

新型管片接头盾构隧道衬砌结构整环足尺试验研究

赵明应^{1,2} 何应道^{1,2} 吴鑫林^{1,2} 张肇一³ 白海文³ 柳 献³

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 430063, 武汉;

3. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海)

摘 要 [目的] 目前, 我国的盾构隧道结构存在管片局部削弱、接缝变形大、施工效率低及不利于自动化拼装等问题, 因此, 有必要对采用新型管片接头的盾构隧道结构力学性能进行研究。[方法] 介绍了试验概况、加载方案及测试系统; 基于新型管片接头的力学性能, 对盾构隧道衬砌结构力学性能进行分析, 并开展新型管片接头盾构隧道衬砌结构整环足尺试验。[结果及结论] 采用新型管片接头的盾构隧道衬砌结构在各工况下的收敛变形、接缝变形量及连接件受力均满足设计要求; 管片结构整体变形呈现左右不对称的特点, 管片结构右腰的变形量和内力均大于左腰; 管片结构在弹性阶段的刚度为 2.21×10^4 N/mm; 由于正弯矩接头连接件的受力相较于负弯矩接头更加不利, 因此在施工运营过程中, 应重点关注管片结构顶底位置的接缝受力情况。

关键词 盾构隧道; 管片接头; 整环足尺试验

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.024

Full-Scale Full-Ring Experimental Study on Shield Tunnel Lining Structure with Innovative Segment Joints

ZHAO Mingying^{1,2}, HE Yingdao^{1,2}, WU Xinlin^{1,2}, ZHANG Zhaoyi³, BAI Haiwen³, LIU Xian³

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Underwater Tunnel Technology, 430063, Wuhan, China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Presently, shield tunnel structures in China face challenges including local segment weakening, significant joint deformation, low construction efficiency and hindered automated assembly. Therefore, it is necessary to study the mechanical properties of shield tunnel structures with innovative segment joints. [Method] The test overview, loading scheme and test system are introduced. Based on the mechanical properties of innovative segment joints, an analysis on the mechanical properties of shield tunnel lining structures is conducted, and a full-scale full-ring test on such structures is car-

ried out. [Result & Conclusion] The convergence deformation, joint deformation and connector stress of the shield tunnel lining structure with innovative segment joints under various working conditions all meet design requirements; the overall segment structure deformation shows asymmetric characteristics, with both the segment structure deformation and internal force of the right waist greater than those of the left waist; the segment structure stiffness in the elastic stage is 2.21×10^4 N/mm. Since the stress on the connector of positive moment joints is more unfavorable than that on negative moment joints, special attention should be paid to the stress of joints at the top and bottom of the segment structure during construction and operation process.

Key words shield tunnel; segment joint; full-scale full-ring test

我国的盾构隧道结构体系基本上采用钢筋混凝土管片配合螺栓的形式, 由不同类型的螺栓(直螺栓、弯螺栓或斜螺栓)拼装连接钢筋混凝土管片, 管片接缝间设置弹性密封垫防水。该结构体系有以下几个缺点: ①混凝土管片承载力被削弱, 管片局部开裂; ②管片接缝变形较大, 容易发生渗漏水情况; ③无法实现管片拼装全过程机械化施工, 施工效率较低。

随着盾构隧道施工技术和结构形式的深入研究, 一种新型接头盾构隧道应运而生。相较于螺栓接头盾构隧道, 这种新型接头盾构隧道的结构整体性强, 不需要设置手孔, 能够实现自动化拼装。新型接头盾构隧道管片在施工时依靠盾构千斤顶和管片拼装机即可完成拼装, 省去了人工作业的工序, 显著提高了盾构隧道管片拼装的施工效率。

我国对新型接头盾构隧道的研究尚处于起步阶段。不少学者开展了新型连接件、新型接头试验和数值模型研究^[1-2], 通过试验监测和数值模拟方法研究了新型连接件和新型接头的力学性能。2019年, 上海轨道交通18号线沈梅路站一工作井区间的

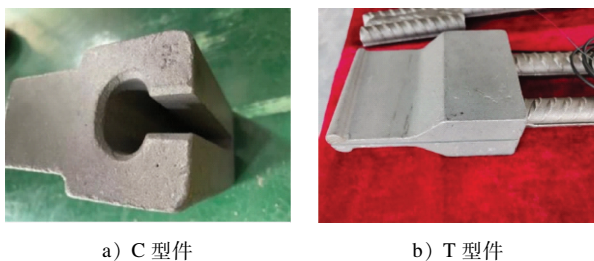
入场线盾构区间进行了首次以新型接头盾构隧道作为区间隧道的实际应用^[3]。上海、南京、武汉、深圳、广州等地正在逐步推广新型接头盾构隧道的应用,针对不同地质条件及管片尺寸下的新型接头盾构隧道力学性能研究亟须开展。

采用整环足尺试验法能够直观地对给定荷载条件下的管片结构力学性能进行研究,已有较多文献采用整环足尺试验法对各种衬砌结构的力学性能开展了研究^[4]。本文以南京江心洲污水收集系统二通道建设工程(过江隧道应急消险段)项目为例,开展了1:1新型接头盾构隧道衬砌结构整环试验,研究了设计工况下管片结构的收敛变形、接缝变形、内力分布及接头受力情况,分析了结构变形、内力变化规律及接头受力特点。本文研究可为新型接头盾构隧道衬砌结构的推广应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验试件

本次试验采用的衬砌圆环外径为8.80 m,内径为7.90 m,管片厚度为0.45 m,环宽为1.50 m。衬砌圆环采用8分块形式,其中包括1个16.363 6°(管片分块角度)的封顶块(F块)、2个49.090 9°的邻接块(L1块、L2块)、5个49.090 9°的标准块(B1块、B2块、B3块、B4块、B5块)。盾构管片采用C50等级、防水P12级的混凝土。纵缝采用C-T型连接件,如图1所示。试验所采用的管片结构示意图如图2所示。



a) C 型件 b) T 型件

图1 C-T型连接件照片

Fig.1 Photos of C-T type connectors

1.2 加载方案

针对新型接头盾构隧道衬砌结构,加载过程分为加载段和卸载段,加载段模拟不同断面的荷载工况,包括埋深为16 m的荷载稳定工况(工况1)、埋深为20 m的荷载稳定工况(工况2)、埋深为24 m的荷载稳定工况(工况3)。试验荷载加载点位示意图如图3所示,试验时各工况荷载如表1所示。

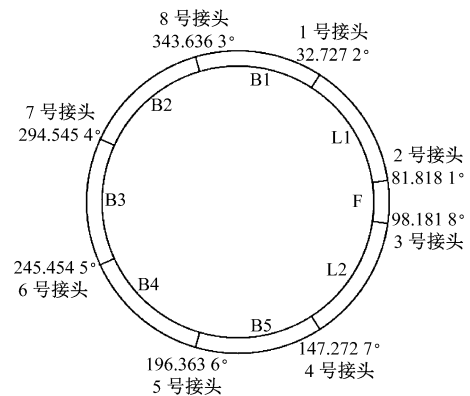
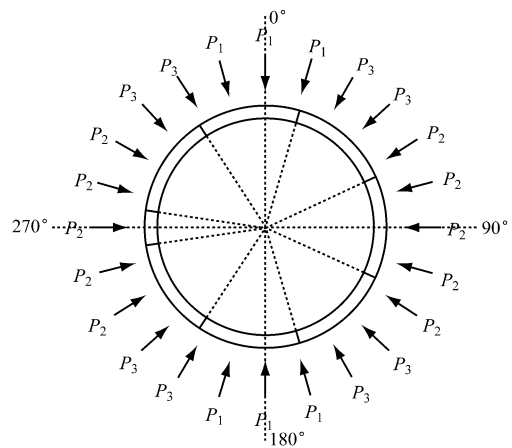


图2 管片结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of segment structure



注: P_1 为顶部和底部荷载; P_2 为腰部荷载; P_3 为肩部荷载。

图3 试验荷载加载点位示意图

Fig.3 Schematic diagram of test load application points

1.3 测试系统

新型接头盾构隧道衬砌结构整环足尺试验指标包括管片结构形状变化、管片本体内力变化、管片裂缝发展、接缝张开量、纵缝内力变化。测试项目及测点参数如表2所示。

2 整环足尺试验结果

2.1 结构收敛变形

设计工况下,不同结构位置处的荷载与收敛变形关系曲线如图4所示。结构整体的收敛变形基本随着荷载的增大而线性增大,说明结构整体处于弹性状态。管片结构顶底向内收敛,腰部向外扩张,整体变形呈现“横鸭蛋”模式;相比于腰部向外变形量,顶底向内变形量较大,其为腰部向外变形量的

表 1 试验时各工况荷载表

Tab.1 Table of test loads under each working condition					
工况编号	加载顺序步	P_1 / kN	P_2 / kN	P_3 / kN	广义荷载/ kN
工况 1	0	0	0	0	0
	1	120	76	100	44
	2	240	152	200	88
	3	360	228	300	132
	4	480	304	400	176
	5	600	380	500	220
	6	690	437	575	253
	7	720	456	600	264
工况 2	8	754	474	628	280
	9	820	540	708	280
	10	892	612	782	280
	11	908	621	798	287
工况 3	12	972	657	862	315
	13	1 020	684	910	336
	14	1 044	697	939	347

表 2 测试项目及测点参数

Tab.2 Test items and measurement points parameters			
测试项目	测试仪器量程	测量精度	测点数量/个
结构收敛变形	500 mm	0.01 mm	12
混凝土应变(管片)	$20\,000 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	40
主筋应变	$20\,000 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	150
纵缝张开量	100 mm	0.01 mm	16
连接件应变	$20\,000 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	32

1. 10 ~ 1.26 倍。工况 3 的衬砌结构顶底最大收敛变形量为 15.72 mm,其变形大小为结构外径的 1.8‰;衬砌结构腰部最大变形量为 12.43 mm,其变形大小为结构外径的 1.4‰。

2.2 接缝张开变形

设计工况下,不同管片接头处的荷载与接缝张开量关系曲如图 5 所示。总体上看,正弯矩管片接头内弧面受拉张开,负弯矩管片接头外弧面受拉张开。在加载初期,由于存在拼装误差,每个管片接头的初始状态有所不同,各管片接头纵缝张开展趋势存在差异。工况 3 下,正弯矩管片接头中,5 号管片接头的张开量为 0.59 mm,8 号管片接头的张开量为 0.12 mm;负弯矩管片接头中,2 号管片接头的张开量为 0.14 mm,3 号管片接头的张开量为 0.53 mm,6 号管片接头的张开量为 0.06 mm。

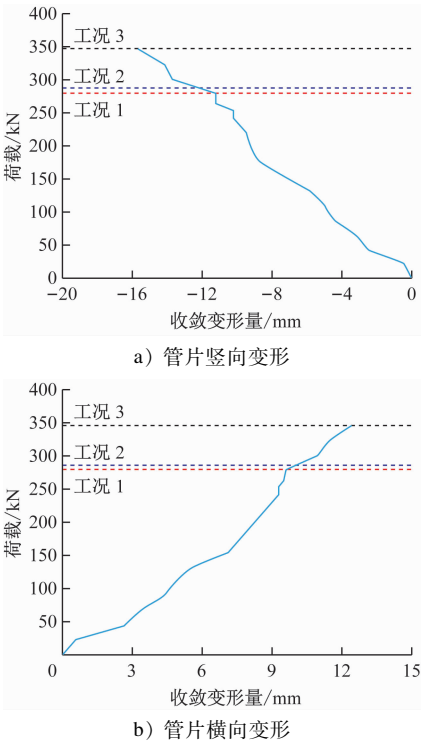


图 4 不同结构位置处的荷载与收敛变形关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between load and convergence deformation at different structural positions

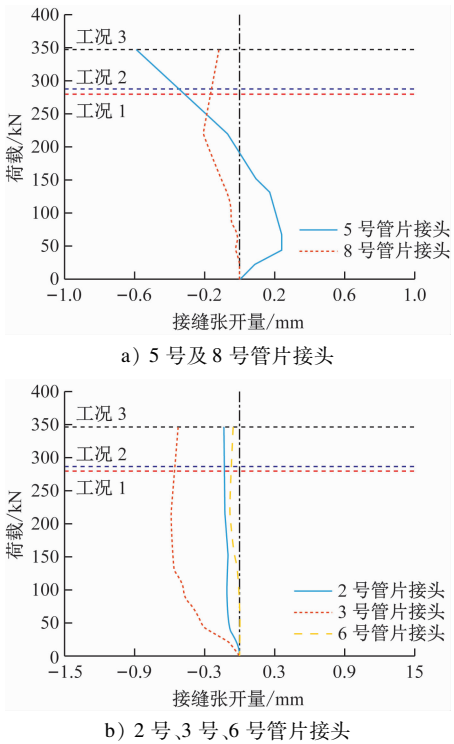


图 5 不同管片接头处的荷载与接缝张开量关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between load and joint opening value at different segment joints

2.3 结构内力变化

对由试验测试得到的各特征荷载点下的管片主筋和表面混凝土应变进行内力计算,计算时假设各截面应变满足平截面假定。由于封顶块沿环向的尺寸较小,测试所需引线的范围远大于封顶块区域范围,因此在封顶块位置没有设置应变测试光缆,试验环内其他区域布设应变测试光缆。

工况 1 下的管片结构内力分布示意图如图 6 所示。管片结构顶部弯矩为 291 kNm,轴力为 1 272 kN;管片结构底部弯矩为 125 kNm,轴力为 1 568 kN;管片结构左腰弯矩为 -45 kNm,轴力为 1 375 kN;管片结构右腰 100° 位置处的弯矩为 -212 kNm,轴力为 2 262 kN。

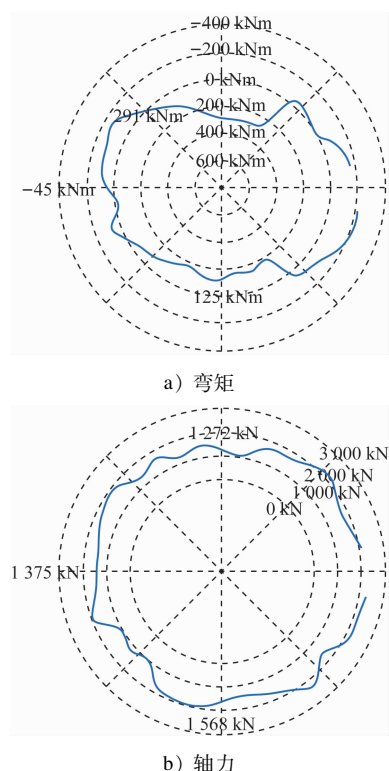


图 6 工况 1 下的管片结构内力分布示意图

Fig. 6 Internal force distribution diagram of the segment structure under working condition 1

工况 2 下的管片结构内力分布示意图如图 7 所示。管片结构顶部弯矩为 350 kNm,相较于工况 1 增大了 20.3%;其轴力为 1 465 kN,相较于工况 1 增大了 15.0%。管片结构底部弯矩为 149 kNm,相较于工况 1 增大了 19.2%;其轴力为 1 748 kN,相较于工况 1 增大了 11.5%。管片结构左腰弯矩为 -66 kNm,相较于工况 1 增大了 46.7%;其轴力为 1 683 kN,相较于工况 1 增大了 22.4%。管片结构

右腰 100° 位置处弯矩为 -238 kNm,相较于工况 1 增大了 12.6%;其轴力为 2 519 kN,相较于工况 1 增大了 11.4%。

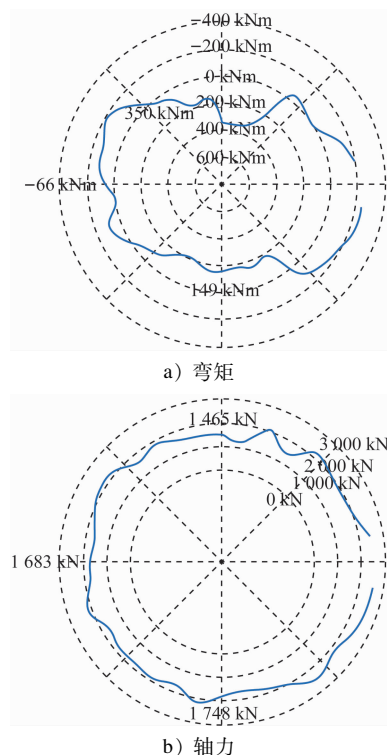


图 7 工况 2 下的管片结构内力分布示意图

Fig. 7 Internal force distribution diagram of the segment structure under working condition 2

工况 3 下的管片结构内力分布示意图如图 8 所示。管片结构顶部弯矩为 443 kNm,相较于工况 2 增大了 26.8%;其轴力为 2 018 kN,相较于工况 2 增大了 37.7%。管片结构底部弯矩为 206 kNm,相较于工况 2 增大了 38.2%;其轴力为 2 185 kN,相较于工况 2 增大了 25.0%。管片结构左腰弯矩为 -121 kNm,相较于工况 2 增大了 83.3%;其轴力为 2 223 kN,相较于工况 2 增大了 32.1%。管片结构右腰 100° 位置处弯矩为 -293 kNm,相较于工况 2 增大了 23.1%;其轴力为 3 059 kN,相较于工况 2 增大了 21.4%。

2.4 连接件应变

设计工况下,不同管片接头处的荷载与纵缝连接件应变关系曲线如图 9 所示。

对于正弯矩管片接头,纵缝连接件应变随着荷载的增大而增大。受到拼装效果的影响,在加载初期,纵缝连接件总体应变较小。工况 3 下,5 号管片接头连接件应变为 152.63×10^{-6} ,8 号管片接头连接件应变为 84.15×10^{-6} 。

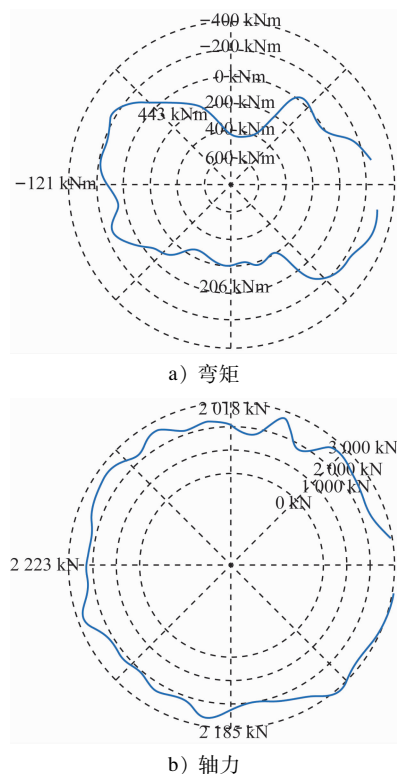
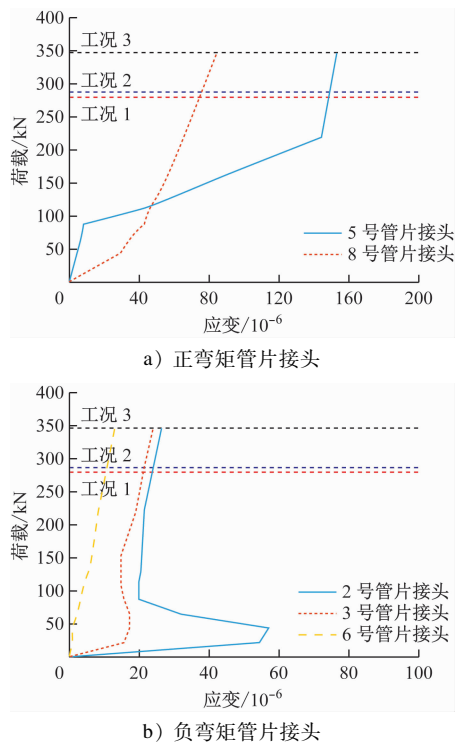


图8 工况3下的管片结构内力分布示意图

Fig. 8 Internal force distribution diagram of the segment structure under working condition 3



注:应变以拉应变为正,以压应变为负。

图9 不同管片接头处的荷载与纵缝连接件应变关系曲线

Fig. 9 Strain relationship curves between load and longitudinal joint connector at different segment joints

对于负弯矩接头,在加载初期,2号和3号管片接头连接件应变快速发展,6号管片接头的连接件应变则随着荷载均匀增长。工况3下,2号管片接头连接件应变为 26.40×10^{-6} ,3号管片接头连接件应变为 23.93×10^{-6} ,6号管片接头连接件应变为 13.20×10^{-6} 。

3 分析与讨论

3.1 结构变形特点

基于上述分析,3种工况的管片结构整体变形示意图如图10所示。管片结构整体收敛变形较小,最大收敛变形量为结构外径的1.8‰,小于结构设计对收敛变形的控制要求(3.0‰),说明管片衬砌结构满足结构设计的使用性能要求。管片结构顶底向内收敛,腰部向外扩张,整体变形呈现“横鸭蛋”模式,顶底向内变形量相比于腰部向外变形量更大。

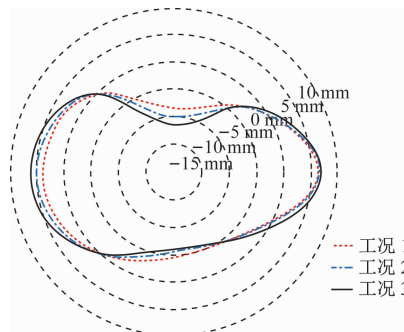


图10 3种工况的管片结构整体变形示意图

Fig. 10 Overall deformation diagram of the segment structure under three working conditions

由图10可知:管片结构右侧腰部变形大于管片结构左侧腰部变形。由于荷载是完全对称施加的,若管片结构为均质圆环,则腰部变形量必然一致。但实际结构中管片结构并非为左右对称结构,封顶块位于结构右侧腰部位置,导致右侧腰部的接缝数量较左腰多。接缝是衬砌结构的非连续截面,其刚度小于管片本体的刚度,因此管片结构右侧腰部的局部刚度比左侧腰部的局部刚度小,导致管片结构右侧腰部的变形量大于左侧腰部的变形量。

管片结构顶部的变形量略微大于管片底部的变形量,这可能与管片结构变形较小、试验过程存在误差有关,但从总体上看,管片结构在设计工况下变形很小、刚度较大,通过广义荷载及顶底收敛变形计算得到的管片结构在弹性阶段的刚度为

$2.21 \times 10^4 \text{ N/mm}$ 。

3.2 结构内力特点

工况 1—工况 3 的管片结构内力分布具有以下特点:管片结构顶底承受正弯矩,管片结构腰部承受负弯矩,管片结构顶部弯矩大于底部弯矩,管片结构右腰弯矩大于左腰弯矩;轴力沿管片结构分布较均匀,管片结构顶部轴力小于底部轴力,管片结构右腰轴力大于左腰轴力。

3 种工况下的管片结构内力如表 3 所示。管片结构最大正弯矩发生在管片结构顶部附近,且其随着结构埋深的增大而增大;工况 3 的管片结构最大正弯矩比工况 1 的管片结构最大正弯矩增加了 26.6%。管片结构最大负弯矩发生在管片结构右腰附近,且其随着结构埋深的增大而增大,工况 3 的管片结构最大负弯矩比工况 1 的管片结构最大负弯矩增加了 38.2%,结构负弯矩的增长量大于正弯矩的增长量。

管片结构的轴力随着埋深的增大而增大,工况 3 的平均轴力比工况 1 的平均轴力增大了 46.4%。从总体上看,不同工况下,管片结构的轴力变化最大。

表 3 3 种工况下的管片结构内力

Tab.3 Pipe segment structure internal forces under three working conditions

工况编号	最大正弯矩/(kNm)	最大负弯矩/(kNm)	平均轴力/kN
工况 1	291	-212	1 619
工况 2	350	-238	1 848
工况 3	443	-293	2 371

3.3 接缝受力特点

3 种工况下,最大接缝张开量为 0.59 mm,满足接缝张开量不超过 3.00 mm 的设计要求。连接件应变均未超过 $2\,000 \times 10^{-6}$,即结构受力小于连接件屈服强度,满足连接件使用性能要求。

对比正、负弯矩管片接头的受力特点可知,正弯矩接头与负弯矩接头的张开量没有明显差异。总体上看,接头连接件在设计阶段的受力较小,正弯矩接头连接件应变比负弯矩接头连接件应变更大,前者为后者的 3.18~11.56 倍。结合管片内力分布特点可知,管片结构顶底正弯矩的绝对值大于管片结构腰部负弯矩的绝对值,因此管片结构在顶

底位置截面的受弯程度更大,接头的受力更加不利。

4 结语

本文以南京江心洲污水收集系统二通道建设工程为例,对其隧道衬砌结构进行整环足尺试验研究,主要获得以下结论:

1) 管片结构在各工况下的收敛变形量、接缝变形量及连接件受力均满足设计要求。

2) 管片结构整体变形呈现左右不对称的特点,管片结构右腰的变形量和内力均大于左腰。管片结构在弹性阶段的刚度为 $2.21 \times 10^4 \text{ N/mm}$ 。

3) 正弯矩接头连接件的受力相较于负弯矩接头更加不利,在施工运营过程中,应重点关注管片结构顶底位置的接缝受力情况。

参考文献

- [1] 李海涛. 盾构隧道快速连接件接头受力性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.
LI Haitao. Study on mechanical performance of quick connector joint in shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [2] 柳献, 师一鸣, 胡秋斌, 等. 大直径盾构隧道新型纵缝接头抗弯性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(2): 497.
LIU Xian, SHI Yiming, HU Qiubin, et al. Experimental study on mechanical properties of a new longitudinal joint for large-diameter shield tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(2): 497.
- [3] 毕湘利, 柳献, 李文勇, 等. 盾构法地铁隧道管片新型连接件技术应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 1.
BI Xiangli, LIU Xian, LI Wenyong, et al. Research on the application of new connecting segment technology in metro shield tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 1.
- [4] 柳献, 叶宇航, 刘震, 等. 类矩形盾构隧道结构整体安全性试验与分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 164.
LIU Xian, YE Yuhang, LIU Zhen, et al. Experiment and analysis on overall safety of quasi-rectangular shield tunnel structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 164.

· 收稿日期:2023-04-05 修回日期:2023-05-05 出版日期:2025-05-10

Received:2023-04-05 Revised:2023-05-05 Published:2025-05-10

· 第一作者:赵明应,高级工程师,121741878@qq.com

通信作者:白海文,博士研究生,bhw@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