

复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头试验研究^{*}孙雪兵¹ 甘海杰² 王金龙¹ 吕延豪¹ 娄英豪¹ 柳 献²

(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] 盾构隧道使用年限的增加使得加固维修需求不断上升。复合腔体作为新型加固材料, 其应用逐渐增多, 因此研究其材料性能及不同接缝受力条件下的加固效果具有重要意义。[方法] 以复合腔体加固的盾构管片纵缝接头为研究对象, 开展了材料性能试验和接头受力分析。通过试验, 研究了不同接缝受力条件下加固盾构管片纵缝接头的受力性能、破坏形态及破坏机理, 并对加固效果进行了评定。[结果及结论] 试验结果显示: 复合腔体抗压极限承载力和抗弯极限承载力分别为 689.67 kN 和 8.25 kNm, 弹性阶段抗弯刚度为 1.93×10^9 Nmm²。复合腔体加固能够有效提高管片纵缝接头的承载能力和刚度, 加固后正弯矩作用下接头的极限承载弯矩为 289.29 kNm, 负弯矩作用下接头的极限承载弯矩为 134.95 kNm。复合腔体加固混凝土管片的界面强度是加固结构的关键性能指标, 界面破坏后会降低结构的整体刚度。

关键词 地铁; 盾构隧道; 管片纵缝接头试验; 复合腔体加固

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230492

Experimental Study on Segment Longitudinal Joints of Shield Tunnel Reinforced with Filament Wound Profile

SUN Xuebing¹, GAN Haijie², WANG Jinlong¹, LYU Yanhao¹, LOU Yinghao¹, LIU Xian²

(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] With the increasing service life of shield tunnels, demands for reinforcement and maintenance continue to grow. As a new reinforcement material, FWP (filament wound profile) is being increasingly applied, making it significant to study their material properties and reinforcement effectiveness under different joint stress conditions. [Method] Focusing on the segment longitudinal joints of shield tunnel reinforced with FWP, material property tests and joint stress analyses are conducted. The stress performance, failure modes,

and failure mechanisms of the reinforced segment longitudinal joints under various stress conditions are investigated through experiments, and the reinforcement effectiveness is evaluated.

[Result & Conclusion] The experimental results indicate that the FWP exhibits a compressive ultimate bearing capacity of 689.67 kN, a flexural ultimate bearing capacity of 8.25 kN · m, and an elastic-phase flexural stiffness of 1.93×10^9 N · mm². The FWP reinforcement can effectively enhance the bearing capacity and stiffness of the segment longitudinal joints. After reinforcement, the ultimate flexural bearing capacity of the joints reaches 289.29 kN · m under positive bending moment, and 134.95 kN · m under negative bending moment. The interface strength of concrete segment reinforced with FWP is a key indicator of reinforced structure performance. The interface damage and failures could reduce the overall stiffness of the structure.

Key words metro; shield tunnel; segment longitudinal joint experiment; FWP (filament wound profile) reinforcement

城市轨道交通盾构隧道投入运营后, 经日常检测发现该隧道的病害类型主要分为两大类: 一是局部受损^[1-4], 二是隧道结构整体发生较大变形^[5-7]。隧道结构变形较大, 将严重影响盾构隧道的安全运行, 也将严重影响结构的安全可靠性。

目前, 常用的盾构隧道加固方法分为两类: 一类为钢材加固; 另一类为新材料加固。钢材加固包括钢板加固^[8-10]、钢-混组合加固^[11-12]、波纹钢加固等^[13]。其中, 钢板加固能够有效提高结构刚度, 有效控制结构大变形; 但施工需要专用举重设备, 施工效率低, 钢板间的焊接质量不稳定, 且遇水易生锈、遇高温易软化。新材料加固包括纤维材料^[14-16]、高性能混凝土^[17-18]、复合腔体等^[19-20]。其中, 纤维材料加固施工便利, 但遇高温易失效且不能有效控制结构变形。

复合腔体作为一种用于加固盾构隧道的新材

^{*} 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)

料,因其便利性和创新性等特点,正受到越来越多的关注。文献[19-20]通过复合腔体加固隧道接头试验和足尺试验,研究了复合腔体加固隧道的受力特性与破坏模式。上述已有研究主要集中在加固效果和受力机理方面,而对不同复合腔体的断面形式、加固效果,以及盾构隧道在不同接缝受力条件下的加固深化研究相对较少。基于上述因素,有必要研究复合腔体加固的盾构隧道在不同接缝受力条件下的效果,为后续研究提供依据。

本文开展了断面形式为三腔的复合腔体材料性能试验,并对不同接缝受力条件下的复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头进行了试验研究。基于材料试验中的破坏现象,总结了复合腔体的受力破坏特性,分析了加固结构的受力性能及其在不同接缝受力条件下的加固效果,为后续研究与应用提供了支撑和建议。

1 试验方案

1.1 复合腔体材料性能试验

1.1.1 复合腔体试件

本次结构加固材料为复合腔体,该腔体由不锈钢钢腔、填充砂浆和纤维材料组合而成。复合腔体横截面如图1所示。复合腔体主体由3个相同的钢腔焊接,在内部灌注C50砂浆,外部包裹缠绕纤维材料。复合腔体的横截面尺寸为180 mm(长度)×30 mm(宽度)。复合腔体材料性能试验分为抗压和抗弯试验。

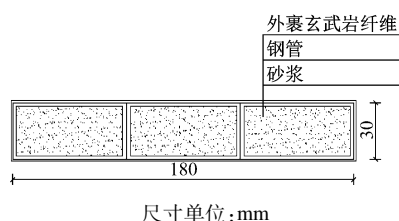


图1 复合腔体横截面
Fig.1 FWP cross section

1.1.2 试验方法

1.1.2.1 抗压试验

抗压试验中,复合腔体试件横截面尺寸为180 mm(长度)×30 mm(宽度),试件高度为100 mm。选取3组试件进行试验。在万能试验机上进行抗压试验,轴压加载如图2所示。抗压试验以200 N/s的速率进行加载,记录极限值为抗压强度。



图2 复合腔体轴压试验

Fig.2 FWP axial compression test

复合腔体试件抗压试验中,在试件两侧取6个测点,即正、反两面各3个,其位置为各腔室宽度方向的中点。测点位移由仪器自动采集并记录。

1.1.2.2 抗弯试验

抗弯试验中,复合腔体试件横截面尺寸为180 mm(长度)×30 mm(宽度),试件长度为800 mm。选取3组试件进行试验,通过静力加载方法进行复合腔体试件抗弯试验。通过200 t加载系统,对试件进行两点抗弯加载。试件一端的支承条件为铰接,一端支承条件为滚动支撑,从而模拟出简支梁的约束条件。复合腔体抗弯试验如图3所示。

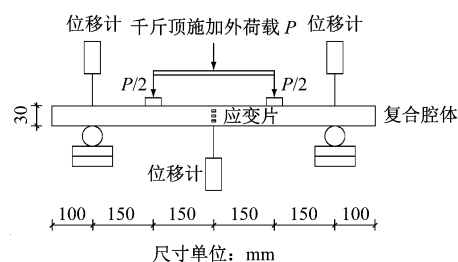


图3 复合腔体抗弯试验

Fig.3 FWP bending test

复合腔体抗弯试验中,试件上、下表面共布置6个应变片,布置于截面宽度方向上各腔室的中点;试件侧面布置3个应变片,布置于试件长度方向的中线;将试件高度进行四等分,每隔7.5 mm粘贴1个应变片。

1.2 复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头试验

1.2.1 试验试件及加固方法

本次试验对象为采用复合腔体材料加固的盾构隧道管片纵缝接头。由于不同接缝受力条件下经复合腔体加固后的盾构隧道的受力特性不同,试验分为正弯矩和负弯矩作用下的复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头试验。根据现场实际情况,

模拟 18 m 埋深条件下的结构受力,并考虑顶部堆载工况。

本次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 1.20 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,纵缝接头试验试件如图 4 所示。管片由 C50 高强度混凝土浇筑而成,管片接缝由 8.8 级 M30 规格的弯螺栓连接而成。接缝在不同位置受力不同,因此将管片接缝分为正弯矩作用下的接缝和负弯矩作用下的接缝。本次试验所用管片在正弯矩作用下的接缝位于整环结构中的 11°,在负弯矩作用下的接缝位于整环结构中的 78°和 282°。

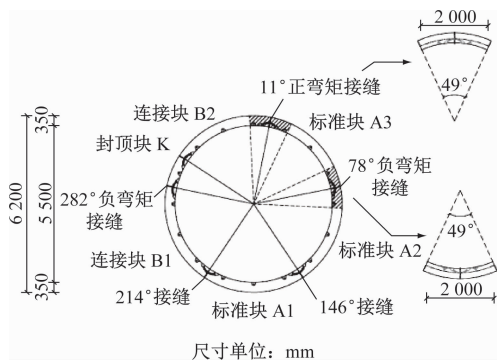


图4 纵缝接头试验试件

Fig. 4 Specimen of longitudinal joint test

复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头的结构示意图如图 5 所示。环宽方向布置 4 榀复合腔体,单榀复合腔体加固截面尺寸为 180 mm(宽度)×30 mm(高度),腔体加固总长度为 1.9 m。加固时采用结构胶进行黏结,结构胶的抗拉强度为 37.3 MPa,黏结强度为 4.5 MPa。本次复合腔体加固采用 M16 化学螺栓,螺栓的钻孔深度 $\geq 10d$ (d 为螺栓直径,单位 mm),需避开手孔、纵缝,调整距离不大于 50 mm。

1.2.2 加载设备

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,通过分配梁将荷载传递至管片,并由千斤顶施加竖向力 P ,水平千斤顶通过支座对管片施加水平力 F 。通过竖向力和水平力的加载,模拟出复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头在实际工况下承受的弯矩。该试验加载系统如图 6 所示。

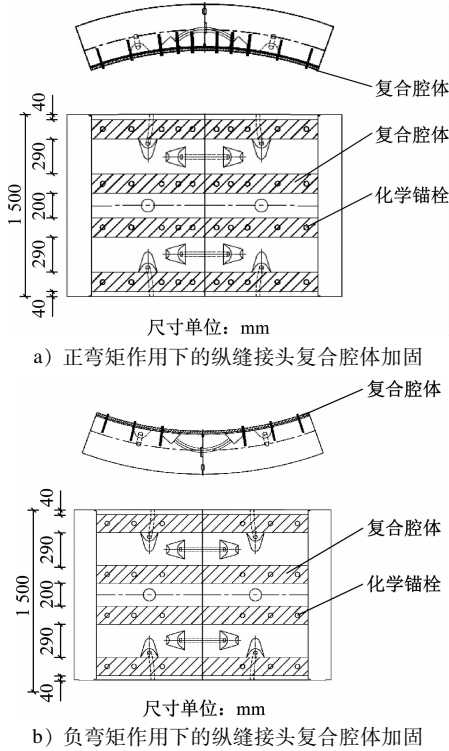


图5 正、负弯矩作用下的纵缝接头复合腔体加固

Fig. 5 Diagram of longitudinal joint FWP reinforcement under positive/negative bending moments



图6 复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头试验加载系统

Fig. 6 Loading system of FWP-reinforced shield tunnel segment longitudinal joint test

1.2.3 测试方案

试验过程中,结构的变形和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,化学锚栓和加固复合腔体应变,以及混凝土裂缝等。试验测量内容统计如表 1 所示。

表1 试验测量内容统计

Tab. 1 Statistics of test measurement contents			
测量内容	量测数值范围	精度	测点数量
试件挠度变形	0 ~ 100 mm	0.1 mm	2
接缝处张开量	0 ~ 100 mm	0.1 mm	4
螺栓应变	$-2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^2$	0.1	4
锚栓应变	$-2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^2$	0.1	8
复合腔体应变	$-2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^2$	0.1	20
裂缝观测		0.01 mm	

1.2.4 加载方案

试验过程中,加载作动器采用逐级递增的方式加载至目标荷载,且在整个过程中不进行卸载。对于正弯矩作用下的接头试验,竖向作动器以每级 40 kN 的加载速率将结构加载至破坏状态;对于负弯矩作用下的接头试验,竖向作动器以每级 20 kN 的速率加载,同时水平作动器加载相应的荷载,最终将结构加载至破坏状态。复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝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。接头正弯矩加载示意图见图 7。接头负弯矩加载示意图见图 8。

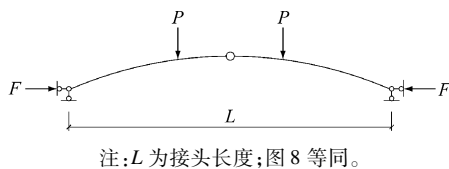


图 7 接头正弯矩加载示意图

Fig. 7 Diagram of positive bending moment loading

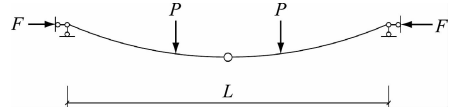


图 8 接头负弯矩加载示意图

Fig. 8 Diagram of negative moment loading

2 试验结果

2.1 复合腔体材料性能

2.1.1 抗压试验

图 9 为复合腔体试件在抗压试验中,试件轴向位移与轴向压力关系曲线。由图 9 可见:复合腔体试件变形随着竖向荷载的增加而逐步增加;当竖向荷载为 200 kN 时,试件受压出现轻微响声;当荷载增加至 500 kN 时,试件出现大量啪啪声,外裹纤维与钢材的黏结发生破损;当竖向荷载达到峰值,即极限抗压承载力时,试件上部的钢材出现局部鼓胀,外层纤维布无法限制内部材料的鼓胀,导致纤维

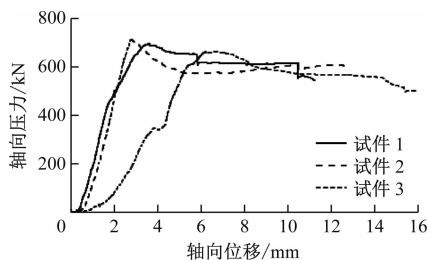


图 9 复合腔体试件轴向压力-轴向位移关系曲线

Fig. 9 Relation curves between FWP specimen axial pressure and axial displacement

维撕裂,结构达到破坏状态。由此得到,复合腔体的极限抗压承载力为 689.67 kN。复合腔体试件抗压试验破坏照片见图 10。复合腔体试件抗压试验结果见表 2。



图 10 抗压试验复合腔体破坏照片

Fig. 10 Photo of FWP damage conditions in compression test

表 2 复合腔体试件抗压试验结果

Tab. 2 Results of FWP specimen in compression test

试件	极限抗压承载力/kN	轴向位移/mm
试件 1	695	3.59
试件 2	711	2.78
试件 3	663	6.76

2.1.2 抗弯试验

图 11 为复合腔体试件在抗弯试验中,试件跨中弯矩-挠度关系曲线。由图 11 可见:在竖向荷载作用下,复合腔体试件跨中挠度逐步增大;当跨中弯矩达到 0.75 kNm 时,试件出现啪啪的响声,且响声频率随荷载增大而增加,主要原因是试件受力导致碳纤维布与腔体脱开;当跨中弯矩为 6.375 kNm 时,跨中上表面受压出现鼓包,随后试件出现撕拉声,跨中附近的碳纤维被拉裂而贯穿横断面;当跨中弯矩为 8.25 kNm 时,试件弯矩达到极限而破坏,此时试件在跨中受压区产生局部鼓包,在跨中受拉区碳纤维布与腔体的黏结胶层破坏,碳纤维布被拉裂。复合腔体的极限抗弯承载力为 8.25 kNm。复合腔体试件抗弯试验破坏照片见图 12。复合腔体试件抗弯试验结果见表 3。

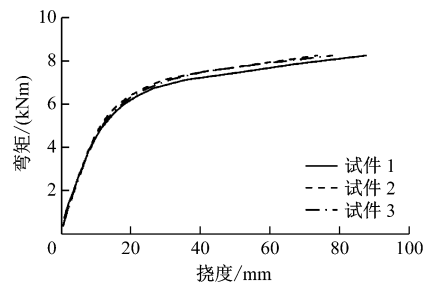


图 11 复合腔体试件跨中弯矩-挠度关系曲线

Fig. 11 Relation curves between FWP specimen mid-span bending moment and deflection

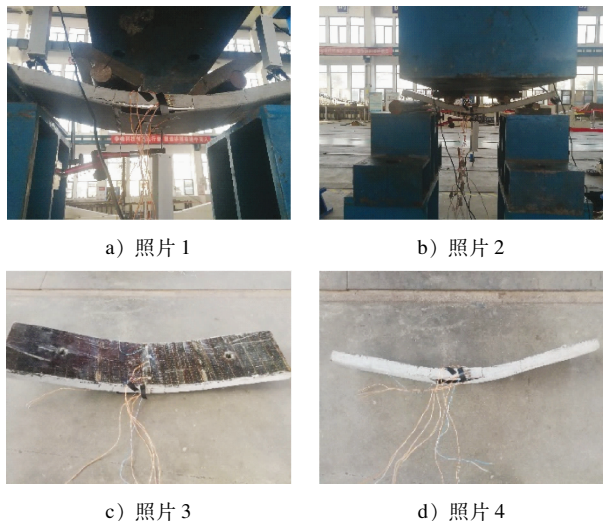


图 12 抗弯试验复合腔体破坏照片
Fig. 12 Photo of FWP damage conditions in bending test

表 3 复合腔体试件抗弯试验结果

Tab. 3 Results of FWP specimen in bending test

试件	极限抗弯承载力/(kNm)	跨中挠度/mm
试件 1	8.25	87.50
试件 2	8.25	73.62
试件 3	7.88	77.92

2.2 正弯矩作用下的接头试验

2.2.1 破坏现象

在正弯矩为 0 ~ 132.49 kNm 范围内,复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头的接缝跨中挠度呈线性增加趋势,管片与复合腔体的黏结界面保持良好,且锚栓和螺栓的应力较小。挠度在弯矩为 142.29 kNm 时发生突变,复合腔体与管片的黏结界面逐步失效。随着黏结界面完全脱开,加固结构并没有达到最终破坏阶段,还具有一定的承载能力。在弯矩为 220.69 kNm 时,接缝挠度为 12.56 mm,接缝外弧面混凝土贴紧,部分螺栓和锚栓达到屈服应变。在弯矩为 289.29 kNm 时,结构外弧面混凝土受压破坏,螺栓和接缝侧两排锚栓屈服,结构达到极限状态,失去承载能力。正弯矩作用下接头破坏照片见图 13。

2.2.2 测试结果

复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头的主要试验包括接缝变形、接缝张开量和闭合量、锚栓和复合腔体的变形,其中接缝张开量和闭合量主要是指管片内外弧面接缝处的间距。因此正弯矩作用下接头试验的测量结果包括接缝挠度、接缝张开量和闭合量、化学锚栓和复合腔体应变等。其破坏



图 13 正弯矩作用下接头破坏照片

Fig. 13 Joint damage condition under positive bending moment force

过程及形态如下:

1) 接缝挠度。采用复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头时,挠度在弹性阶段为线性增加趋势。当复合腔体与管片的黏结界面失效,挠度发生突变。挠度增长速度增大,接缝外弧面混凝土逐步贴紧。弯矩为 289.29 kNm 时,接缝挠度为 17.79 mm,之后管片外弧面混凝土被压碎,螺栓和接缝侧两排锚栓屈服,结构完全破坏。接头正弯矩-挠度关系曲线如图 14 所示。

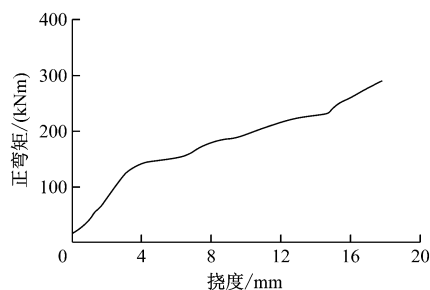


图 14 接头正弯矩-挠度关系曲线

Fig. 14 Relation curve between joint positive bending moment and deflection

2) 接缝张开量和闭合量。复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头在弹性阶段,接缝张开量和闭合量呈线性发展。当复合腔体与管片的黏结界面失效,接缝张开量和闭合量均发生突变。之后张开量和闭合量增速相对增大,弯矩加载至 220.69 kNm 时,外弧面混凝土贴紧。随着弯矩增加,管片外弧面混凝土被压碎,结构失去承载能力,加载结束,结构接缝张开量为 4.26 mm,闭合量为 6.87 mm。接头正弯矩-变形关系曲线如图 15 所示。

3) 锚栓应力。复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头在弹性阶段,锚栓应力呈线性发展。当黏结界面失效,锚栓应力发生突变。锚栓应力增长速度增大,接缝外弧面混凝土在弯矩为 220.69 kNm

时逐步贴紧。锚栓应力为 709.38 MPa, 已受拉屈服。接头正弯矩-锚栓应力关系曲线如图 16 所示。

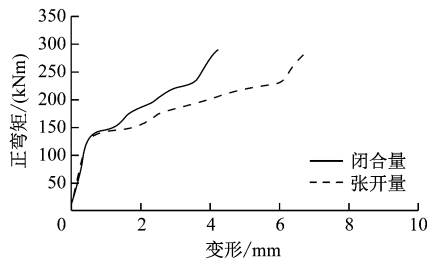


图 15 接头正弯矩-变形关系曲线

Fig. 15 Relation curve between joint positive bending moment and deformation

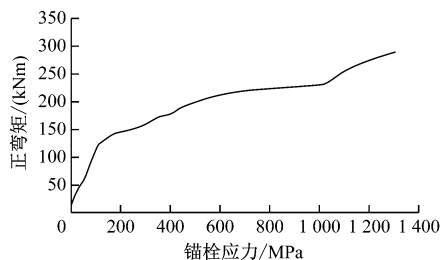


图 16 接头正弯矩-锚栓应力关系曲线

Fig. 16 Relation curve between joint positive bending moment and bolt stress

4) 加固体应变。图 17 为正弯矩作用下复合腔体的应变分布曲线。从图 17 中可以看出:复合腔体应变与接头弯矩呈正相关。弯矩达到 289 kNm 时,复合腔体应变最大;弯矩为 73 kNm 时,复合腔体与管片的黏结界面良好,复合腔体应变整体较小;弯矩达到 210 kNm 时,复合腔体与管片的黏结界面完全脱开,复合腔体应变整体变大。复合腔体应变主要集中在接缝两侧,距离接缝越近,应变越大;结构破坏时,复合腔体应变最大值为 2.238×10^{-3} 。

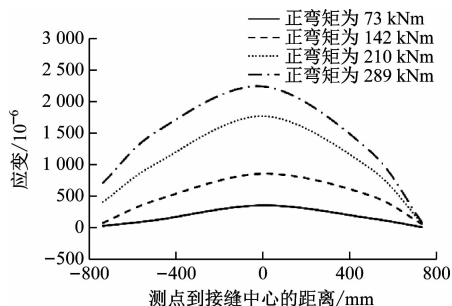


图 17 正弯矩作用下复合腔体应变分布曲线

Fig. 17 Curves of FWP strain distribution under positive bending moment

2.3 负弯矩作用下的接头试验

2.3.1 破坏现象

复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头在弯

矩为 0 ~ 94.55 kNm 时,接缝跨中挠度呈线性增加趋势,接缝附近的复合腔体与管片黏结界面出现裂缝但未失效,管片表面未发现裂缝,螺栓和锚栓受力较大。弯矩为 108.10 kNm 时,复合腔体与管片的黏结界面失效,内弧面混凝土贴紧。随着荷载继续增加,弯矩为 121.95 kNm 时,接缝挠度为 23.63 mm,接缝内弧面混凝土出现受压裂缝,螺栓已达到屈服应变。弯矩为 134.95 kNm 时,管片内弧面混凝土整体被压碎,结构达到极限状态,失去承载能力。负弯矩作用下的接头破坏照片见图 18。

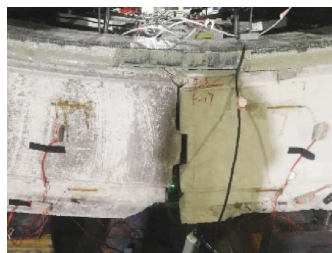


图 18 负弯矩作用下接头破坏照片

Fig. 18 Photo of joint damage conditions under negative bending moment

2.3.2 测试结果

负弯矩作用下接头试验的测量结果包括接缝挠度,接缝张开量和闭合量,化学锚栓和复合腔体应变等。其破坏过程及形态如下:

1) 接缝挠度。针对复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头,其接缝挠度在弹性阶段呈线性增加趋势。随着荷载增加,复合腔体与管片的黏结界面已失效,内弧面混凝土贴紧。弯矩为 121.95 kNm 时,接缝挠度为 23.63 mm。挠度增长速度增大,内弧面混凝土被整体压碎,螺栓和接缝侧部分锚栓已屈服,结构完全破坏,结构挠度最终为 34.31 mm。接头负弯矩-挠度关系曲线如图 19 所示。

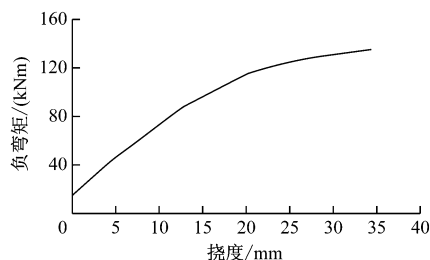


图 19 接头负弯矩-挠度关系曲线

Fig. 19 Relation curve between joint negative bending moment and deflection

2) 接缝张开量和闭合量。复合腔体加固的盾

构隧道管片纵缝接头在弹性阶段,其接缝张开量和闭合量呈线性发展,张开量和闭合量增速相对缓慢。之后复合腔体与管片的黏结界面逐步失效,接缝张开量增速增大,接缝内弧面混凝土贴紧。弯矩为 121.95 kNm 时,接缝张开量为 22.51 mm,闭合量为 0.65 mm,之后管片内弧面混凝土整体被压碎,螺栓屈服,结构完全破坏,接缝张开量最终为 32.15 mm。接头负弯矩-变形关系曲线如图 20 所示。

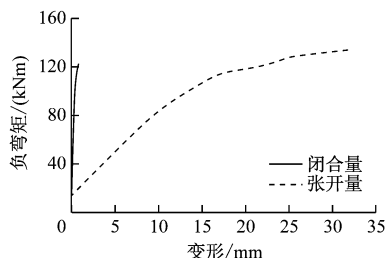


图 20 接头负弯矩-变形关系曲线

Fig. 20 Relation curve between joint negative bending moment and deformation

3) 加固体应变。图 21 为负弯矩作用下复合腔体应变分布曲线。从图 21 中可以看出:复合腔体应变与接头弯矩间呈正相关;弯矩达到 134 kNm 时,复合腔体应变最大;复合腔体应变主要集中在接缝两侧,距离接缝越近,应变越大;结构破坏时,腔体应变最大值为 2.728×10^{-3} 。

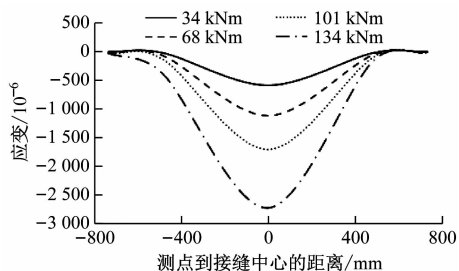


图 21 负弯矩作用下复合腔体应变分布曲线

Fig. 21 Curves of FWP strain distribution under negative bending moment

3 试验结果分析

3.1 正弯矩作用下的接头破坏模式

图 22 为正弯矩作用下的接缝弯矩-挠度关系曲线。由图 22 可以看出:在荷载作用下,结构加载至破坏前,管片与复合腔体黏结良好,螺栓和锚栓受力小。接头刚度在黏结失效后快速下降,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。由此可见,正弯矩加载作用下的接缝经历了弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段 3 个阶段。

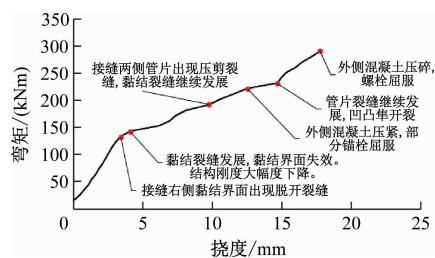


图 22 正弯矩作用下接缝弯矩-挠度关系曲线

Fig. 22 Relation curve between joint bending moment and deflection under positive bending moment

对于复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头,在弹性阶段,加固结构整体受力、变形协调。弯矩达到 142.29 kNm 时,黏结界面失效,接缝转角刚度快速下降,结构进入弹塑性阶段,管片与复合腔体的黏结界面完全脱开。弯矩达到 191.29 kNm 时,管片内侧靠近接缝处因应力集中出现斜裂缝。弯矩达到 289.29 kNm 时,锚栓屈服,接缝外侧混凝土被压碎,结构进入塑性阶段。正弯矩作用下加固接头破坏照片如图 23 所示。

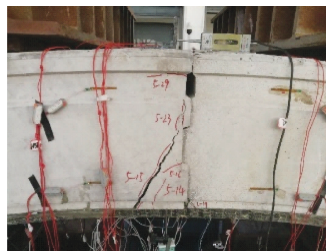


图 23 正弯矩作用下加固接头破坏照片

Fig. 23 Photo of reinforced joint damages under positive bending moment

3.2 负弯矩作用下的接头破坏模式

图 24 为负弯矩作用下的接缝弯矩-挠度关系曲线。由图 24 可以看出:在荷载作用下,结构加载至

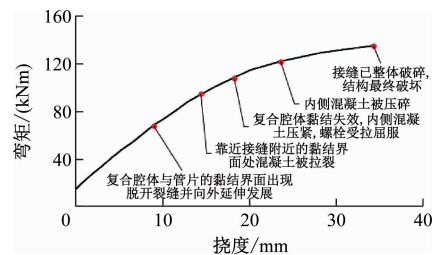


图 24 负弯矩作用下接缝弯矩-挠度关系曲线

Fig. 24 Relation curve between joint bending moment and deflection under negative bending moment

破坏前,管片与复合腔体黏结良好,螺栓和锚栓受力较大。接头刚度在黏结失效后快速下降,螺栓和锚栓受力继续增大并屈服。最终结构进入塑性阶段,管片内弧面混凝土被压碎,达到极限状态,失去承载能力。由此可见,负弯矩加载作用下的接缝经历了弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段 3 个阶段。

对于复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头,在弹性阶段,加固结构整体受力、变形协调。黏结界面在弯矩为 94.55 kNm 时逐步失效,接缝转角刚度下降,螺栓受力大。随后结构进入弹塑性阶段,黏结界面完全脱开。当加载弯矩为 108.10 kNm 时,螺栓受力增大而屈服,内侧混凝土被压紧。当加载至弯矩为 121.95 kNm 时,结构进入塑性阶段,管片接缝整体破碎,达到极限状态。负弯矩作用下接头破坏照片如图 25 所示。



图 25 负弯矩作用下接头破坏照片
Fig. 25 Photo of joint damages under negative bending moment

3.3 加固效果分析

通过试验得到了不同接缝受力条件下复合腔体加固的盾构隧道管片接头的受力特性及破坏模式。同时对加固结构的极限承载力、结构变形和刚度、加固结构的黏结强度、加固材料的受力等方面进行了分析,并总结得到加固效果。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。

正弯矩作用下,针对复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头,结构破坏时的弯矩为 289.29 kNm,结构的初始转角刚度为 32 129 kNm/rad。负弯矩作用下,针对复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头,结构破坏时的弯矩为 134.95 kNm,结构的初始转角刚度为 2 660 kNm/rad。

由复合腔体加固方法可知:对正弯矩作用下复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头附近的锚栓进行了加密布置;对负弯矩作用下复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头接缝附近的锚栓进行了减少布置。因为根据接缝受力特点,加固后的管片接

头承受正弯矩作用时,正对纵缝位置的内外衬呈现贴紧,而纵缝两侧的内外衬呈现剥离的不协调变形趋势;加固后的管片接头承受负弯矩作用时,正对纵缝位置的内外衬出现剥离,而纵缝两侧的内外衬呈现贴紧的不协调变形趋势。

因此,根据受力特点,对不同接缝受力条件下纵缝接头进行复合腔体加固设计,能够有效地提高管片接头的承载能力和刚度。加固结构的黏结强度是结构承载的关键点。黏结失效后,结构不再作为整体进行受力。之后结构发生应力重分布,仍有一定的承载能力,结构具有一定的延性。随着荷载增大,接缝内弧面混凝土接触并被压碎,最终结构进入塑性阶段,达到极限状态。

4 结论

1) 复合腔体的抗压极限承载力为 689.67 kN。受压破坏主要表现为试件上部钢材局部鼓胀,内部混凝土被压碎,同时外层纤维布因无法限制内部材料的鼓胀而被撕裂。复合腔体的抗压极限承载力为 8.25 kNm,弹性阶段截面抗弯刚度为 1.93×10^9 Nmm²。受弯破坏主要表现为跨中受压区腔体屈服,跨中受拉区碳纤维布与腔体的黏结胶层破坏,导致碳纤维布被拉裂。

2) 对不同接缝受力条件下的纵缝接头采用复合腔体进行加固,加固后正弯矩作用下接头的极限承载弯矩为 289.29 kNm,初始转角刚度为 32 129 kNm/rad;负弯矩作用下接头的极限承载弯矩为 134.95 kNm,初始转角刚度为 2 660 kNm/rad。

3) 针对复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头,其加固结构的黏结强度是其关键性能指标。黏结失效会导致复合腔体黏结面在接缝附近发生局部剥离,并逐步扩展至整个黏结面。黏结失效后,结构的整体刚度迅速降低,加固结构无法再作为整体受力。随后,结构发生应力重分布,仍保留一定的承载能力,表现出一定的延性。

4) 通过复合腔体加固的盾构隧道管片纵缝接头试验,得到不同接缝受力条件下的复合腔体加固盾构隧道管片接头破坏机理及加固效果,可为相应的加固设计优化提供依据。

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.

- GE Shuangshuang, GAO Wei, WANG Yiwei, et al. Review on evaluation and treatment of traffic shield tunnel defects in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 119.
- [2] 王如路. 上海轨道交通隧道结构安全性分析[J]. 地下工程与隧道, 2011(4): 37.
- WANG Rulu. Structural safety analysis of Shanghai rail transit tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(4): 37.
- [3] 竺维彬, 鞠世健. 盾构隧道管片开裂的原因及相应对策[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 21.
- ZHU Weibin, JU Shijian. Causes and countermeasures for segment cracking in shield-driven tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(1): 21.
- [4] 代显奇, 王军, 李占先, 等. 盾构隧道渗漏水病害成因与防治现状[J]. 人民长江, 2022, 53(11): 186.
- DAI Xianqi, WANG Jun, LI Zhanxian, et al. Research on current situation of causes and prevention measures of water leakage diseases in shield tunnels [J]. Yangtze River, 2022, 53(11): 186.
- [5] 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.
- [6] 冯冀蒙, 仇文革, 王玉锁, 等. 既有隧道病害分布规律及围岩环境等级划分研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 35.
- FENG Jimeng, QIU Wenge, WANG Yusuo, et al. Study of defect distribution regularity in existing tunnels and the classification of tunnel environments [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(4): 35.
- [7] 牟公羽, 张冬梅. 软土盾构隧道横向大变形注浆治理长期效应研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 147.
- MOU Gongyu, ZHANG Dongmei. A study on the long-term effect of grouting treatment for large transverse deformation of shield tunnels in soft soil [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 147.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吴波, 罗跃春, 臧建波. 钢管混凝土加固盾构隧道管片接头受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 105.
- WU Bo, LUO Yuechun, ZANG Jianbo. Experimental study on mechanical performance of tunnel segment joints strengthened using concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 105.
- [14] 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.
- [15] 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.
- LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Yan, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 柳献, 张姣龙, 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.
- [19] 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.

下水渗流场变化规律的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 217.

ZHANG Xuhai. Seepage point impact in urban rail transit station foundation pit enclosure structure on the variation law of surrounding groundwater seepage field[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 217.

· 收稿日期:2025-02-26 修回日期:2025-03-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-26 Revised:2025-03-20 Published:2025-06-10

· 第一作者:陈伟,工程师,819634337@qq.com

通信作者:曹占林,博士研究生,2210741@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 31 页)

LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Yan, 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.

[20] 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.

· 收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-06-15 出版日期:2025-06-10

Received:2023-04-28 Revised:2023-06-15 Published:2025-06-10

· 第一作者:孙雪兵,正高级工程师,103982434@qq.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 36 页)

HAI Wenlong, WANG Yahui, WANG Huaixiu. Gas load forecasting based on optimization of GRU neural network using IPSO algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 126.

· 收稿日期:2023-06-02 修回日期:2023-07-06 出版日期:2025-06-10

Received:2023-06-02 Revised:2023-07-06 Published:2025-06-10

· 第一作者:周意,硕士研究生,hbhg_zy@163.com

通信作者:王章琼,副教授,wzqcug@163.com

· ©《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 42 页)

[19] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2017.

ZHANG Wentong. Basic course of SPSS statistical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.

[20] 段志强, 王力, 李立功, 等. 单盾盾隧道掘进机在砂岩、砂质泥岩地层中的掘进参数关系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 120.

DUAN Zhiqiang, WANG Li, LI Ligong, et al. Relation of tunneling parameters of single shield TBM in sandstone and sandy mud-

stone stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 120.

· 收稿日期:2023-05-28 修回日期:2023-10-11 出版日期:2025-06-10

Received:2023-05-28 Revised:2023-10-11 Published:2025-06-10

· 第一作者:时健,博士研究生,924532404@qq.com

通信作者:张仕林,博士研究生,高级工程师,zhangshilin.2005@163.com

· ©《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 47 页)

ZHANG Yingxin, WANG Zhansheng, TAO Yufan, et al. Thrust prediction during diagonal cutting of concrete diaphragm wall for TBM based on machine learning[J]. Henan Science, 2024, 42(12): 1792.

[10] 邱广宇, 房欣悦, 张旺. 基于机器学习的高速列车车头型多目标优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(4): 41.

QIU Guangyu, FANG Xinyue, ZHANG Wang. Multi-objective optimization design of high-speed train head shape based on machine learning[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2024, 45(4): 41.

[11] 史刚. 基于机器学习的装载机铲装作业性能预测与优化研究[D]. 柳州:广西科技大学, 2024.

SHI Gang. Research on prediction and optimization of loader shoveling performance based on machine learning[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2024.

[12] YAO J, EDSON C P, YU S, et al. Bucket loading trajectory optimization for the automated wheel loader[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(6): 6948.

[13] 陆怀民, 张云廉, 刘晋浩. 土壤切削弹粘塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 100.

LU Huaimin, ZHANG Yunlian, LIU Jinhao. Elastoviscoplastic finite element analysis of soil cutting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 100.

· 收稿日期:2025-02-13 修回日期:2025-04-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-13 Revised:2025-04-20 Published:2025-06-10

· 通信作者:曹昱,工程师,515141032@qq.com

· ©《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