

文章编号: 1005-0523(2025)06-0058-08



钢板套衬加固隧道管片接头力学行为及损伤发展

张仕雄¹, 徐松^{2,3}, 陈佳¹, 郑凤曲^{2,3}, 朱碧堂^{2,3}, 黄春强⁴, 奉小华¹, 刘阳峰²

(1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;

3. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013;

4. 江西省天驰高速科技发展有限公司, 江西 南昌 330103)

摘要:为研究钢板的厚度和锚固件强度对盾构隧道接头部位加固效果,采用三维数值软件Abaqus,建立了内径5.4 m、外径6.0 m左右各1/2标准块管片接头模型,详细探讨了钢板黏胶加固地铁隧道管片接头的力学行为。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,使用10 mm厚的钢板能使接头刚度增强40%;当钢板厚度介于20~30 mm时,结构承受的弯矩随外部荷载的增加也逐渐增大;当钢板厚度超过20 mm后,结构损伤模式变化不大,钢板的应力主要集中在远离接缝面的支座区域。此外,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。该研究可为采用钢环内衬加固的盾构管片设计提供理论支持。

关键词:锚栓;钢板套衬;加固隧道;管片接头;力学行为;损伤发展

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

本文引用格式: 张仕雄, 徐松, 陈佳, 等. 钢板套衬加固隧道管片接头力学行为及损伤发展[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(6): 58-65.

Mechanical Behavior and Damage Development of Steel Plate Liner Reinforced Tunnel Segment Joints

Zhang Shixiong¹, Xu Song^{2,3}, Chen Jia¹, Zheng Fengqu^{2,3}, Zhu Bitang^{2,3}, Huang Chunqiang⁴,
Feng Xiaohua¹, Liu Yangfeng²

(1. Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

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

3. State key laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Jiangxi Tianchi Highway Technology Development Co., Ltd., Nanchang 330103, China)

Abstract: To study the reinforcement effect of steel plate thickness and anchor strength on the joint of shield tunnel, this study used Abaqus finite element software to establish left and right half standard block pipe joint models with an inner diameter of 5.4 m and an outer diameter of 6.0 m. Based on a load structure calculation model, the mechanical properties of subway tunnel segment joints reinforced with steel plates and adhesive were studied. The results show that the mechanical properties of the segment joint after reinforcement are affected by the concrete matrix, steel plate and anchor bolt. The use of 10 mm thick steel plate can increase the stiffness of the

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 国家重点研发计划资助(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)

joint by 40%. When the thickness of the steel plate is in the range of 20~30 mm, the bending moment of the structure increases with the increase of the external load. When the thickness of the steel plate exceeds 20 mm, the damage mode of the structure does not change much, and the stress of the steel plate is mainly concentrated in the bearing area away from the joint surface. In addition, when the number of anchor bolts is fixed, the increase of diameter can effectively improve the cooperative force of segment joints after reinforcement. Due to the limitation of concrete strength in the compression zone, the effectiveness of further increasing the steel plate thickness diminishes, resulting in a decreasing rate of improvement in joint stiffness. The thickness of 10~20 mm steel plate is the best. This study can provide theoretical support for the design of segmental segments reinforced by steel ring lining.

Key words: anchor bolt; steel plate liner; reinforcing the tunnel; segment joint; mechanical behavior; damage development

Citation format: ZHANG S X, XU S, CHEN J, et al. Mechanical behavior and damage development of steel plate liner reinforced tunnel segment joints[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(6): 58–65.

伴随众多地铁隧道的建造与启用,在盾构施工偏差、周边工程活动、地面超载、水土压力等多种因素的长期共同作用下,许多隧道随着服役年限的增长,出现了渗漏水、管片破损、显著变形及道床悬空等问题^[1],严重威胁到行车安全与运行效率,迫切需要修复与加固措施。作为城市重要的公交设施及人防工程,城市地下隧道对安全性能有着极高的要求。为了保持地铁隧道的服役性能,确保隧道具备足够的横向刚度以抵御隧道管片的变形至关重要。然而,由于横向刚度不足,隧道仍然出现了较多的病害。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。

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^[2]和刚性补强^[3]两大类。地层注浆加固能有效调整隧道的变形,同时恢复结构形态并调整地层应力分布^[4]。刚性补强加固方法主要有内张钢圈加固^[5]、复合腔体加固^[6]、芳纶布加法^[7]、碳纤维布加固^[8],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^[9]。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^[10]、波纹钢板^[11-12]、槽钢^[13]等钢材。

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^[14-19],但

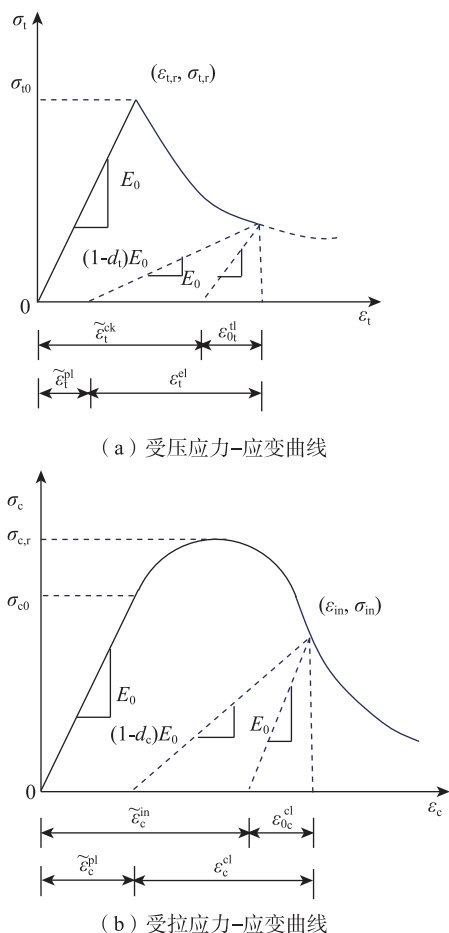
针对锚粘钢套衬加固隧道管片接头后形成的组合结构,其力学传递机理的研究尚不充分,尤其是加固衬砌在荷载作用下的损伤演化机理,以及锚栓和黏胶界面的贡献机制仍不明确。Zhao等^[20]针对加固后钢混组合结构黏结界面行为采用梁-弹簧单元;Liu等^[21]采用了三维实体单元模拟混合结构承载力变化;孙雅珍等^[22]采用cohesive单元模拟了界面损伤变化;刘学增等^[23]在cohesive单元基础上研究了trace单元下界面性能对承载力性能影响,但上述研究都未涉及到钢环内衬加固后既有隧道自身的损伤发展变化。

因此,为了增强运营隧道的加固手段,促进钢环内衬加固技术的进步和工程应用,并为设计钢环内衬加固分段式管片给与理论支持,本文考虑黏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

当探讨混凝土在单轴力作用下的应力与应变关系时,通常采用的是混凝土塑性损伤模型(concrete damaged plasticity model, CDP模型)。依据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)对CDP模型的参数进行了研究,并据此绘制出了CDP应力-应变关系曲线,结果如图1所示。

图1 应力-应变曲线(CDP模型)^[24]Fig. 1 Stress-strain relationship curve of concrete (CDP model)^[24]

1.2 内聚力本构模型

断裂力学领域中,内聚力本构大量用来表征复材的交接界面,可应用内聚力与张开位移阐述其力学行为,能够清晰揭示界面的相对滑动、破坏以及剥落现象,以此来模拟环氧黏胶界面损伤演化特性。

黏胶损伤是指环氧黏胶层在应力超过其黏结强度后发生的张开、失效乃至剥离的过程。黏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 $D=0$ 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为

$$\begin{cases} t_n = \begin{cases} (1-D)K_{nn}\delta_n, & \delta_n \geq 0 \\ K_{nn}\delta_n, & \delta_n < 0 \end{cases} \\ t_s = (1-D)K_{ss}\delta_s \\ t_t = (1-D)K_{tt}\delta_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{tt} , K_{nn} , K_{ss} 均为界面不同方向上的刚度。

本研究所采用的黏胶材料之间的拉伸抗剪强度标准值达到 16.6 MPa,而钢与 C45 混凝土之间的正向拉伸黏结强度则为 3.9 MPa。

1.3 接头刚度量测方案

本文旨在评估内衬钢环加固后管片接头在外部荷载下的力学行为。如图2所示,首先对管片施加一个稳定的轴向力,然后逐渐增加竖向荷载。在这个过程中,管片在正弯矩的影响下,接头靠近外弧面的部分会被压缩,形成受压区域,内弧面的部分则会张开并发生变形,形成一个转角 θ 。本文主要测量的是在这种荷载条件下,管片接头内弧面的垂直变形 a 以及接缝的张开距离 $2b$ 。

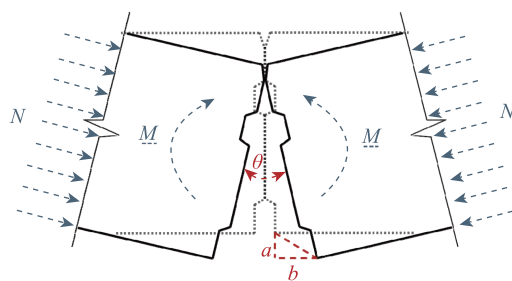


图2 管片接头受力变形示意图

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

如图3(a)所示,建立了隧道管片接头的数值模型,该模型包含两块标准管片(内径 5.4 m, 外径 6.0 m),采取型号为 M30 的螺栓串连接头,管片接头结构和钢筋笼的布局如图4所示。COH3D8 单元和 T3D2 单元分别用来构建黏结层和钢筋笼, C3D8R 单元用来构建钢砼梁、弯曲螺栓、加载棒的三维实体模型,网格划分详见图3(b)。

在钢内衬与钢筋砼管片间环向设置锚栓,其间距 300 mm,并于离接头中心缝面 100 mm 的位置增设一排加密锚栓,其纵向间距为 225 mm。此外,最外侧锚栓与钢板边缘的距离保持在 150 mm,每个标准块上分别配置了 60 枚锚栓。

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。

2.3 相互作用及边界条件

在管片连接的设计中,径向的抗剪力关键依靠

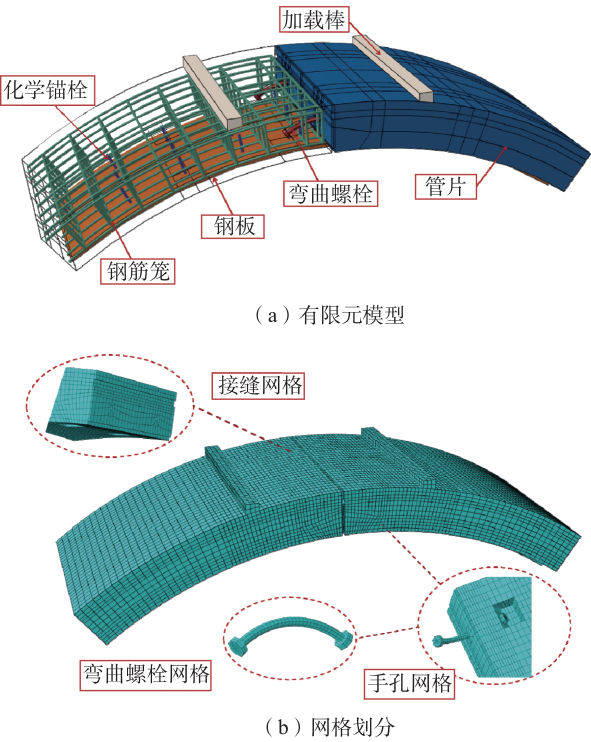


图3 数值分析模型及网格划分
Fig. 3 Numerical analysis model and meshing

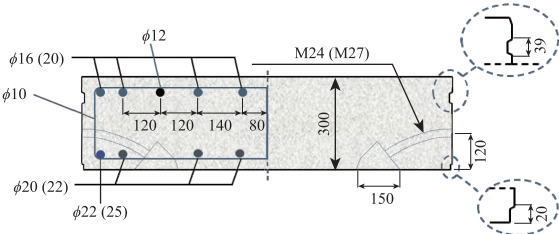


Fig. 4 Segment joint construction and reinforcement layout (Unit: mm)

表1 锚栓材料参数

Tab.1 Material parameters of anchor bolt

材料属性	类型	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa
混凝土	C35	31.5	0.25	—	—
箍筋	HRB300	210.0	0.30	300	—
纵筋	HRB400	200.0	0.30	400	—
钢板	Q235	206.0	0.30	235	—
锚栓	5.8级	210.0	0.30	400	500

垫片与凹凸榫提供,同时设定了一个切向摩擦系数“罚”值为0.4,采用“tie”接触方式保持加载棒与钢砼梁的位置固定且不穿透。考虑到螺栓孔外面套有PVC管且两者之间存在适当的间隙,故此处设定

参数值为0.1的摩擦值。为提升计算收敛效率,本文在两个加载棒表面设置耦合参考点,并施加位移荷载。同时,在右侧管片末端设置滑动铰接,另一侧则为固定铰接。

2.4 分析步骤与测量方法

为了研究接头在正弯矩作用下的力学行为,本文对接头模型布设了如下步骤:

- 步骤1:如图5所示,为了模拟加固管片结构受荷状态,顺着管片接触面的中轴线加载2 000 kN的恒定轴力 N ;
- 步骤2:依次启动钢板、锚栓及其与隧道加固管片之间的连接,并重新开始分析;
- 步骤3:在管片界面上端600 mm位置放上垫块并慢慢加载 P 。

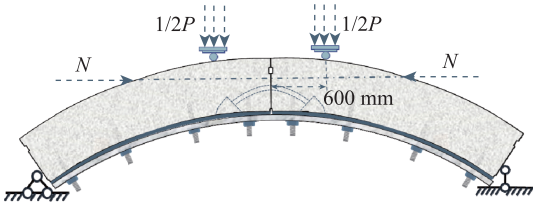


图5 数值模型加载示意图
Fig. 5 Numerical model loading diagram

3 黏胶加固管片接头参数分析

3.1 未加固管片接头破坏模式

在外部荷载作用下,钢筋混凝土结构的承载力由混凝土和钢筋共同提供。然而,地铁隧道施工常采用盾构技术,通过自动化拼接分段式管片构建,其中接缝处利用螺栓替代钢筋来分担拉力。这种结构的非连续性特点,使得管片接头的轴力与弯矩大小直接关联到混凝土受压区域的范围。如图6所示,荷载初期,管片的主要损伤表现为手孔及加载点下方的轻微竖向裂痕。随着垂向荷载的持续增大,结构弯矩逐渐减弱接缝面的压力效应,导致界面砼受压状态由均匀受压转为外弧面单侧受压,手孔和加载处下面区域的垂向裂痕加剧,螺栓孔周边的砼因和螺栓的互为影响而出现损伤。当结构接近屈服极限时,加载点下方的损伤变得尤为显著。

3.2 钢板厚度对加固的影响

先后设置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。从图7可以发现:钢板厚度为10 mm的情况下,损伤大都集中

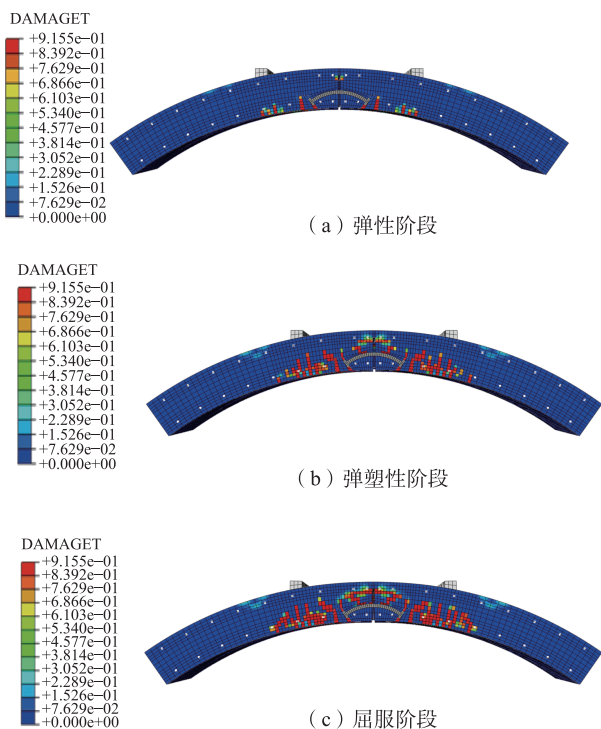


图6 接头损伤发展(轴力 2 000 kN)

Fig. 6 Joint damage development (axial force 2 000 kN)

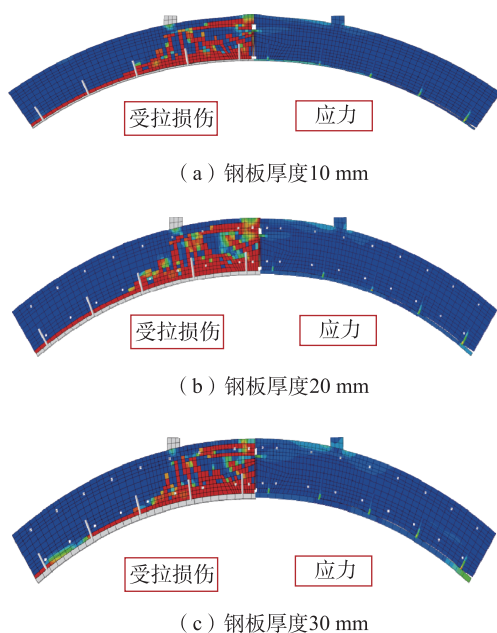


图7 不同钢板厚度管片裂缝及塑性应变

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

于界面外弧面的砼受压区域,此时接缝部位的钢板应力达到 409 MPa,而相邻锚栓的应力也高达 476 MPa,均超过了支座处的应力水平。当钢板厚度增加至 20 mm 和 30 mm 时,结构所能承受的极限

弯矩随外部荷载的增加而显著提高,损伤则大都分布在接缝面、手孔以及加载点周围区域。值得注意的是,钢板厚度超过 20 mm 后,并未显著改变损伤分布模式。在 30 mm 钢板的情况下,远离接缝的支座区域钢板应力达到 410 MPa,该区域的锚栓应力也升至 483 MPa,高于接缝处的应力值,这显示此厚度对应的钢板能够更有效地利用组合结构的承载能力。

从图 8(a)可以看出,在加载的初始阶段,轴力的影响导致管片接头的整体变形并不显著,接缝的竖向挠度和张开程度也偏低。然而,当竖向荷载增加到 200 kN 时,弯矩在接头处开始占据主导,逐渐克服了轴力的作用,接缝处开始发生形变,直到 286 kN 后曲线出现明显拐点。随着荷载竖向挠度从 2.1 mm 增加,未加固管片最终极限荷载 481 kN,

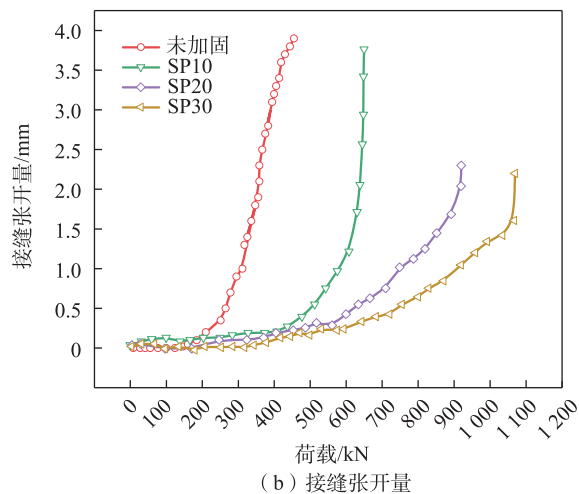
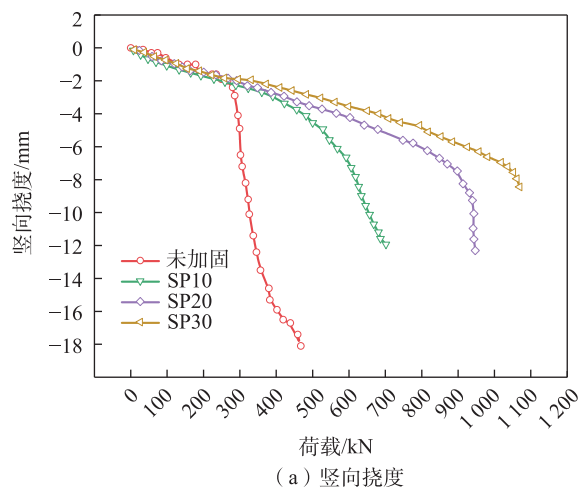


图8 不同钢板厚度条件下管片接头刚度变化

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

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,为2~4 mm。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,经钢板加固后,管片接头的抗弯刚度显著提升。然而,在加载过程的后期阶段,随着板厚增加管片接头的极限荷载并未呈现线性增长趋势。尽管荷载值有所上升,但不同厚度钢板加固后接头的承载力提升幅度却逐渐减小。随着钢板厚度的增加,管片接头的破坏模式转变为以正截面小偏心受压为主,其极限状态由受压区混凝土的压溃所控制。因此,尽管增加钢板厚度能够改善结构的受力状态,但并不能完全防止管片接头受压区发生局部破坏。

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M10、M16、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。

从图9可以看出:使用直径为10 mm的锚栓时,损伤大都由砼受压区域引起,这与使用较弱钢板的情况相似。然而,随着直径增至16~22 mm,外力下

的结构弯矩逐渐变大,损伤主要发生在接缝面、手孔及加载点周围区域。当直径大于16 mm,其没有显著影响结构损伤模式,极限状态下支座处锚栓的应力均接近485 MPa。这表明满足一定条件前提下,增加锚栓强度对结构的影响是有限的。

4 结论

本文采用Abaqus三维数值软件建立了典型的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) 对于厚度为20 mm和30 mm的钢板,随着外力增加结构弯矩逐渐提高,且主要损伤区域集中在接缝面、手孔周边及加载点正下方区域。值得注意的是,钢板厚度从20 mm增加时,并未显著改变结构的损伤模式,而应力主要集中在远离接缝的支座区域,这进一步验证了在此厚度范围内,钢板能充分展现其在组合结构中的承载效能。

2) 当使用10 mm厚的钢板进行加固时,接头的抗弯刚度显著提高,刚度提升了40%。然而,随着钢板厚度的增加,接头处受力状态处于正截面小偏心受压,此时接缝的破坏主要由受压区的混凝土所主导。

3) 在确保管片与刚性加固体之间实现有效连接的前提下,进一步增大锚栓强度对结构的整体受力状态与损伤发展影响均不显著。

参考文献:

- [1] 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(1):119-128.
GE S S, GAO W, WANG Y W, et al. Review on evaluation and treatment of traffic shield tunnel defects in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 119-128.
- [2] 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 J Q, CHEN W Z, TAN X J, et al. Mesomechanical simulation of grouting in weak strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 653-659.
- [3] 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.

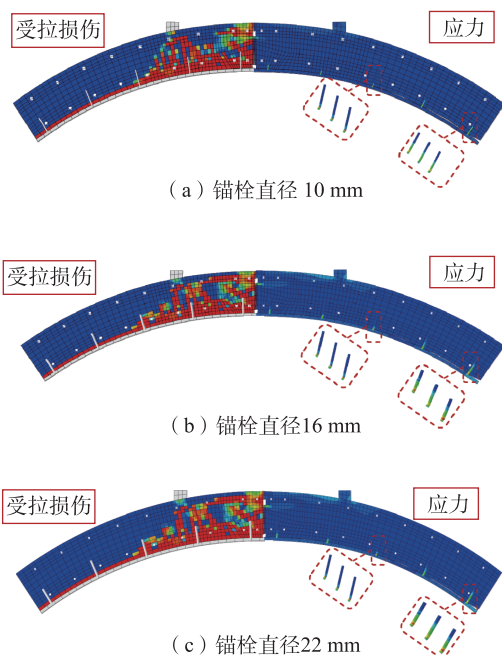


图9 不同锚栓强度管片裂缝及塑性应变

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

- LI Q F, LIU X, XU Y. Analysis on the evolution and development of reinforcement measures for damaged tunnel structure[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S2): 5-9.
- [4] 黄大维, 赵赓錡, 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(3): 510-518.
- HUANG D W, ZHAO Z Q, XU C J, et al. Experimental study on influences of side grouting on deformation of shield tunnels under loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 510-518.
- [5] 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 X L, LIU X, WANG X Z, et al. Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 128-137.
- [6] 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(2): 376-383.
- LIU X, ZHANG C G, ZHANG Y, et al. Experimental study on the longitudinal joint of shield tunnels reinforced with composite cavity[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 376-383.
- [7] 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(5): 155-160.
- LIU Z S, ZHANG D M. The mechanism and effects of AFRP reinforcement for a shield tunnel in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 155-160.
- [8] 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]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(9): 1617-1626.
- ZHANG G W, HUANG J T, XUE H J, et al. Design theory of reinforced concrete beams strengthened with pre-stressed carbon textile reinforced concrete plates[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(9): 1617-1626.
- [9] 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. Pilot tests on reinforced concrete beams strengthened in flexure with FRP-enveloped steel plates[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(12): 4732-4742.
- [10] 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]. 铁道标准设计, 2025, 69(9): 163-171.
- CAI R, LIU X Z, YANG X L, et al. Investigation of damage mechanism of subway shield tunnel under unloading conditions and reinforcement effect of bonded steel plates[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(9): 163-171.
- [11] 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, 2024, 41(4): 36-44.
- LIANG G Q, ZHAO J Y, MAO G H, et al. Experiment and numerical study on the flexural performance of concrete beams reinforced with corrugated steel plates[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 36-44.
- [12] 黄文红, 徐松, 徐长节, 等. 波纹钢板套衬加固大断面隧道衬砌力学性能[J]. 铁道建筑, 2024, 64(9): 108-113.
- HUANG W H, XU S, XU C J, et al. Mechanical properties of large section tunnel reinforced by corrugated steel plate lining[J]. Railway Engineering, 2024, 64(9): 108-113.
- [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(6): 2188-2197.
- QIU Z L, LEI M F. Experimental study on reinforcement method with channel steel for corrosion tunnel lining structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2188-2197.
- [14] SUN Y, XU S, XU C J, et al. Study on the stress and deformation of surrounding rock and support structure of super large section tunnels based on different excavation methods[J]. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7025.
- [15] 彭博, 喻义天, 徐松, 等. 考虑土拱效应的超大断面隧道上覆土影响因素分析[J]. 铁道建筑, 2024, 64(6): 119-122.
- PENG B, YU Y T, XU S, et al. Analysis on influence factor of overlying soil of super large section tunnel considering soil arching effect[J]. Railway Engineering, 2024, 64(6): 119-122.
- [16] 文旭卿, 徐松, 徐长节, 等. 超大断面隧道施工方法模拟与工序分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 426-434.
- WEN X Q, XU S, XU C J, et al. Construction method simulation and process analysis of the ultra-large tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(S2): 426-434.
- [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(2): 243-251, 441.
- LIU X Z, LI Z, YOU G L, et al. Experimental study on

- reinforcement effects of bonded steel plates of highway tunnels under different damage degrees[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 243-251, 441.
- [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(1): 76-85.
- LIU D J, ZHANG Y, ZUO J P, et al. Strengthening evaluation and evolution law of the bearing capacity of the normal section of the shield tunnel based on N-M curve [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 76-85.
- [19] ZHANG D M, ZHAI W Z, HUANG H W, 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.
- [20] ZHAO H L, LIU X, BAO Y H, 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.
- [21] LIU D J, WANG F, ZHANG D M, 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 Y Z, YU Y, WANG J C, 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 X Z, LI Z, YANG Z L. Analysis on mechanism and parameter influence of bonding surface of a shield tunnel reinforced by steel plates[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(10): 3987-3999.
- [24] 刘阳峰. 地铁隧道钢环内衬加固力学特性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- LIU Y F. Study on mechanical properties of steel ring lining reinforcement for metro tunnel[J]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.



第一作者: 张仕雄(1979—), 男, 工程师, 研究方向为桥梁工程等。E-mail: 382151035@qq.com。



通信作者: 徐松(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为路基动力学及隧道等地下结构工程。E-mail: sxu@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 吴海燕)