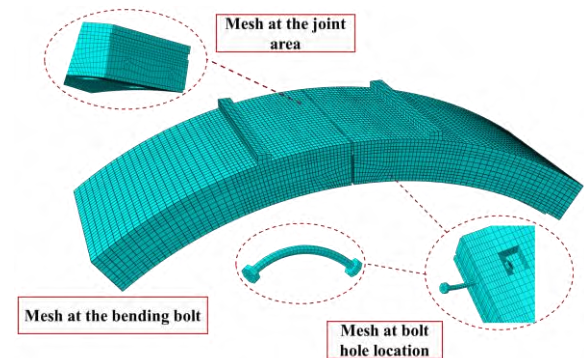
建立管片接头力学性能分析有限元模型，装配体如图 3 (a) 所示，主要部件为两个 1/2 标准块管

片（一侧对应圆心角  $36^\circ$ ，其中内径 5.4 m 外径 6 m），接头用 M30 弯曲螺栓连接，管片接头构造及钢筋笼布置参考图 4。除了粘胶层使用零厚度 Cohesive 单元 (COH3D8)，钢筋笼采用桁架单元 (T3D2)，其他部件包括钢筋混凝土梁、螺栓、加载棒都为三维实体建模，使用 C3D8R 单元。网格划分如图 3(b) 所示。

考虑在钢内衬与钢筋混凝土管片之间，沿管片环向布置锚栓间距 300 mm，并在距离接头中缝面 100 mm 加密一排锚栓，纵向间距 225 mm 同时最外沿锚栓距离钢板边缘 150 mm，标准块上共布置 60 枚锚栓。



(a) Finite element model diagram



(b) Mesh generation

图 3 数值分析模型及网格划分

Fig.3 Numerical analysis model and meshing

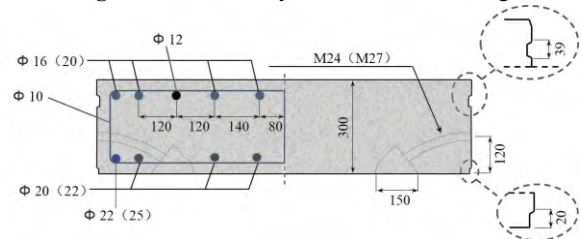


图 4 管片接头构造及钢筋布置图

Fig.4 Segment joint construction and reinforcement layout

### 2.2 模型材料参数选取

管片混凝土采用 CDP 本构模型，锚栓和钢板均采用双折线本构模型，其中锚栓为 M18 化学锚栓。参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟材料参数

Tab.1 Numerical simulation of material parameters

Material Properties	Type	E/GPa	$\mu$	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /Mpa
Concrete	C35	31.5	0.25	-	-
Hoop reinforcement	HRB300	210	0.3	300	-
Longitudinal reinforcement	HRB400	200	0.3	400	-
Steel Plate	Q235	206	0.3	235	-
Anchor bolts	Grade 5.8	210	0.3	400	500

### 2.3 相互作用及边界条件

管片与管片主要考虑垫片、凹凸榫在管片径向抗剪切作用，设置切向“罚”函数摩擦系数为 0.4。加载棒与钢筋混凝土梁之间因保证不发生相对滑移，位置相对固定且不发生穿透，所以采用面面接触中“tie”接触。同理，垫块与钢板面面接触也采用绑定接触。由于螺栓孔壁有 PVC 管保护，并保有一定空隙，所以螺栓与管片间的摩擦系数可取一个较小值 0.1，法向不可穿透。钢筋与混凝土的接触可直接考虑“Embedded”。Cohesive 单元层与其上下表面的接触只需设置为“tie”绑定约束。

模拟过程考虑简支梁的两点加载，所以在两个加载棒面耦合参考点设置位移荷载提高模型计算收敛性的基础上，左侧管片末端耦合参考点设置固定铰接，右侧管片末端耦合参考点设置滑动铰接边界关系。

### 2.4 分析步及量测方案

钢环内衬加固管片接头模型共设置三个施工步，模拟加固隧道管片接头正弯矩力学性能，具体实现过程如下：

Step1: 沿管片接触面中轴线逐级施加至目标轴力  $N$  (恒定为 2 000 kN)，模拟加固管片结构受荷状态，模型加载示意如图 5 所示；

Step2: 模拟加固过程，激活加固钢板及锚栓，以及二者与管片的 cohesive 接触，重新启动分析；

Step3: 通过距离管片接缝面 600 mm 的垫块，逐步施加竖向荷载  $P$ 。

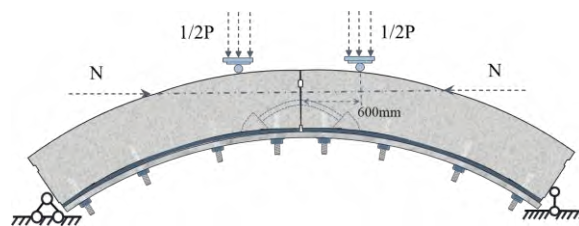


图 5 数值模型加载示意图

Fig.5 Schematic diagram of numerical model loading

## 3 粘胶加固管片接头参数分析

### 3.1 未加固管片接头破坏模式

外荷载作用下的钢筋混凝土结构，其荷载主要由混凝土和钢筋共同承担，但是地铁隧道一般采用盾构法自动化拼装分段式管片而成，其接缝部位只能以螺栓代替钢筋分担结构所受拉力，也正是由于其结构的不连续性，管片接头所受的轴力和弯矩大小，直接影响了混凝土受压区大小。如图 6 所示，加载初期管片损伤主要是手孔和加载点下方出现的竖向微损伤，伴随着竖向荷载不断增加，结构弯矩逐渐抵消接缝面的压力，接缝处混凝土有全截面受压转变为靠近外弧面一侧受压，手孔和加载点下方的竖向损伤增长，同时螺栓孔上方的混凝土与螺栓相互作用产生损伤，当结构整体临近屈服时，加载点下方损伤明显。

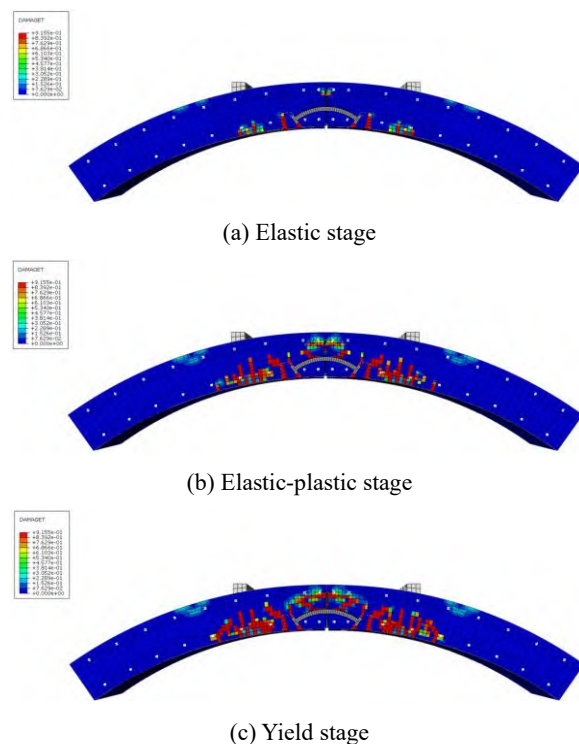


图 6 轴力 2 000 kN 下管片接头塑性损伤发展

Fig.6 Plastic damage development of segment joint under axial force of 2 000 kN



### 3.2 钢板厚度对加固的影响

为研究加固钢板厚度对加固效果的影响，共设置了 10, 20, 30 mm 三种不同厚度的钢板，通过对加固前后的外荷载条件下结构损伤发展、竖向挠度和接缝张开量进行分析。

如图 7 所示，对比不同钢板厚度下极限状态管片接头的损伤可知，当钢板厚度为 10 mm 时，在外荷载作用管片接头范围内的损伤主要是接头处外弧面的混凝土受压破坏所致，其中接缝处钢板应力为 409 MPa，靠近接缝处锚栓应力为 476 MPa，都较支座处大；当钢板厚度为 20, 30 mm 时，随外荷载作用下，结构所受弯矩不断增大，后期结构损伤主要集中在接缝面、手孔附近和加载点下方，钢板厚度超过 20 mm 并未引起结构损伤模式有较大变化，30 mm 钢板应力在远离接缝面的支座处为 410 MPa，此处锚栓应力为 483 MPa，较接缝处大，证明该厚度下钢板能充分发挥组合结构受力优势。

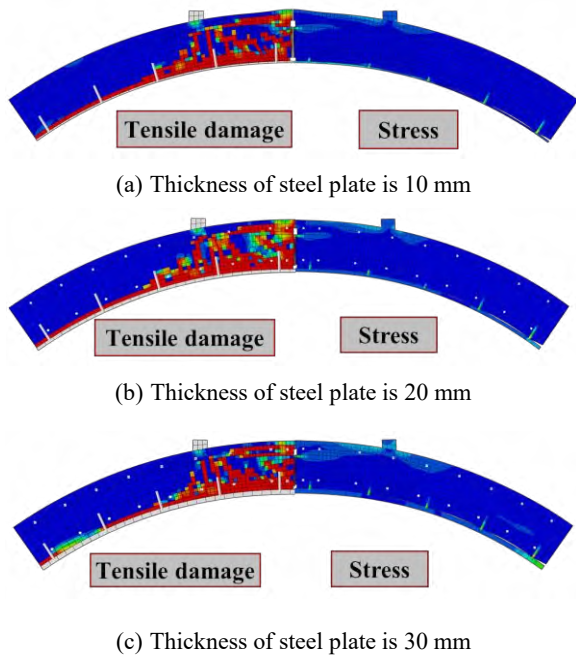
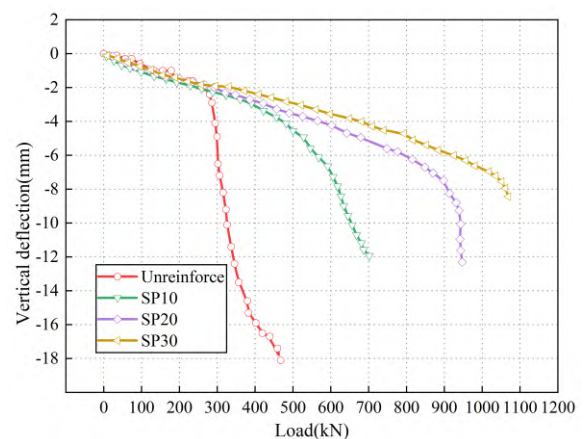


图 7 不同钢板厚度管片裂缝及塑性应变

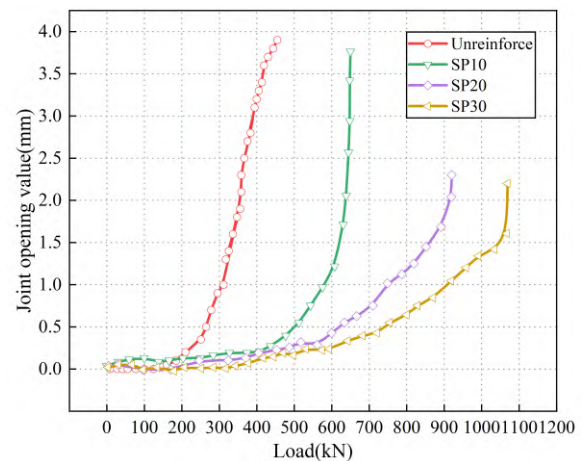
Fig.7 Crack and plastic strain of segments with different thickness of steel plate

对比未加固管片接头的挠度变化，在加载初期（图 8(a)所示），由于轴力作用管片接头整体变形较小，接缝竖向挠度和张开量较小，直到加载竖向荷载 200 kN，弯矩在接头处克服轴力作用，接缝处开始发生形变，直到 286 kN 后曲线出现明显拐点。随着荷载竖向扰度从 2.1 mm 增加，未加固管片最终极限荷载 481 kN，此时竖向扰度为 18 mm。而采用钢环加固的 SP10、SP20、SP30 其最终极限荷载分别为 700, 940 kN 和 1 080 kN。同时比较图 8(b)发

现结构的接缝张开量在到达极限荷载都比较接近，在 2~4 mm 间。在接缝张开量为 2 mm 时，未加固管片荷载达到 368 kN，而 SP10 为 627 kN、SP20 为 918 kN、SP30 为 1 080 kN，加固接头的抗弯刚度明显提高，10 mm 钢板可提升接头刚度 40%。但是在加载后期，随钢板厚度增加管片接头处的极限荷载并非呈线性变化，荷载增加但不同钢板厚度加固后管片接头的承载力提升幅度下降，且采用 20 mm 和 30 mm 钢板加固管片接头的极限荷载提升都在 100% 左右，钢板厚度达到一定程度后，管片接头的破坏模拟变为正截面小偏心受压，接缝破坏由受压区混凝土控制，所以提升钢板厚度虽然可以改善结构受力但是难以避免管片接头受压区的局部破坏。



(a) Vertical deflection



(b) Joint opening value

图 8 不同钢板厚度条件下管片接头刚度变化

Fig.8 Change in stiffness of segment joints under different steel plate thicknesses

### 3.3 锚栓强度的影响

在确保每个标准块布置 60 枚锚栓的基础上，通过设置 M16、M20、M22 不同直径的锚栓，改变加固管片接头与钢板直接连接抗剪刚度，分析锚栓

强度是否会引起组合受力结构破坏模式变化。

如图 9 所示,对比不同锚栓强度下极限状态管片接头的损伤可知,当锚栓直径为 10 mm 时,在外荷载作用管片接头范围内的损伤主要是接头处外弧面的混凝土受压破坏所致,这与采用弱钢板条件下一致;当钢板厚度为锚栓直径为 16, 22 mm 时,随外荷载作用下,结构所受弯矩不断增大,后期结构损伤主要集中在接缝面、手孔附近和加载点下方,锚栓直径超过 16 mm 并未引起结构损伤模式有较大变化,其结果与 SP20 结果一致,对比极限状态下支座处锚栓应力,都在 485 MPa 附近。在能保证锚栓提供足够界面作用力的基础上,提高锚栓强度对结构影响不大。钢板应力集中在远离接缝面的支座处,证明 M16 的化学锚栓能在钢板和混凝土管片之间建立有效连接。

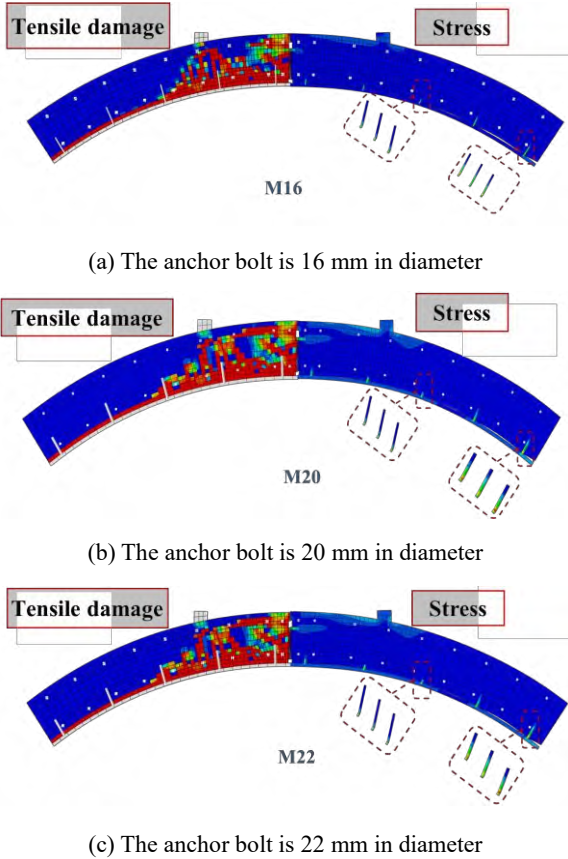


图 9 不同锚栓强度管片裂缝及塑性应变

Fig.9 Cracks and plastic strain of pipe segments with different anchor bolt strengths

## 4 结论

文章采用 ABAQUS 三维数值软件建立了常见钢内衬装配式隧道管片接头模型。基于荷载-结构计算模型对钢内衬加固管片接头力学性能开展了研究,主要分析了环向钢板厚度及锚栓强度对隧道衬砌加固效果的影响,得到如下结论:

1) 当钢板厚度为 20, 30 mm 时,外荷载作用下结构所受弯矩不断增大,后期结构损伤主要集中在接缝面、手孔附近和加载点下方。钢板厚度超过 20 mm 并未引起结构损伤模式有较大变化,钢板应力集中在远离接缝面的支座处,证明了该厚度下钢板能充分发挥组合结构受力优势;

2) 当加固接头抗弯刚度明显提高时,10 mm 厚的钢板接头刚度可提升 40%,但当钢板厚度达到一定程度后,管片接头的破坏模拟变为正截面小偏心受压,接缝破坏由受压区混凝土控制;

3) 只要保证能使管片和刚性加固体间有效连接,继续增加锚栓强度对结构受力损伤状态影响不大。

## 参考文献:

- [1] 城市轨道交通 2021 年度统计和分析报告[J].城市轨道交通,2022,(07):10-15.  
Annual Statistical and Analytical Report on Urban Rail Transit 2021[J]. Urban Rail Transportation,2022, (07):10-15.
- [2] 葛双双,高玮,汪义伟,等.我国交通盾构隧道病害、评价及治理研究综述[J].土木工程学报,2023,56(01):119-128.  
Ge Shuangshuang,Gao Wei,Wang Yiwei,et al. A review of the research on disease, evaluation and management of transportation shield tunnels in China[J]. Journal of Civil Engineering,2023,56(01):119-128
- [3] 袁敬强,陈卫忠,谭贤君,等.软弱地层注浆的细观力学模拟研究[J].岩土力学,2011,32(S2):653-659.  
Yuan Jingqiang, Chen Weizhong, Tan Xianjun, et al. Fine-scale mechanical simulation study of grouting in soft strata[J]. Geotechnics,2011,32(S2):653-659.
- [4] 李芹峰,柳献,许熠.隧道结构受损补强加固措施的演变和发展浅析[J].隧道与轨道交通,2021,(S2):5-9.  
LI Qinfeng,LIU Xian,XU Yi. An analysis of the evolution and development of reinforcement and strengthening measures for damaged tunnel structures[J]. Tunneling and Rail Transportation,2021,(S2):5-9.
- [5] 黄大维,赵棣,徐长节,等.侧部注浆对已建盾构隧道受荷变形影响试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(03):510-518.  
Huang D. W., Zhao J., Xu C. J., et al. Experimental study on the effect of lateral grouting on the loading and deformation of constructed shield tunnels[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(03):510-518.
- [6] 毕湘利,柳献,王秀志,等.内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J].土木工程学

- 报,2014,47(11):128-137.
- BI Xiangli, LIU Xian, WANG Xiuzhi, et al. Footprint test study on ultimate bearing capacity of shield tunnel structure reinforced by internal tension steel ring[J]. Journal of Civil Engineering,2014,47(11):128-137.
- [7] 柳献,张晨光,张衍,等.复合腔体加固盾构隧道纵缝接头试验研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(02):376-383.  
Liu Xian, Zhang Chenguang, Zhang Yan, et al. Experimental study on longitudinal joints of shield tunnel reinforced with composite cavity[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2015,12(02):376-383
- [8] 刘梓圣,张冬梅.软土盾构隧道芳纶布加固机理和效果研究[J].现代隧道技术,2014,51(05):155-160.  
Liu Z S, Zhang D M. Research on the mechanism and effect of aramid fabric reinforcement in soft soil shield tunnel[J]. Modern Tunnel Technology,2014,51(05):155-160.
- [9] 张国伟,黄金涛,薛红京,等.预应力碳纤维织物增强混凝土板加固受弯梁设计理论研究[J/OL].清华大学学报(自然科学版),1-10  
Zhang Guowei, Huang Jintao, Xue Hongjing, et al. Research on design theory of prestressed carbon fiber fabric reinforced concrete slab for bending beam [J/OL]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition),1-10
- [10] 周朝阳,王美玲,杨锦飞,等.纤维布粘包钢板抗弯加固钢筋混凝土梁探索性试验[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(12):4732-4742.  
Zhou C Y, Wang M L, Yang J F, et al. Exploratory test on flexural reinforcement of reinforced concrete beams with fiber cloth bonded steel plate [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2023,54(12):4732-4742.
- [11] 蔡荣,刘学增,杨学良,等.卸载条件下地铁盾构隧道损伤机制及粘钢加固效果研究[J/OL].铁道标准设计,1-10.  
Cai R, Liu XZ, Yang XL, et al. Study on damage mechanism and effect of viscous steel reinforcement in subway shield tunnel under unloading condition[J/OL]. Railway Standard Design,1-10.
- [12] 梁国卿,赵俊宇,毛国辉,等.波纹钢板加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验与数值分析[J].华东交通大学学报:1-9.  
Liang Guoqing, Zhao Junyu, Mao Guohui, etc. Experimental and numerical analysis on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with corrugated steel plates [ J]. Journal of East China Jiaotong University: 1-9.
- [13] 邱子乐,雷明锋.腐蚀隧道衬砌结构槽钢加固法试验研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(06):2188-2197.  
Qiu Zile, Lei Mingfeng. Experimental study on channel steel reinforcement method for corroded tunnel lining structure [ J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023,20 (06 ) : 2188-2197.
- [14] 柳献,张晨光,张宸,等.FRP 加固盾构隧道纵缝接头试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(02):316-324.  
LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Chen, et al. Experimental study on longitudinal joints of FRP-reinforced shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2016,13(02):316-324.
- [15] 翟五洲,翟一欣,张东明,等.盾构隧道钢板加固衬砌管片环缝抗剪性能数值模拟研究 [J].岩土工程学报,2019,41(S2):235-239.  
Zhai Wuzhou, Zhai Yixin, Zhang Dongming, et al. Numerical simulation study on the shear performance of annular joints of steel plate reinforced lining pipe sheet in shield tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(S2):235-239.
- [16] 刘庭金,黄鸿浩,许饶,等.粘贴钢板加固地铁盾构隧道承载性能研究[J].中国公路学报,2017,30(08):91-99.  
LIU Tingjin, HUANG Honghao, XU Rao, et al. Study on bearing performance of metro shield tunnel reinforced with adhesive steel plate[J]. Chinese Journal of Highway,2017,30(08):91-99.
- [17] 刘学增,李振,游贵良,等.不同损伤程度下公路隧道粘钢加固效果试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(02):243-251+441.  
Liu Xue-Zeng,Li Zhen, You Gui-Liang, et al. Experimental study on reinforcement effect of reinforced steel in highway tunnels with different damage degrees[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(02):243-251+441. (in Chinese)
- [18] 刘德军,张杨,左建平,等.基于 N-M 曲线的盾构隧道正截面承载性能加固评价及演化规律[J].中国矿业大学学报,2023,52(01):76-85.  
Liu Dejun, Zhang Yang, Zuo Jianping, et al. Reinforcement evaluation and evolution law of normal section bearing performance of shield tunnel based on N-M curve [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019,52(01):76-85.
- [19] ZHAO Huiling, LIU Xian, BAO Yihai, et al. Simplified nonlinear simulation of shield tunnel lining reinforced by epoxy bonded steel plates[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 362-371.

- [20] ZHANG Dongming, ZHAI Wuzhou, HUANG Hongwei, et al. Robust retrofitting design for rehabilitation of segmental tunnel linings: using the example of steel plates[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 231–242.
- [21] LIU Dejun, WANG Fei, ZHANG Dongming, et al. Interfacial stresses of shield tunnel strengthened by a thin plate at inner surface[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 103021.
- [22] 孙雅珍, 于阳, 王金昌, 等. 考虑界面效应的内张钢圈加固盾构管片结构力学性能研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 343–351.
- SUN Yazhen, YU Yang, WANG Jinchang, et al. Mechanical properties of linings of shield tunnel strengthened by steel plates considering interface effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 343–351.
- [23] 刘学增, 李振, 杨芝璐. 盾构隧道钢板加固黏结面作用机制与参数影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10): 3987–3999.
- Liu Xue-Zeng, Li Zhen, Yang Zhilu. Action mechanism

and parameter influence analysis of steel plate reinforced bonding surface for shield tunnel [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2023, 54(10): 3987–3999.



**第一作者:** 刘敬倬 (1985—), 男, 汉族, 江西吉安人, 高级工程师, 本科。E-mail: 53589478@qq.com



**通信作者:** 徐长节 (1972—), 男, 二级教授, 博士生导师。研究方向为土动力学理论及工程应用、基坑工程、隧道工程等。现任华东交通大学党委副书记、校长。教育部“长江学者”特聘教授、国家杰出青年基金获得者, 中组部“万人计划”科技领军人才, 国务院特殊津贴获得者。E-mail: xucj@zju.edu.cn