

基于弯矩传递足尺试验的大直径地铁盾构隧道 承插式管片环间传力性能研究*

胡秋斌¹ 师一鸣¹ 曹伟颺² 李文勇² 柳 猷¹

(1. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 201102, 上海)

摘 要 [目的]采用双排连接件的大直径盾构隧道接头力学性能及环间传力性能更为复杂,故有必要针对采用双排快速连接件的错缝拼装承插式管片,开展管片弯矩传递足尺试验,对新型接头在大直径盾构隧道中力学性能开展研究。[方法]基于某大直径盾构隧道工程,开展了大盾构隧道承插式管片弯矩传递足尺试验,研究了双排布置快速连接件接头的管片环间传力性能,得到了弯矩传递系数等重要设计参数,分析了新型接头受力性能发展规律,探究了新型接头隧道纵向传力机理并开展影响因素分析。[结果及结论]采用新型接头的管片弯矩传递效应较好,错缝拼装方式纵缝接头转角刚度有所提高,充分发挥了管片本体的承载能力;随外荷载的增大,弯矩传递效应不断变化,弯矩传递系数是一个随外荷载不断变化的值;隧道纵向力增大,弯矩传递效应有所加强,纵向力对弯矩传递系数影响规律基本呈线性正相关关系。随隧道纵向力不断增大,纵缝接头转角刚度呈增大趋势,转角刚度与纵向力基本呈线性正相关关系。

关键词 地铁;大直径盾构隧道;管片接头;新型连接件;弯矩传递;转角刚度

中图分类号 U452;U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.030

Force Transmission Performance between Socket-Type Segments Rings of Large-Diameter Shield Tunnel Based on Full-Scale Bending Moment Transfer Tests

HU Qiubin¹, SHI Yiming¹, CAO Weibiao², LI Wenyong², LIU Xian¹

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China; 2. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201102, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Since the mechanical properties and force transmission performance between rings of the large-diameter shield tunnel joints using double-row connectors are more complicated, it is necessary to carry out full-scale bending moment transfer tests on the staggered socket-type seg-

ments with double-row quick connectors, and to study the mechanical properties of new type joint in large-diameter shield tunnels. [Method] Based on a large-diameter shield tunnel project, full-scale bending moment transfer tests are conducted on socket-type segments in a large shield tunnel. The force transmission performance between segment rings with double-row quick connectors is investigated, and important design parameters such as the bending moment transfer coefficient are obtained. The force performance development law of the new type joint is analyzed, and the longitudinal force transmission mechanism of the tunnel with new type joints is explored, and the influencing factors are analyzed. [Result & Conclusion] The bending moment transfer effect of the pipe segment adopting new joints is better, the longitudinal joint angular stiffness of the staggered assembly method is improved, and the bearing capacity of the pipe segment body is fully utilized; with the increase of external load, the bending moment transfer effect changes continuously, and the bending moment transfer coefficient is a value changing continuously with the external load; with the increase of tunnel longitudinal force, the moment transfer effect is somewhat strengthened, and the influence of the longitudinal force on the moment transfer coefficient is basically linearly positively correlated. With the continuous increase of tunnel longitudinal force, the angular stiffness of the longitudinal joint increases, and the angular stiffness and the longitudinal force are basically linearly positively correlated.

Key words metro; large-diameter shield tunnel; segment joint; new type connector; bending moment transfer; angular stiffness

管片接缝是盾构隧道衬砌结构的薄弱环节^[1],其质量直接影响盾构隧道整体受力性能。快速连接件可弥补螺栓接头的缺点,提升隧道施工效率,为盾构隧道智能建造奠定基础。文献[2-3]针对C-T型纵缝插销式快速连接件开展了试验和模拟研

* 国家自然科学基金项目(51578409)

究,研究表明 C-T 型连接件适用性强,接头转角刚度高。文献[4]开展了错缝拼装的类矩形盾构隧道环间传力性能试验,结果表明弯矩传递系数随纵向力的增大呈增大趋势。文献[5-6]发现,新型接头相对于传统螺栓接头有更大的转角刚度和受力性能。文献[7-8]分析了新型隧道的力学性能,为新型隧道设计和工程应用提供参考依据。可见,针对小直径盾构隧道管片接缝的力学性能研究已取得较多成果。

对于大直径盾构隧道,管片厚度大,隧道外部荷载大,单排连接件无法满足大直径盾构隧道使用要求。与小直径盾构隧道相比,采用双排连接件的大直径盾构隧道接头力学性能及环间传力性能更为复杂。故有必要针对采用双排快速连接件的错缝拼装承插式管片,开展管片弯矩传递足尺试验(以下简称“弯矩传递试验”),进而研究双排快速连接件接头的大直径盾构管片环间传力性能,计算弯矩传递系数等重要设计参数,以期为新型大直径盾构隧道的设计和推广应用提供参考。

1 弯矩传递试验概况

1.1 新型连接件参数

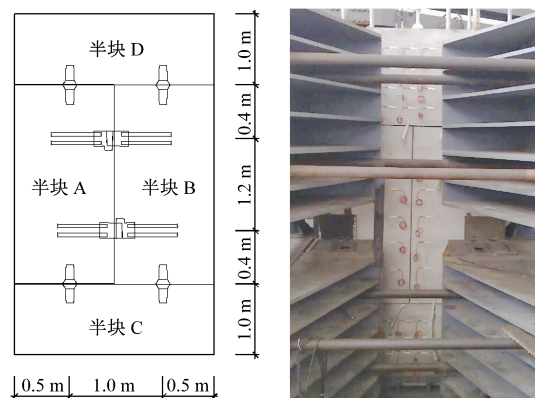
弯矩传递试验中,纵缝快速连接件本体材料为球墨铸铁 QT500-7、锚固钢筋的材料为 SD345,锚固钢筋和连接件本体通过螺纹连接。球墨铸铁 QT500-7 屈服强度为 320 MPa,抗拉强度为 500 MPa,伸长率为 7%,弹性模量为 160 GPa,泊松比为 0.25~0.30。T 型纵缝连接件的面积为 1 172 mm²,连接件锚固钢筋长度为 300 mm,锚固钢筋截面积为 982 mm²。

1.2 试件设计

弯矩传递试验所用试件基于上海某盾构隧道工程。该盾构隧道的外直径为 12.9 m,内直径为 11.8 m,管片厚度为 0.55 m,管片环宽为 2.0 m,混凝土强度等级为 C60。纵缝接头采用双排布置的 C-T 型插销式快速连接件,即设置 4 组 C-T 型插销式快速连接件。环缝接头采用螺纹型插入式快速连接件,每环设置 17 个螺纹型插入式快速连接件。

弯矩传递试验采用足尺管片。由于直管片与弯管片接头受力性能接近^[9],故为简化试验设计,采用直线型试件来模拟接头处的管片。每组试验管片由半块 A、半块 B、半块 C 及半块 D 组成,如图 1 所示。试件保留了嵌缝、止水带等细部构造,试验

时未安装止水带。纵缝内、外两侧的嵌缝构造略有不同,外侧嵌缝深 98 mm,内侧嵌缝深 25 mm。由此可知,相较于接头受正弯矩作用时,接头处受负弯矩作用时的混凝土受压截面高度更高。



a) 完整试件主视图示意图 b) 现场拼装接头主视图

图 1 弯矩传递试验的试验管片

Fig. 1 Experimental segments for bending moment transfer tests

1.3 加载系统

弯矩传递试验采用双层“钢蝴蝶”式加载系统,使用了 18 个对拉千斤顶,其中 2 个竖向对拉千斤顶用于加载三环衬砌管片的纵向力 P ,16 个横向千斤顶用于接头处加载。该加载系统不仅能完成管片三环夹片试件的单向加载试验,还能对三环管片施加纵向力。将接头处加载的 16 个千斤顶分为 3 组,第 1、2、3 组的千斤顶合力分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 。弯矩传递试验加载示意如图 2 所示。加载时,同组千斤顶对应荷载相同,可通过控制第 1、2、3 组千斤顶的大小对接头来加载轴力 N 及弯矩 M ,有:

$$N = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$M = (F_1 - F_3)L \quad (2)$$

式中:

L ——第 1、3 组千斤顶之间的距离。

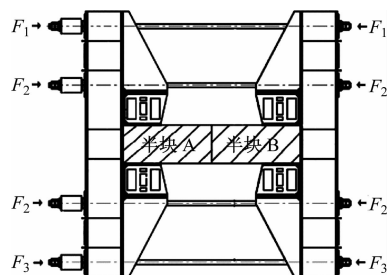


图 2 弯矩传递试验加载示意图

Fig. 2 Loading diagram of bending moment transfer tests

1.4 弯矩传递试验的加载工况

本试验以接头内侧受拉为正弯矩,以接头内侧受压为负弯矩。根据盾构隧道不同工况下的接头荷载,弯矩传递试验的加载工况分为设计工况和极限工况。设计工况的加载偏心距为 0.2 m 和 -0.2 m,并分别在偏心距为 0.2 m 和 -0.2 m 的情况下进行纵向轴力为 300 kN、450 kN、600 kN、900 kN 的加载试验。极限工况下,加载偏心距为 0.3 m,纵向轴力为 300 kN。

2 管片环间传力性能

2.1 破坏过程

由试验结果,极限工况下,中间环(半块 A、半块 B)锚固钢筋应变如图 3 所示,试件破坏现象如图 4 所示。

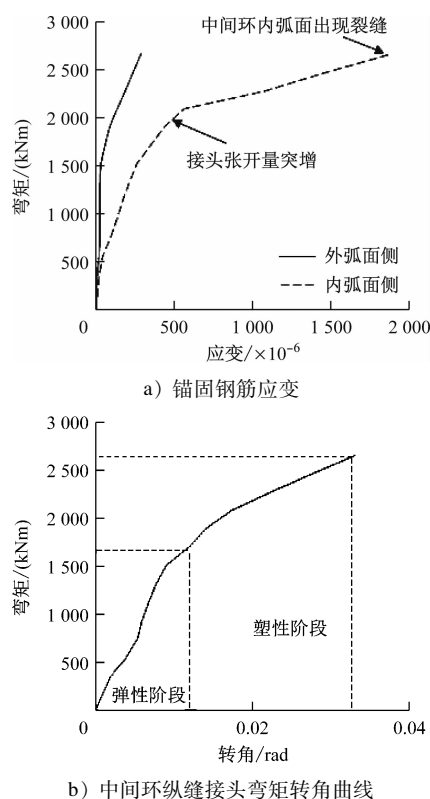


图3 极限工况下的中间环锚固钢筋应变

Fig.3 Strain of the intermediate ring anchored reinforcement under extreme working conditions

由图 3 可见:试验初期,试件处于弹性阶段,各项数据呈线性增大趋势;当 $M = 2\ 088\ \text{kNm}$ 时,内弧面侧的锚固钢筋拉应变出现拐点,外弧面侧的锚固钢筋也处于受拉状态,纵缝接头的受压区向外弧面移动,两排快速连接件均处于受拉状态,进而导致

纵缝接头张开,弯矩转角曲线出现拐点;当 $M = 2\ 664\ \text{kNm}$ 时,内弧面侧的锚固钢筋拉应变较大,达 $1\ 887\ \mu\epsilon$,导致快速连接件轻微拔出混凝土管片,从而在快速连接件周围产生 X 形裂缝并向管片表面发展。试验时在中间环内弧面的纵缝附近观察到了该裂缝。由图 3 b) 可见,极限工况的弯矩转角曲线呈双折线变化。由弹性阶段及塑性阶段的弯矩转角拟合曲线可得:纵缝接头的弹性阶段转角刚度较高,为 $1.62 \times 10^5\ \text{kNm/rad}$;纵缝接头的塑性阶段转角刚度明显降低,仅为 $3.92 \times 10^4\ \text{kNm/rad}$,约为弹性阶段转角刚度的 24.2%。

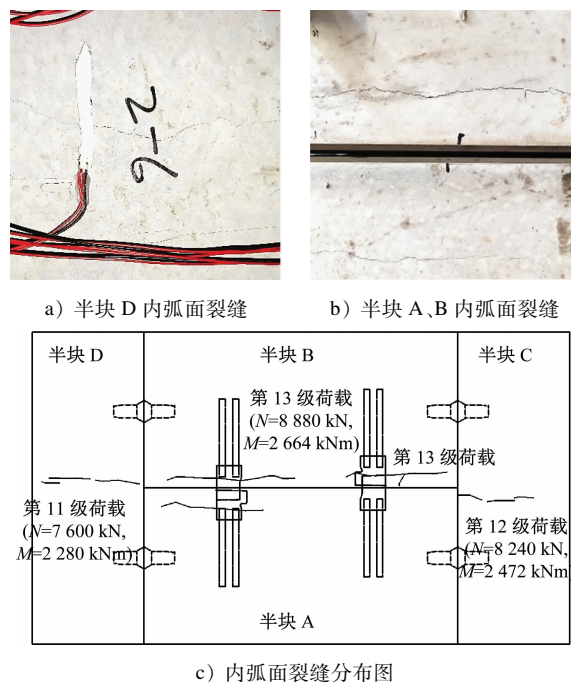


图4 极限工况破坏现象

Fig.4 Failure phenomena under extreme working conditions

试验结果显示,纵缝接头连接件未出现拉断现象,快速接头的薄弱部位为锚固钢筋与管片混凝土锚固段。锚固钢筋的锚固段设计长度应满足相关要求。

2.2 转角刚度

弯矩传递试验得到了纵缝接头在不同纵向力 P 下的转角刚度 k_θ ,如表 1 所示。

由表 1 可见,随着 P 不断增大, k_θ 呈增大趋势。经分析, P 的增大提高了环缝面摩擦力的上限,当纵缝接头受弯张开时,环缝面的摩擦力会限制纵缝接头的变形,从而提高 k_θ 。此外,负弯矩工况下($e_2 = -0.2\ \text{m}$ 时)的 k_θ 明显大于正弯矩工况下($e_1 = 0.2\ \text{m}$ 时)的 k_θ ,约为正弯矩工况的 (6.67 ~ 7.47) 倍,这

是由负弯矩工况下纵缝接头截面有效高度更高所致。

表 1 纵缝接头在不同纵向力下的转角刚度

Tab. 1 Angular stiffness of longitudinal joints under different longitudinal forces

P/kN	$k_{\theta}/(\text{MNm/rad})$	
	$e_1 = 0.2 \text{ m}$ 时	$e_2 = -0.2 \text{ m}$ 时
300	261	1 950
450	312	2 080
600	341	2 340
900	367	2 470

2.3 弯矩传递系数

弯矩传递试验可得到盾构隧道设计时的关键设计参数——弯矩传递系数 ξ 。当试验外荷载的总弯矩为 M 时,定义中间环纵缝接头的弯矩为 M_1 ,两侧管片跨中处的弯矩为 M_2 、 M_3 ,则不同设计工况的 ξ 为:

$$\xi = \frac{2(M_2 + M_3) - M}{M} \quad (3)$$

计算结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, P 的增大提高了纵缝接头的 ξ 。 P 相同时,正弯矩工况下的 ξ 大于负弯矩工况下的 ξ ,这一规律与纵缝接头的转角刚度有关。纵缝接头在正弯矩工况下的 k_{θ} 远小于负弯矩工况下的 k_{θ} ,因此在正弯矩工况下纵缝接头的张开量更大、环缝错台量更大,这会在环缝连接件处产生更大的剪力,从而将更多的弯矩传递至两侧管片。

表 2 弯矩传递系数对比

Tab. 2 Comparison of bending moment transfer coefficients

P/kN	弯矩传递系数	
	$e_1 = 0.2 \text{ m}$	$e_2 = -0.2 \text{ m}$
300	0.23	0.11
450	0.24	0.14
600	0.29	0.16
900	0.32	0.22

绘制 ξ - P 变化曲线,并对曲线进行拟合,如图 5 所示。由图 5 可见,在 $P = 300 \sim 900 \text{ kN}$ 范围内, ξ 和 P 基本呈线性正相关关系。正弯矩工况下, ξ 和 P 的线性拟合方程为 $\xi = 0.000 16P + 0.180 00$,拟合优度 $R^2 = 0.933 33$;负弯矩工况下, ξ 和 P 的线性拟合方程为 $\xi = 0.000 18P + 0.055 71$,拟合优度 $R^2 = 0.995 59$ 。其中 P 单位为 kN 。

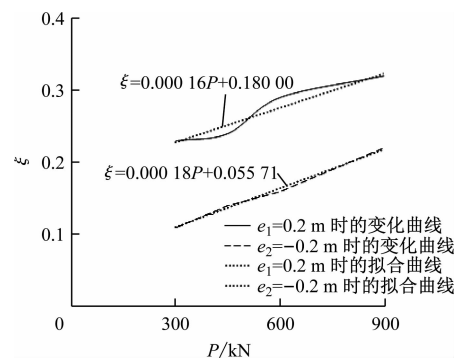


图 5 ξ - P 变化曲线

Fig. 5 Change curves of ξ - P

3 结语

1) 随着 P 的增加,弯矩传递效应有所加强, ξ 有所增大。随着外荷载的增大,两环管片间的相互错台量会不断增大,变形不协调会更加明显,环间的约束作用也会发生变化,弯矩传递效应也会不断变化, ξ 是一个随外荷载不断变化的值。

2) 随着 P 不断增大,纵缝接头 k_{θ} 呈增大趋势,负弯矩工况下的接头 k_{θ} 远大于正弯矩工况下的 k_{θ} , k_{θ} 与 P 基本呈线性正相关关系。

3) 通过弯矩传递试验可得,错缝拼装的纵缝接头在正弯矩工况下的 ξ 为 0.23 ~ 0.32,在负弯矩工况下的 ξ 为 0.11 ~ 0.22。 P 对 ξ 影响较大,基本呈线性正相关关系。

参考文献

- [1] LIU X, BAI Y, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of continuously jointed segmental tunnel linings[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12 (10): 1364.
- [2] YAMADA H, KITAGAWA S, NODA K, et al. Experimental verification towards real construction of a slide type cotter formula segment[J]. Journal of Tunnel Engineering, 2003, 13: 435.
- [3] 有泉毅,竹内友章,江森吉洋. ボルト締結を伴わない継手を用いたシールド工事用セグメント設計法に関する研究[J]. 土木学会論文集 F, 2009, 65(4): 414.
- ARIIZUMI T, TAKEUCHI T, EMORI Y. A study on designing for shield tunnel lining using new type joints without tightening bolts [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu F, 2009, 65(4): 414.
- [4] 张维熙,董子博,柳献,等. 类矩形盾构隧道错缝管片环间传力性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2636.
- ZHANG Weixi, DONG Zibo, LIU Xian, et al. Experimental study on the force-transfer property of the circumferential joints in quasi-rectangular shield tunnel under the staggered assembling [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12): 2636.

(下转第 171 页)

- 2006, 292(3/4/5): 676.
- [10] 梅桂明, 张卫华. 受电弓/接触网系统动力学模型及特性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 20.
MEI Guiming, ZHANG Weihua. Dynamics model and behavior of pantograph/catenary system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(1): 20.
- [11] 吴天行. 接触网的有限元计算与分析[J]. 铁道学报, 1996, 18(3): 44.
WU Tianxing. Analysis and calculation of catenary by FEM[J]. Journal of the China Railway Society, 1996, 18(3): 44.
- [12] 周宁, 张卫华. 基于受电弓弹性体模型的弓网动力学分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 26.
ZHOU Ning, ZHANG Weihua. Analysis of dynamic pantograph-catenary interaction based on elastic pantograph model[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(6): 26.
- [13] WU T, ZHAI S, DONG W, et al. An online detection algorithm of train coupler impact based on stacked auto-encoders [C] // 2021 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS). Chengdu, China. New York: IEEE, 2021: 1.
- [14] 周宁, 蔚超, 邹欢, 等. 一种新的考虑接触角的弓网接触模型[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2): 265.
ZHOU Ning, YU Chao, ZOU Huan, et al. New pantograph/catenary contact model considering the influence of contact angle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2): 265.
- [15] LIU Z, JÖNSSON P A, STICHEL S, et al. Implications of the operation of multiple pantographs on the soft catenary systems in Sweden[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(3): 971.
- [16] European Committee for Electrotechnical Standardization. Railway applications current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line: EN 50318:2018[S]. Brussels: CENELEC Central Secretariat, 2018.
- 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2022-12-20 出版日期:2025-04-10
Received:2022-09-02 Revised:2022-12-20 Published:2025-04-10
- 第一作者:鲁文伟, 硕士研究生, 1205496172@qq.com
通信作者:周宁, 副研究员, zhou_ningbb@sina.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 164 页)

- [5] 管攀峰, 杨志豪. 管片新型快速连接件研发及接缝力学性能分析[J]. 隧道与轨道交通, 2018(1): 1.
GUAN Panfeng, YANG Zhihao. Research & development of new fast segment connector and mechanical property analysis of segment joint[J]. Tunnel and Rail Transit, 2018(1): 1.
- [6] 柳献, 李海涛, 曹伟飏. 盾构隧道新型纵缝接头抗弯性能试验对比研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1058.
LIU Xian, LI Haitao, CAO Weibiao. Experimental comparative study on bending performance of new longitudinal joint in shield tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 1058.
- [7] 张雨蒙, 张姣龙, 曹伟飏, 等. 盾构隧道新型衬砌结构受力性能与设计参数[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 201.
ZHANG Yumeng, ZHANG Jiaolong, CAO Weibiao, et al. Mechanical behaviors and design parameters of segmental tunnel linings with new type of joints[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 201.
- [8] 柳献, 李海涛, 管攀峰, 等. 快速接头盾构隧道衬砌结构设计参数研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 19.
LIU Xian, LI Haitao, GUAN Panfeng, et al. Research on design parameters for shield tunnel lining structure with quick connectors [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 19.
- [9] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 28.
ZHANG Houmei, FU Deming, GUO Chi. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6): 28.
- 收稿日期:2022-12-20 修回日期:2023-05-20 出版日期:2025-04-10
Received:2022-12-20 Revised:2023-05-20 Published:2025-04-10
- 第一作者:胡秋斌, 博士研究生, 1059781296@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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821