

# 不同锚栓布置下钢板加固的盾构隧道管片纵缝接头试验研究\*

王金龙<sup>1</sup> 甘海杰<sup>2</sup> 孙雪兵<sup>1</sup> 姜英豪<sup>1</sup> 柳 献<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海)

**摘 要** [目的] 针对目前常用的盾构管片钢板加固法存在的界面黏结薄弱、传力不明确等问题, 有必要开展不同锚栓布置下钢板加固的盾构隧道管片纵缝接头(以下简称“接头”)的足尺试验, 同时对现有锚栓布置方式优化设计。[方法] 从试件设计、加固方法、加载设备及测试与加载方案等方面, 详细介绍了钢板加固的盾构隧道管片纵缝接头试验。针对正弯矩和负弯矩等不同受力状态下的纵缝, 采用不同锚栓布置方式, 开展接头极限承载力试验研究。对比分析加固结构的受力性能和破坏模式, 揭示其破坏机理, 并评估不同锚栓布置下的加固效果。[结果及结论] 对承受正弯矩作用的钢板加固的盾构隧道管片, 增加纵缝两侧的锚栓布置, 能够提升接头的承载能力, 增幅为 8%; 对承受负弯矩作用的钢板加固的盾构隧道管片, 减少纵缝两侧的锚栓布置, 接头的承载能力未降低; 针对不同锚栓布置下钢板加固的盾构隧道管片接头, 黏结强度是加固结构的关键性能指标。

**关键词** 轨道交通; 盾构隧道管片; 纵缝接头试验; 锚栓布置

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230551

## Longitudinal Joint Experiment of Shield Tunnel Segments Reinforced with Steel Plates under Different Anchor Bolt Arrangements

WANG Jinlong<sup>1</sup>, GAN Haijie<sup>2</sup>, SUN Xuebing<sup>1</sup>, LOU Yinghao<sup>1</sup>, LIU Xian<sup>2</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To address the issues of weak interfacial bonding and unclear force transmission commonly associated with current steel plate reinforcement methods for shield tunnel segments, it is necessary to conduct full-scale experiments on the longitudinal joints (hereinafter referred to as 'joints') of shield tunnel segments reinforced with steel plates under various anchor bolt arrangements, and to optimize exist-

ing anchor bolt configurations. [Method] A detailed description of the experimental investigation on steel plate-reinforced longitudinal joints of shield tunnel segments is delivered, covering specimen design, reinforcement methods, loading equipment, and testing/loading schemes. Ultimate bearing capacity tests are conducted on longitudinal joints subjected to different stress conditions, including positive and negative bending moments, using different anchor bolt arrangements. The mechanical performance and failure modes of the reinforced structures are comparatively analyzed to reveal their failure mechanism and evaluate the reinforcement effectiveness under different anchor bolt arrangements. [Result & Conclusion] For steel plate-reinforced shield tunnel segments subjected to positive bending moment, increasing the number of anchor bolts on both sides of the longitudinal joint could improve the joint bearing capacity by 8%. For steel plate-reinforced shield tunnel segments subjected to negative bending moments, the joint bearing capacity remains the same when reducing the number of anchor bolts on both sides of the longitudinal joint. Targeting the steel plate-reinforced shield tunnel segment joints under various anchor bolt arrangements, the bond strength is identified as the key performance indicator of the reinforcement structure.

**Key words** rail transit; shield tunnel segment; longitudinal joint experiment; anchor bolt arrangement

随着地铁运营年限的不断增长, 部分盾构隧道结构逐渐暴露出一些结构病害问题。隧道病害问题主要包括隧道裂损<sup>[1-2]</sup>、隧道渗漏<sup>[3-4]</sup>和隧道变形等<sup>[5-6]</sup>。其中隧道变形会大幅降低盾构隧道自身的整体稳定, 影响结构的安全和使用。为了减少大变形的危害, 增加隧道的使用期限, 加强管片的强度和刚度是快速有效的方法。

目前常用的盾构隧道加固方法分为两类: 一类

\* 中国铁建股份有限公司科技研发计划项目(2024-B18); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研课题(2021K002、KY2024034S)

为钢材加固<sup>[7-10]</sup>；一类为复合材料加固<sup>[11-12]</sup>。钢板加固方法存在钢板自重过大、界面黏结薄弱等问题。现有的加固研究多集中于新材料、新方法，如超高性能混凝土加固<sup>[13-15]</sup>、钢板-混凝土组合加固<sup>[16-17]</sup>、纤维材料加固等<sup>[18-20]</sup>。纵缝作为盾构隧道的薄弱位置，对加固结构的承载力有着较大影响。现阶段对于纵缝的加固分析和加固优化研究较少，因此有必要进行钢板加固的盾构隧道管片纵缝接头（以下简称“接头”）的试验研究。本文提出一种基于锚栓优化布置的接头构造，该构造能提升钢板加固性能，可有效应用于运营地铁隧道加固。

本文针对不同受力状态下的纵缝，运用不同的锚栓布置，开展接头极限承载力试验研究。根据试验破坏现象，总结出优化后加固结构的受力性能；根据优化前后的数据对比分析，总结出不同锚栓布置下接头的加固效果，为后续的研究与应用提供参考。

## 1 试验简介

### 1.1 试件设计及加固方法

#### 1.1.1 试件设计

选取接头作为试验试件。根据接头受力方式的不同，在正负弯矩下设置不同的锚栓，并设置对照组进行对比分析。通过试验确定不同锚栓布置方式对钢板加固后的盾构隧道结构接头的影响，探究其加固效果。

本试验分为正弯矩下钢板加固对照组和钢板加固优化组试验，以及负弯矩下钢板加固对照组和钢板加固优化组试验，见表1。根据现场实际情况，模拟18 m埋深的盾构隧道结构受力和顶部堆载工况。

表1 试验工况简介

Tab.1 Introduction of experiment conditions

| 试验工况 | 锚栓布置方式     |
|------|------------|
| 正弯矩  | 锚栓未加密(对照组) |
|      | 锚栓加密(优化组)  |
| 负弯矩  | 锚栓未减少(对照组) |
|      | 锚栓减少(优化组)  |

本试验采用的盾构隧道外直径为6.2 m，内直径为5.5 m，管片厚度为0.35 m，管片宽度为1.2 m。试验试件采用同一标准块管片的两个端部切割拼装完成，试验试件如图1所示。管片由C50高强

度混凝土浇筑而成，管片接头采用弯螺栓连接，螺栓规格为8.8级M30。不同位置的螺栓受力不同，因此将管片接头分为正弯矩接头和负弯矩接头。

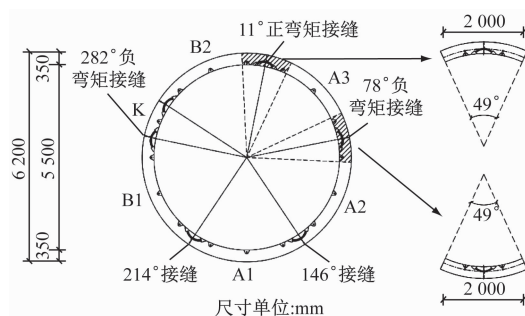


图1 接头试验试件

Fig.1 Specimen of joint experiment

#### 1.1.2 加固方法

本试验设计了不同锚栓布置的接头。正负弯矩下钢板锚栓布置对照组和优化组如图2所示。钢板加固宽度为1.2 m，加固长度为1.9 m。根据盾构隧道受力，正弯矩下的顶底纵缝两侧10°范围锚栓环向加密布置，负弯矩下的两腰纵缝两侧10°范围中心排锚栓环向减少布置，正负弯矩工况下分别设置螺栓均匀布置的对照组。本次钢板加固采用M16化学螺栓，螺栓的钻孔深度 $\geq 10d$ （ $d$ 为螺栓直径），纵向布置3排，间距315 mm。钻孔位置需避开手孔和纵缝，调整距离不超过50 mm。

#### 1.2 加载设备

试验采用WAW-J5000J多通道电液伺服加载系统进行加载。此加载系统包括垂向加载千斤顶、水平加载千斤顶、控制器、加载支撑架及反力架等。在试验过程中，竖向千斤顶施加竖向力 $P$ ，通过分配梁作用于管片；水平千斤顶施加水平力 $F$ ，通过支座作用于管片上。通过竖向力和水平力的加载，模拟出管片接头承受的实际弯矩。接头试验加载系统如图3所示。

#### 1.3 测试方案

试验过程中，结构的变形以及加固体的应变是主要的观测对象。测量内容包括：接头跨中变形量，接头张开量，化学锚栓和钢板应变，以及混凝土裂缝等。试验测量内容如表2所示。

#### 1.4 加载方案

在试验过程中，加载作动器以逐级递增的方式加载至目标荷载，中间全过程不进行卸载。对于正

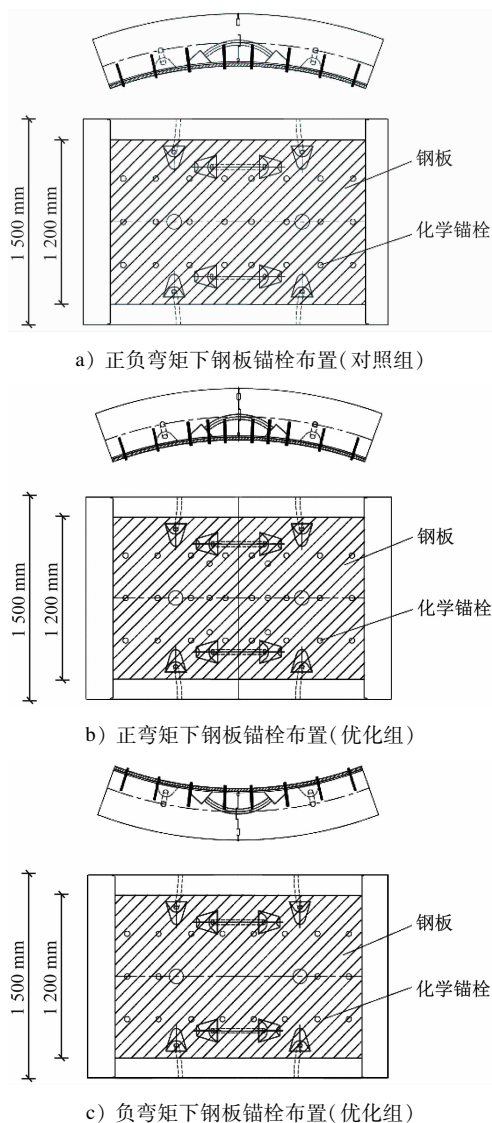


图2 正负弯矩下钢板锚栓布置对照组和优化组

Fig. 2 Comparison of steel plate-reinforced anchor bolt arrangements under positive and negative bending moments between control group and optimized group



图3 接头试验加载系统

Fig. 3 Loading system for joint experiment

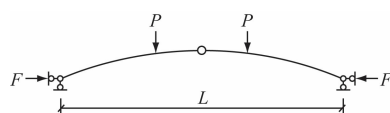
弯矩接头试验,竖向作动器以每级 40 kN 的速率将结构加载至破坏状态;对于负弯矩接头试验,竖向作动器以每级 20 kN 的速率加载,同时水平作动器

表2 试验测量内容

Tab. 2 Experiment measurement contents

| 测量内容   | 测量数值范围         | 精度      | 数量 |
|--------|----------------|---------|----|
| 构件挠度变形 | 0 ~ 100 mm     | 0.1 mm  | 2  |
| 张开量    | 0 ~ 100 mm     | 0.1 mm  | 4  |
| 锚栓应力   | 0 ~ 640 MPa    | 0.1 MPa | 6  |
| 钢板应力   | -345 ~ 345 MPa | 0.1 MPa | 15 |
| 裂缝观测   |                | 0.01 mm |    |

加载相应的荷载,最终将结构加载至破坏状态。接头最终以黏结界面失效,管片核心区混凝土压碎为破坏状态。正弯矩作用下加固结构加载图见图4。负弯矩作用下加固结构加载图见图5。



注:  $L$  为加固结构跨度;图5同。

图4 正弯矩作用下加固结构加载图

Fig. 4 Loading diagram of reinforcement structure under positive bending moment

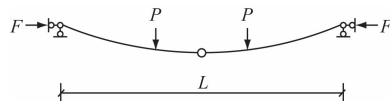


图5 负弯矩作用下加固结构加载图

Fig. 5 Loading diagram of reinforcement structure under negative bending moment

## 2 接头破坏形态与特点

### 2.1 正弯矩接头

针对正弯矩接头(对照组),弯矩为 0 ~ 367.89 kNm 时,接头跨中挠度呈线性增加趋势,管片及加固体的黏结界面良好,锚栓和螺栓的应力较小。弯矩为 377.49 kNm 时,接头跨中挠度发生突变,钢板与管片的黏结界面逐步失效。随着黏结界面完全脱开,加固结构并未达到最终破坏阶段,还具有一定的承载能力。随后接头外弧面混凝土贴紧,部分螺栓和锚栓达到屈服应变。弯矩为 426.49 kNm 时,加固结构外弧面混凝土受压破坏,螺栓和接头侧两排锚栓屈服,加固结构达到极限状态,失去了承载能力。

针对正弯矩接头(优化组),弯矩为 0 ~ 465.69 kNm 时,接头跨中挠度呈线性增加趋势,管片及加固体的黏结界面良好,锚栓和螺栓的应力较小。弯



矩为 475.49 kNm 时,接头跨中挠度发生突变,钢板与管片的黏结界面失效。随着黏结界面完全脱开,加固结构并未达到最终破坏阶段,还具有一定的承载能力。随后接头外弧面混凝土贴紧,部分螺栓和锚栓达到屈服应变。弯矩为 460.79 kNm 时,加固结构外弧面混凝土受压破坏,螺栓和接头侧两排锚栓屈服,加固结构达到极限状态,失去了承载能力。正弯矩接头破坏状态见图 6。

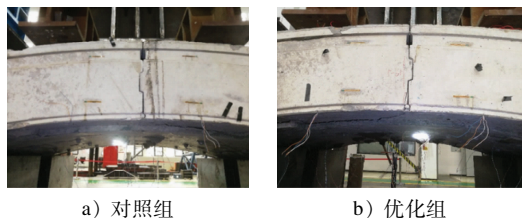


图 6 正弯矩接头破坏状态

Fig. 6 Status of positive bending moment joint damage

## 2.2 负弯矩接头

针对负弯矩接头(对照组),弯矩为 0 ~ 105.99 kNm 时,接头跨中挠度呈线性增加趋势,管片与钢板在接头处的黏结界面开始出现脱开,管片表面良好,螺栓和锚栓受力较大。弯矩加载至 112.83 kNm 时,钢板与管片的黏结界面逐步失效,接头跨中挠度增速加快。随着荷载继续增加,黏结界面完全脱开失效,接头内弧面混凝土被压开裂,部分螺栓已受拉屈服。弯矩加载至 153.95 kNm 时,管片内弧面混凝土整体被压碎,螺栓和钢板屈服,接头侧两排锚栓大部分已屈服,加固结构达到极限状态,失去了承载能力。

针对负弯矩接头(优化组),弯矩为 0 ~ 119.67 kNm 时,接头跨中挠度呈线性发展趋势,接头附近的钢板与管片黏结界面出现脱开裂缝,管片表面良好,螺栓和锚栓受力较大。弯矩加载至 126.34 kNm 时,接头跨中挠度突增,钢板与管片的黏结界面失效。随后接头内弧面混凝土出现受压裂缝,螺栓已达到屈服应变。弯矩加载至 161.94 kNm 时,管片内弧面混凝土整体被压碎,螺栓和钢板屈服,接头侧两排锚栓部分已屈服,结构达到极限状态,失去了承载能力。负弯矩接头破坏状态见图 7。

## 3 接头试验结果与分析

### 3.1 正弯矩试验

#### 3.1.1 试验结果

接头的主要试验内容包括接头变形和闭合、锚栓和钢板的变形。因此接头正弯矩试验的测量结

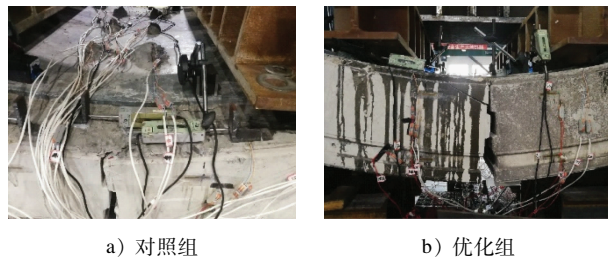


图 7 负弯矩接头破坏状态

Fig. 7 Status of negative bending moment joint damage

果包括接头挠度和张开量、化学锚栓和钢板应变等。其破坏过程及形态讨论如下。

1) 接头挠度。针对锚栓未优化接头(对照组),跨中挠度在弯矩为 0 ~ 367.89 kNm 时呈现线性增加趋势。跨中挠度在弯矩为 377.49 kNm 时,钢板与管片的黏结界面逐步失效,挠度和竖向力发生突变,之后挠度增速相对减缓。加载结束,加固结构最终挠度为 20.12 mm。对于锚栓优化接头(优化组),跨中挠度在弯矩为 0 ~ 465.69 kNm 时呈现线性增加趋势。挠度在弯矩为 475.49 kNm 时,钢板与管片的黏结界面失效,挠度和竖向力发生突变,之后挠度增速相对减缓。加载结束,加固结构最终挠度为 22.75 mm。正弯矩作用下接头弯矩-挠度关系曲线见图 8。

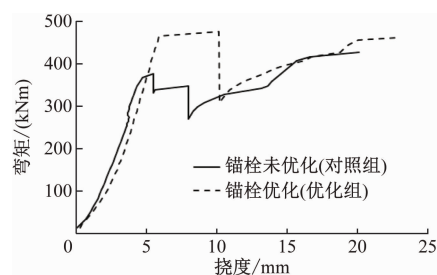


图 8 正弯矩作用下接头弯矩-挠度关系曲线

Fig. 8 Joint bending moment and deflection relation curves under positive bending moment

2) 接头张开量。针对锚栓未优化接头(对照组),弯矩为 0 ~ 367.89 kNm 时,接头张开量呈线性发展趋势。之后黏结界面逐步失效,接头张开量和竖向力发生突变。弯矩加载至 348.09 kNm 时,外弧面混凝土贴紧,张开量增速相对减缓。加载结束,接头张开量为 8.4 mm。针对锚栓优化接头(优化组),弯矩为 0 ~ 465.69 kNm 时,接头张开量呈线性发展趋势。之后黏结界面失效,接头张开量和竖向力发生突变。弯矩加载至 426.49 kNm 时,外弧面混凝土贴紧,张开量增速相对减缓。加载结束,

结构接头张开量为 10.15 mm。正弯矩作用下接头弯矩-张开量关系曲线如图 9 所示。

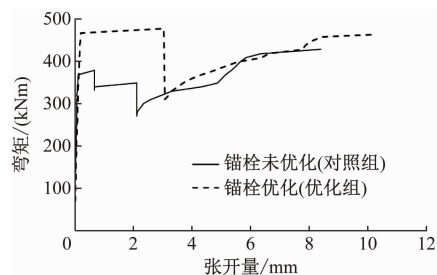


图 9 正弯矩作用下接头弯矩-张开量关系曲线

Fig. 9 Joint bending moment and opening amount relation curves under positive bending moment

3) 锚栓应力。针对锚栓未优化接头(对照组),弯矩为 0~357.89 kNm 时,锚栓应力向负方向发展且应力较小。弯矩为 367.69 kNm 时,锚栓应力突变为受拉,钢板与管片的黏结界面逐步失效,之后锚栓应力增速相对减缓。弯矩达到 416.69 kNm 时,锚栓应力为 656.46 MPa,之后锚栓应力发生突变,锚栓屈服。针对锚栓优化接头(优化组),弯矩为 0~465.69 kNm 时,锚栓应力向负方向发展且应力较小。弯矩为 475.49 kNm 时,黏结界面失效,锚栓应力突变为受拉,之后锚栓应力增速相对减缓。弯矩达到 455.89 kNm 时,锚栓应力为 529.83 MPa,之后锚栓应力发生突变,锚栓屈服。正弯矩作用下接头弯矩-锚栓应力关系曲线如图 10 所示。

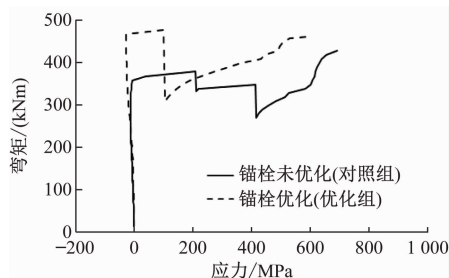


图 10 正弯矩作用下接头弯矩-锚栓应力关系曲线

Fig. 10 Joint bending moment and bolt stress relation curves under positive bending moment

4) 钢板应变。图 11 为正弯矩作用下对照组钢板应变曲线。从图 11 中可以看出:钢板应变与接头弯矩间呈正相关。弯矩达到 201 kNm 时,钢板与管片的黏结界面良好,钢板应变整体较小;弯矩达到 308 kNm 时,钢板与管片的黏结界面完全脱开,钢板应变整体变大。钢板应变在接头两侧一定范围内

集中,且距离接头中心越近,钢板应变越大。加固结构达到破坏时,钢板最大应变为  $1\,467 \times 10^{-6}$ ,应力约为 302 MPa。

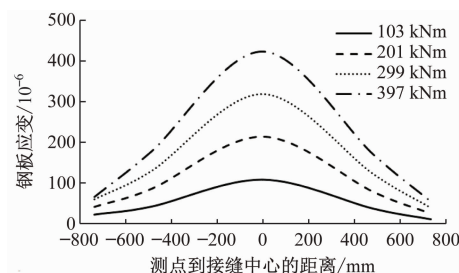


图 11 正弯矩作用下钢板应变曲线(对照组)

Fig. 11 Steel plate strain curves under positive bending moment (control group)

图 12 为正弯矩作用下优化组钢板应变曲线。从图 12 中可以看出:钢板应变与接头弯矩间呈正相关。弯矩达到 201 kNm 时,钢板与管片的黏结界面良好,钢板应变整体较小;弯矩达到 308 kNm 时,钢板与管片的黏结界面完全脱开,钢板应变整体变大。钢板应变在接头两侧一定范围内集中,且距离接头中心的越近,钢板应变越大。结构达到破坏时,钢板最大应变为  $1\,845 \times 10^{-6}$ ,应力约为 380 MPa。

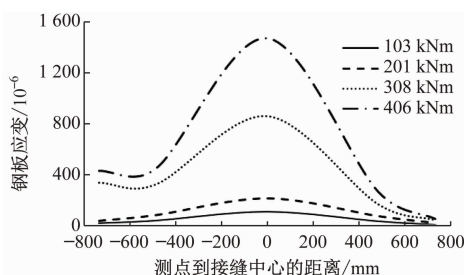


图 12 正弯矩作用下钢板应变曲线(优化组)

Fig. 12 Steel plate strain curves under positive bending moment (optimized group)

### 3.1.2 接头破坏模式

图 13 为不同锚栓布置方式下正弯矩接头受力全过程曲线。由图 13 可以看出:在荷载作用下,结构加载至破坏前,管片与钢板黏结良好,螺栓和锚栓受力小;黏结失效后接头刚度快速下降,结构发生应力重分布,螺栓、锚栓为结构的主要承载部分;当螺栓和锚栓都屈服后,最终结构进入塑性阶段,达到最终破坏状态。由此可见,正弯矩作用下,不同锚栓布置下的接头经历弹性阶段、弹塑性阶段及塑性阶段。

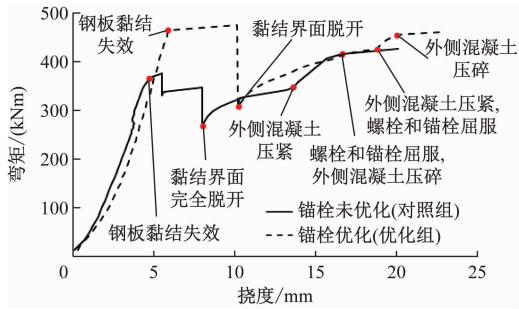


图 13 不同锚栓布置方式下正弯矩接头受力全过程曲线

Fig. 13 Full process curves of loading on joint under positive bending moment with different anchor bolt arrangements

针对锚栓未优化接头(对照组),弹性阶段加固结构为整体协调受力变形。黏结界面在弯矩为 367.69 kNm 时失效,接头初始转角刚度快速下降,加固结构进入弹塑性阶段,随后管片与钢板的黏结界面完全脱开。当加载至弯矩为 348.09 kNm 时,接头外侧混凝土压紧会略微增加结构刚度,直至螺栓和锚栓屈服,结构进入塑性阶段。

针对锚栓优化接头(优化组),弹性阶段加固结构为整体协调受力变形。黏结界面在弯矩为 465.69 kNm 时失效,接头初始转角刚度快速下降,结构进入弹塑性阶段。当加载至弯矩为 426.49 kNm 时,接头外侧混凝土压紧,使得结构刚度小幅度增加,直至螺栓和锚栓屈服,结构进入塑性阶段。

### 3.2 负弯矩试验

#### 3.2.1 试验结果

接头的主要试验内容包括接头变形和闭合、锚栓和钢板的变形。因此负弯矩试验的测量结果包括接头挠度和张开量、化学锚栓和钢板应变等。其破坏过程及形态讨论如下。

1) 接头挠度。针对锚栓未优化接头(对照组),初始阶段接头挠度随弯矩增加而线性增长,增速较小。弯矩为 112.83 kNm 时,接头挠度增速增大,钢板与管片的黏结界面已逐步失效。弯矩为 119.94 kNm 时,接头挠度快速增加约 10 mm,接头内弧面混凝土贴紧。加载结束后结构最终挠度为 57.29 mm。针对锚栓优化接头(优化组),初始阶段接头挠度随弯矩增加而线性增长,增速较小。弯矩为 126.34 kNm 时,接头挠度增速增大,钢板与管片的黏结界面已逐步失效,接头外弧面混凝土在荷载作用下逐渐贴紧。加载结束,结构最终挠度为 66.68 mm。负弯矩作用下接头弯矩-挠度关系曲线

见图 14。

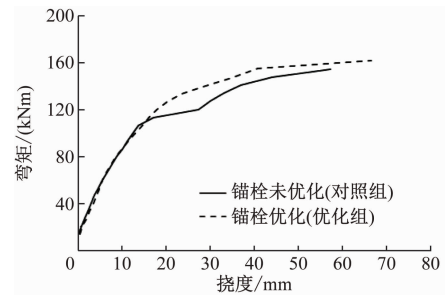


图 14 负弯矩作用下接头弯矩-挠度关系曲线

Fig. 14 Joint bending moment and deflection relation curves under negative bending moment

2) 接头张开量。针对锚栓未优化接头(对照组),弯矩为 0 ~ 105.99 kNm 时,接头张开量呈线性发展趋势,但增速较为缓慢。之后钢板与管片的黏结界面逐步失效,接头张开量增速增大。加载结束,接头最终张开量为 44.04 mm。针对锚栓优化接头(优化组),弯矩为 0 ~ 119.67 kNm 时,接头张开量呈线性发展趋势,但增速较为缓慢。之后钢板与管片的黏结界面逐步失效,接头张开量增速增大。加载结束,接头最终张开量为 42.46 mm。负弯矩作用下接头弯矩-张开量关系曲线见图 15。

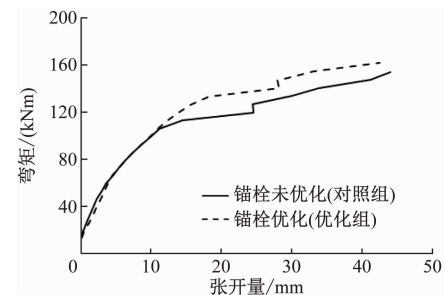


图 15 负弯矩作用下接头弯矩-张开量关系曲线

Fig. 15 Joint bending moment and opening amount relation curves under negative bending moment

3) 锚栓应力。针对锚栓未优化接头(对照组),弯矩为 0 ~ 105.99 kNm 时,锚栓应力呈线性发展趋势,之后钢板与管片的黏结界面逐步失效,锚栓应力增速增大。弯矩达到 147.58 kNm 时,锚栓应力为 400.05 MPa,之后锚栓应力发生突变。针对锚栓优化接头(优化组),弯矩为 0 ~ 119.67 kNm 时,锚栓应力呈线性发展趋势,之后钢板与管片的黏结界面失效,锚栓应力增速增大。弯矩达到 154.58 kNm 时,锚栓应力为 512.4 MPa。负弯矩作用下接头弯矩-锚栓应力关系曲线见图 16。



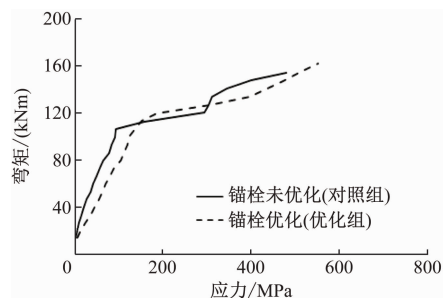


图 16 负弯矩作用下接头弯矩-锚栓应力关系曲线

Fig. 16 Joint bending moment and anchor bolt stress relation curves under negative bending moment

4) 钢板应变。图 17 为负弯矩作用下对照组钢板应变曲线。从图 17 中可以看出:钢板应变随着竖向力的增加而增加,在临近破坏即弯矩达到 153 kNm,钢板应变达到最大值。钢板应变在接头两侧一定范围内集中,且距离接头中心越近,钢板应变越大。结构达到破坏时,钢板最大应变为  $2.063 \times 10^{-6}$ ,应力约为 425 MPa,钢板已屈服。

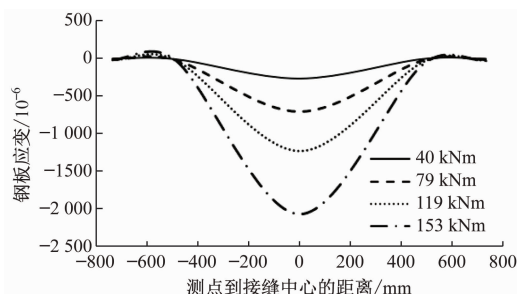


图 17 负弯矩作用下钢板应变曲线(对照组)

Fig. 17 Steel plate strain curves under negative bending moment (control group)

图 18 为负弯矩作用下优化组钢板应变曲线。4 条钢板应变曲线分别表示弯矩为 40 kNm、79 kNm、119 kNm 和 161 kNm。从图 18 中可以看出:钢板应变随着竖向力的增加而增加,在临近破坏即弯矩达到 161 kNm,钢板应变达到最大值。钢板应变在接头两侧一定范围内集中,且距离接头中心越近,钢板应变越大。结构达到破坏时,钢板最大应变为  $2.437 \times 10^{-6}$ ,应力约为 502 MPa,钢板已屈服。

### 3.2.2 接头破坏模式

图 19 为不同锚栓布置方式下的负弯矩接头受力全过程曲线。由图 19 可以看出:在荷载作用下,结构加载至破坏前,管片与钢板黏结良好,螺栓和锚栓受力较大;管片与钢板黏结失效后接头刚度快速下降,螺栓和锚栓受力继续增大并屈服,最终结构

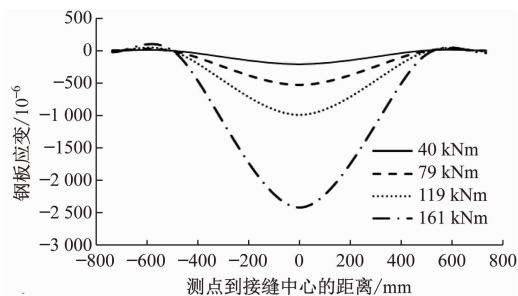


图 18 负弯矩作用下钢板应变曲线(优化组)

Fig. 18 Steel plate strain curves under negative bending moment (optimized group)

进入塑性阶段,管片内弧面混凝土被压碎,达到极限状态,失去了承载能力。由此可见,在负弯矩作用下,不同锚栓布置方式下的接头经历弹性阶段、弹塑性阶段及塑性阶段。

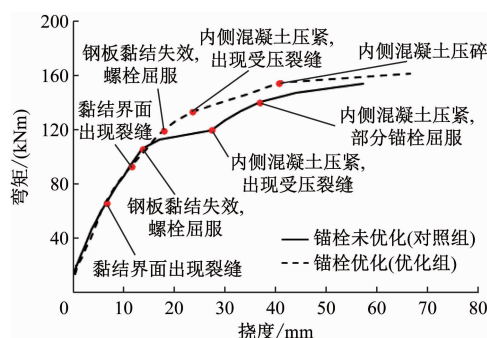


图 19 不同锚栓布置方式下负弯矩接头受力全过程曲线

Fig. 19 Full process curves of loading on joint under negative bending moment with different anchor bolt arrangements

针对锚栓未优化接头(对照组),弹性阶段加固结构为整体协调受力变形。弯矩为 105.99 kNm 时,黏结界面逐步失效,接头初始转角刚度快速下降,螺栓受力大并逐步屈服。结构进入弹塑性阶段,黏结界面脱开,螺栓和锚栓受力继续增大,接头内侧混凝土压紧,使得结构刚度小幅度增加。弯矩为 147.57 kNm 时,螺栓和锚栓屈服,结构进入塑性阶段。

针对锚栓优化(优化组)接头,弹性阶段加固结构为整体协调受力变形。弯矩为 119.67 kNm 时,黏结界面失效,接头初始转角刚度下降,螺栓达到屈服。结构进入弹塑性阶段,接头内侧混凝土逐步压紧并出现受压裂缝。弯矩为 154.58 kNm 时,结构进入塑性阶段。

## 4 不同锚栓布置方式下接头对比分析

通过试验得到了不同锚栓布置方式下接头的

受力特性及破坏模式。对加固结构的极限弯矩、变形和刚度、黏结强度等方面进行分析,总结出加固效果。加固结构的极限状态定义为黏结界面失效,螺栓屈服且管片破坏,结构失去承载能力。锚栓优化前后接头的极限弯矩和初始转角刚度见表 3。

表 3 锚栓优化前后接头的极限弯矩和初始转角刚度  
Tab. 3 Ultimate bending moment and initial rotational stiffness of joints before and after anchor bolt optimization

| 接头类型  | 锚栓优化前<br>极限弯矩/<br>(kNm) | 锚栓优化后<br>极限弯矩/<br>(kNm) | 极限弯矩<br>增幅/% |
|-------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| 正弯矩接头 | 426.49                  | 460.79                  | 8.0          |
| 负弯矩接头 | 153.95                  | 161.94                  | 5.2          |

| 接头类型  | 锚栓优化前<br>初始转角刚度/<br>(kNm/rad) | 锚栓优化后<br>初始转角刚度/<br>(kNm/rad) | 初始转角<br>刚度增幅/% |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 正弯矩接头 | 216 287                       | 222 990                       | 3              |
| 负弯矩接头 | 3 251                         | 3 580                         | 10             |

针对锚栓未优化(对照组),正弯矩接头极限弯矩为 426.49 kNm,初始转角刚度为 216 287 kNm/rad;针对锚栓优化(优化组),正弯矩接头极限弯矩约为 460.79 kNm,初始转角刚度为 222 990 kNm/rad。相比于锚栓未优化(对照组)接头,锚栓优化(优化组)正弯矩接头极限弯矩提高了 8.0%,初始转角刚度提高了 3%。

针对锚栓优化(优化组),负弯矩接头极限弯矩为 153.95 kNm,初始转角刚度为 3 251 kNm/rad;针对锚栓优化(优化组),正弯矩接头极限弯矩约为 161.94 kNm,初始转角刚度为 3 580 kNm/rad。相比于锚栓未优化(对照组),锚栓优化(优化组)正弯矩接头极限弯矩提高了 5.2%,初始转角刚度提高了 10%。

由表 3 可以看出:相对于锚栓未优化接头(对照组),锚栓优化接头(优化组)的极限弯矩与初始转角刚度均有提高。其中,锚栓优化后的正弯矩接头承载力提升更大,负弯矩接头承载力无太大变化;优化后的正弯矩初始转角刚度无太大变化,负弯矩接头初始转角刚度提升更大。

因此,根据受力特点,管片接头在承受正弯矩作用时,增加接头两侧的锚栓布置;接头在承受负弯矩作用时,减少钢板加固的盾构隧道管片纵缝两侧的锚栓布置。这能够有效提升盾构隧道的加固

效果。同时根据实际受力情况布置锚栓,也能够提高锚栓的利用率。

## 5 结论

1) 对承受正弯矩作用的钢板加固的盾构隧道管片,增加纵缝两侧的锚栓布置,能够提升接头的承载能力;对承受负弯矩作用的钢板加固的盾构隧道管片,减少纵缝两侧的锚栓布置,接头的承载能力未降低。

2) 锚栓优化后,加固结构的黏结强度仍是结构承载的关键性能指标。黏结界面在接头附近局部脱开剥离,随后逐步扩展至整个加固界面。加固结构的初始转角刚度也随着黏结界面失效而迅速下降,且不再作为整体而受力。之后结构发生应力重分布,仍然可以承受一定的荷载,结构具有一定的延性。

3) 通过锚栓优化布置的接头试验,得到不同锚栓布置方式对接头的破坏机理及加固效果,可为盾构管片加固设计提供依据。

## 参考文献

- [1] 耿翱鹏,李雪,周顺华,等. 大直径盾构隧道施工期管片破损原因分析及防治[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊 1): 326.  
GENG Aopeng, LI Xue, ZHOU Shunhua, et al. Causes analysis and countermeasure of segment damages of a large-diameter shield tunnel during construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 326.
- [2] 朱旻,陈湘生,王雪涛. 盾构隧道衬砌结构性能演化分析与思考[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 33.  
ZHU Min, CHEN Xiangsheng, WANG Xuetao. Analysis and thinking on structural performance evolution of shield tunnel lining[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3): 33.
- [3] 龚琛杰,丁文其,雷明锋,等. 营运越江盾构隧道渗漏水病害特征及整治研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊 1): 247.  
GONG Chenjie, DING Wenqi, LEI Mingfeng, et al. Case study on water leakage features and repair works of operational river-passing shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 247.
- [4] 黄俊,董飞,李奥,等. 大直径过江盾构法隧道渗漏水状态及影响因素分析[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊 2): 21.  
HUANG Jun, DONG Fei, LI Ao, et al. Analysis of leakage state and influencing factors of large diameter shield tunnel crossing river[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S2): 21.
- [5] 袁勇,刘涛,柳献. 运营越江隧道服役现状调查与检测评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(增刊 2): 83.  
YUAN Yong, LIU Tao, LIU Xian. Investigation and evaluation of present state and serviceability of existing river-crossing tunnel



- [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(S2): 83.
- [6] 柳献, 张雨蒙, 王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 118.  
LIU Xian, ZHANG Yumeng, WANG Rulu. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 118.
- [7] 柳献, 唐敏, 鲁亮, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2300.  
LIU Xian, TANG Min, LU Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2300.
- [8] 柳献, 张浩立, 唐敏, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131.  
LIU Xian, ZHANG Haoli, TANG Min, et al. Experimental study of the ultimate bearing capacity of a shield tunnel reinforced by a semi-ring steel plate[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 131.
- [9] LIU X, JIANG Z, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(6): 685.
- [10] 任天宇, 刘树亚, 柳献. 波纹钢板加固盾构隧道衬砌管片抗弯性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 317.  
REN Tianyu, LIU Shuya, LIU Xian. Experimental study of bending capacity of shield tunnel lining segment strengthened by corrugated steel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 317.
- [11] LIU X, JIANG Z, ZHANG L. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded filament wound profiles[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(10): 1268.
- [12] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 78.  
LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 78.
- [13] 陈仁朋, 鲁立, 张阳, 等. 盾构管片 UHPC 加固技术及力学性能分析[J]. 工程力学, 2019, 36(11): 41.  
CHEN Renpeng, LU Li, ZHANG Yang, et al. Reinforced technology and mechanical properties of shield tunnel lining with UHPC[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 41.
- [14] 柳献, 张蛟龙, 蒋子捷, 等. UHPC 加固盾构隧道衬砌结构试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 181.  
LIU Xian, ZHANG Jiaolong, JIANG Zijie, et al. Experimental investigations of a segmental tunnel ring strengthened by using UHPC[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 181.
- [15] 成煜, 谢剑, 于敬海. 二次受力下 UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2295.  
CHENG Yu, XIE Jian, YU Jinghai. Experimental study on axial compressive behavior of RC columns strengthened by UHPC under secondary load[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2295.
- [16] 柳献, 蒋子捷, 刘树亚. 钢板-混凝土组合结构加固盾构隧道衬砌结构极限承载力足尺试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 128.  
LIU Xian, JIANG Zijie, LIU Shuya. Experiment of deformed shield tunnels strengthened by steel plate-concrete composite structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 128.
- [17] ZHANG J L, LIU X, REN T Y, et al. Structural behavior of reinforced concrete segments of tunnel linings strengthened by a steel-concrete composite[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 178: 107444.
- [18] LIU X, JIANG Z, MANG H A. Experimental investigation of the bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by a special composite structure[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(2): 147.
- [19] JIANG Y, WANG X, LI B, et al. Estimation of reinforcing effects of FRP-PCM method on degraded tunnel linings[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(3): 327.
- [20] 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(2): 316.  
LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Chen, et al. Experimental study on the longitudinal joint in shield tunnel reinforced with FRP material[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 316.
- 收稿日期:2023-05-16 修回日期:2023-06-14 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-05-16 Revised:2023-06-14 Published:2025-06-10
- 第一作者:王金龙,正高级工程师,003180@crfsdi.com  
通信作者:柳献,教授,xian.liu@tongji.edu.cn
- ©《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

## (上接第 66 页)

- [18] 胡少伟, 胡亮. 两种不同加载方法下的混凝土剪切断裂过程对比研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 25.  
HU Shaowei, HU Liang. Comparative study on shear fracture process of concrete with two different loading methods[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 25.

- 收稿日期:2023-05-15 修回日期:2023-07-11 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-05-15 Revised:2023-07-11 Published:2025-06-10
- 第一作者:严佳佳,高级工程师,yan\_jj@hdec.com  
通信作者:王博川,博士研究生,2310180@tongji.edu.cn
- ©《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