

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250103001

文章编号:1674-599X(2025)01-0072-09

引用格式:贺君,彭毅,吴珣,等.灌浆槽钢加固盾构隧道衬砌管片力学性能试验研究[J].交通科学与工程,2025,41(1):72-80.

Citation: HE Jun, PENG Yi, WU Xun, et al. Experimental study on mechanical performance of shield tunnel lining segments reinforced by grouted channel steel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 72-80.

灌浆槽钢加固盾构隧道衬砌管片力学性能试验研究

贺君¹, 彭毅¹, 吴珣¹, 黄戡^{1,2,3}, 周凯迪¹, 李智浩¹

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.广州交通大学(筹)/广州航海学院 智能交通与工程学院,广东 广州 510725;3.深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518060)

摘 要:【目的】解决盾构隧道“老龄化”带来的管片结构损伤劣化问题,提高其服役性能,延长其使用寿命。【方法】以某轨道交通区间隧道为研究对象,提出一种灌浆槽钢加固盾构隧道衬砌管片的方法,并对管片进行弯曲荷载破坏机理以及损伤管片加固性能提升足尺试验,研究加固前后管片的破坏特征、裂缝发展、混凝土及钢板应变等参数的变化规律。【结果】灌浆槽钢加固方法可有效提高受损管片的承载能力(极限荷载大约提高了33.0%),延长损伤管片的弹性阶段和塑性扩展阶段,并限制裂缝宽度的增长;管片加固前后的破坏特征基本一致:先在内弧面加载点出现贯通裂缝,随着荷载的增加,裂缝逐渐布满加载点内侧,并向约束支承端发展;加固管片的最终破坏现象为槽钢端部翼板处螺栓显著变形,翼板被撕裂,管片裂缝宽度急剧增加。【结论】用灌浆槽钢加固盾构隧道管片是可行的,但需重点关注加固槽钢自身的强度及其与管片间连接的有效性。

关键词:盾构隧道;管片;槽钢加固;足尺试验;破坏特征

中图分类号:U45

文献标志码:A

Experimental study on mechanical performance of shield tunnel lining segments reinforced by grouted channel steel

HE Jun¹, PENG Yi¹, WU Xun¹, HUANG Kan^{1,2,3}, ZHOU Kaidi¹, LI Zhihao¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Intelligent Transportation and Engineering, Guangzhou Transportation University (under preparation)/Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to address damage and deterioration of segments due to the aging of shield tunnels, improve their service performance, and extend their service life. [Methods] An interval tunnel at urban rail transit was selected as the research object. A method for reinforcing shield tunnel lining segments by grouted channel steel was proposed, and full-scale tests were conducted to investigate the bending load failure mechanism of segments and the performance improvement of damaged segments after reinforcement. Analysis was made on the variations of the failure characteristics, crack development, and parameters (such as strain) of concrete and the steel plate before and after reinforcement. [Findings] The grouted channel steel reinforcement method can significantly enhance the loading capacity of damaged segments, with the ultimate load increasing by

收稿日期:2025-01-03

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3800905);国家自然科学基金资助项目(52378127,52078060)

通信作者:黄戡(1979—),男,教授,主要从事岩土工程、隧道工程和城市轨道交通工程方面的研究工作。

E-mail: hk_616@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

approximately 33.0%. This method can effectively prolong the elastic and plastic phases of the damaged segments and limit the growth of crack widths. The failure characteristics of the segments before and after reinforcement are basically the same. First, through cracks appear at the loading point of the inner arc surface, and with the increase in the applied load, the cracks gradually spread on the inner side of the loading point and develop toward the restrained bearing end. The final failure mode of the reinforced segments is obvious deformation of the bolt at the flange at the channel steel end and flange tearing, which leads to abrupt increment of crack width on the segments. [Conclusions] In summary, grouted channel steel reinforcement of shield tunnel segments is feasible, and special attention should be paid to the strength of reinforced channel steel and the effective connection between the reinforced channel steel and the segments.

Key words: shield tunnel; segment; channel steel reinforcement; full-scale test; failure characteristic

随着我国城市轨道交通工程服役年限的不断增长,部分城市的轨道交通线路已逐渐步入“老龄化”阶段^[1]。某些盾构隧道受不均匀荷载堆积^[2]、邻近轨道施工活动干扰等因素的影响,出现了诸如裂缝扩展、水体渗漏及径向形变等一系列结构损伤问题^[3]。鉴于此,针对盾构隧道衬砌管片结构已存在或潜在的损伤,探索经济可行且技术合理的维护措施势在必行。

对盾构隧道衬砌管片结构性能的评估主要涵盖其力学与耐久性能,其中力学性能侧重于考察其抗裂性能及承载能力。当前,已有学者针对各类隧道管片的承载能力^[4-5]、变形特性^[6-7]与破坏形式^[8-9]进行了研究。对于管片的加固手段,KUANG等^[10]采用内聚单元来表征混凝土中潜在断裂面的力学响应,通过参数分析研究了纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer/plastic, FRP)黏结长度和宽度对盾构段接缝的加固效果。孙倩^[11]采用内粘钢板加固方法对不同埋深标准块管片的抗弯性能进行了试验研究,分析了加固前后管片破坏特征、裂缝发展和钢筋应力等的变化,此方法操作简单,在工程中应用较广,但用钢量很大,成本较高。彭武^[12]通过数值模拟方法,评估了钢板加固对盾构隧道衬砌结构损伤和变形的抑制效果,对不同荷载下加固和未加固盾构隧道衬砌结构的变形和内力进行了对比分析。WU等^[13]通过试验研究了用形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)制成的螺栓连接相邻管片的临时强化方法,提出了适合该方法的修正电加热措施,并进行了试验验证。柳献等^[14]以复合腔体加固纵缝接头为试验对象,采用足尺试验对加固及未加固纵缝接头的受力性能及破坏形态进行了研究,该方法耗材量较小,加固效果明显,但是

复合腔体与混凝土之间的黏结效果是结构加固的关键,若黏结失效,结构的整体刚度将迅速降低。罗跃春^[15]提出了一种基于钢管混凝土的盾构隧道加固方法,该方法通过锚栓连接与内粘钢板连接相结合的方式进一步提高了管片的承载力,其加固效果优良,加固构件可提前预制,但该方法对钢材加工的技术要求较高。CONFORTI等^[16]通过三点加载试验研究了内置宏观合成聚丙烯纤维的衬砌管片的力学性能,重点研究了跨中挠度、最大弯矩下弯曲裂缝张开量及不同加载步骤下裂缝沿节段长度和宽度的发展情况。朱明勇等^[17]通过分析内粘钢板加固前后盾构管片的跨中弯矩-位移曲线,得到了跨中弯矩与混凝土应变间的关系。罗实^[18]利用光纤传感器分析了压弯荷载作用下管片应变的分布特点和裂缝的发展规律。高晓静等^[19]重点研究了跨中、加载点位置的管片挠度、支座位移、混凝土应变及裂缝的发展情况。

本文以某轨道交通区间隧道为研究对象,提出了一种灌浆槽钢加固方法,在该方法中开口槽钢内的高强砂浆可与管片内壁直接贴合,管片与槽钢将高强砂浆包裹起来形成三向受力状态,提高了加固构件的抗弯能力。将管片与砂浆贴合处凿毛增强砂浆与管片的黏结作用,同时采用化学膨胀螺栓锚固槽钢与管片,并通过锚栓连接、砂浆与管片黏结相结合的方式进一步提高管片的承载力。该加固方法简便易行,用钢量较小,节约成本。为明确其加固损伤管片的机理及性能提升效果,本文开展两点加载正弯矩足尺试验,以未损伤管片为对照组,对已损伤管片进行加固,对比分析加固前后管片的破坏模式、位移变化、裂缝开展规律等,试验结果可为实际工程中盾构隧道的维护加固提供科学依据。

1 试验方案

1.1 试件设计

如图1所示,衬砌圆环采用“3(B1, B2, B3)+2(L1, L2)+1(F)”的分块方式错缝拼装而成。本试验选用2个标准块(S1、S2)进行弯矩加载试验,其中用管片S1进行极限承载力试验,用管片S2进行分步加载试验,即先将管片加载至损伤状态(极限荷载的80%),然后用灌浆槽钢对损伤管片进行加固,最后加载至破坏。

试件的外径为6 200.0 mm,外弧长3 652.1 mm,圆心角为67.50°,管片的厚度为350.0 mm,环宽1 200.0 mm,如图2所示。

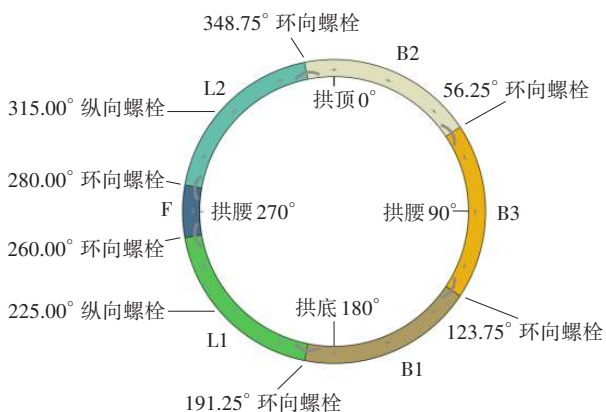


图1 衬砌圆环构造图

Fig. 1 Structure diagram of lining ring

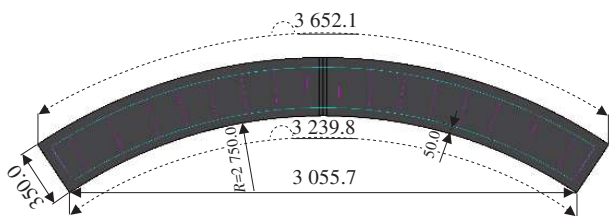


图2 管片尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimension of tunnel segment (unit: mm)

1.2 加固方案

如图3所示,加固构件为弧形的“Ω”形槽钢,内径为2 750.0 mm,圆心角为50°,厚度为4.0 mm,在构件左右两侧各开9个孔,对中间区域的孔进行加密,在加密区域两孔之间的圆心角为4°,在非加密区域为8°。内部填充材料选用C50高强砂浆,并通过8.8级化学膨胀螺栓进行连接,螺栓嵌入管片的深度约为12 cm。膨胀螺栓的直径为12.0 mm,长度为160.0 mm。

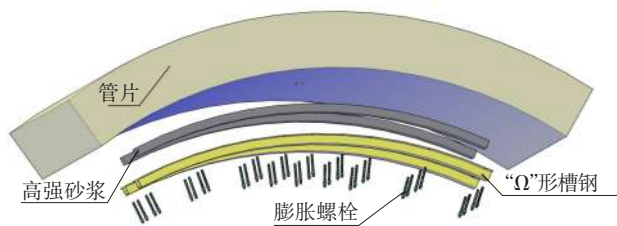


图3 加固试件构造

Fig. 3 Reinforced specimen

图4所示为损伤管片S2的加固流程:首先对管片与高强砂浆的接触部分进行表面凿毛处理,然后进行钻孔定位,并从两侧向中间依次打入膨胀螺栓。在安装好槽钢后,灌注高强砂浆并封闭两端以避免溢浆,常温养护7 d。



(a) 表面凿毛



(b) 螺栓钻孔



(c) 灌注砂浆



(d) 养护后吊装

图4 加固流程

Fig. 4 Reinforcement process

1.3 材料特性

加固槽钢采用 Q235b 钢材,制作标准抗拉试件 S-1、S-2、S-3 并进行材料性能试验,结果如图 5 所示。槽钢的屈服强度均值为 229.40 MPa,极限强度均值为 375.10 MPa。高强砂浆的材料性能见表 1。盾构隧道管片所用材料为 C50 普通混凝土,内置钢筋采用的是 HPB300 和 HRB400。

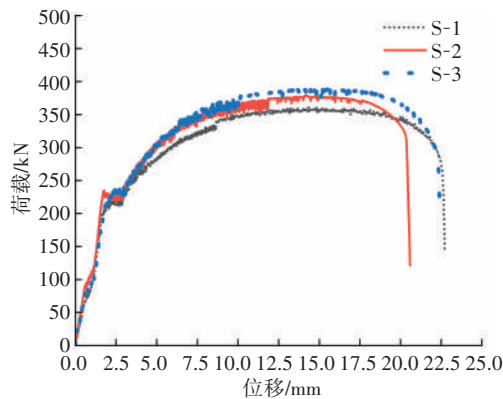


图 5 加固槽钢材料性能试验结果

Fig. 5 Material test results of reinforced channel steel

表 1 高强砂浆的材料性能

Table 1 Material properties of high-strength mortar

项目	流动度/mm		水料比	竖向膨胀率(3 h)/%	3 h 与 24 h 膨胀值之差/%
	初始	30 min			
性能指标	≥290	≥260		0.10 ~ 3.50	0.02 ~ 0.50
实测值	306	274	0.13	0.65	0.16

1.4 试验装置及加载制度

本文采用多通道结构试验机系统(MTS)对试件进行两点加载,加载点的间距为 800 mm。加载设备主要由反力架、分配梁、竖向作动器、千斤顶等组成,如图 6 所示。管片水平放置,一端通过千斤顶固定,另一端可自由滑动。

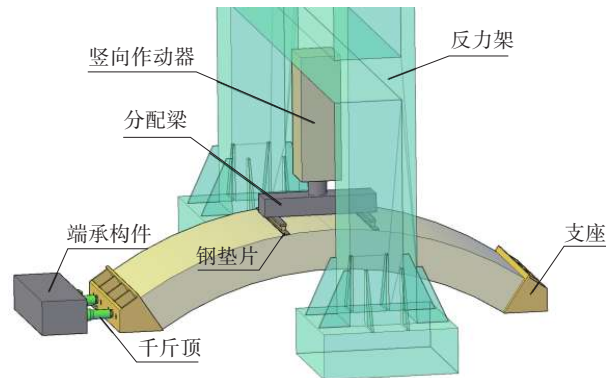


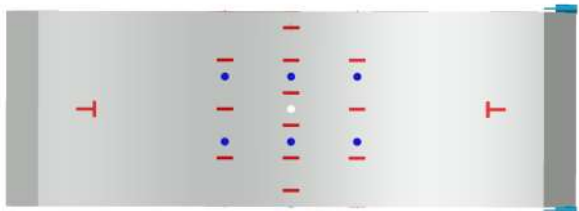
图 6 试验装置

Fig. 6 Test set-up

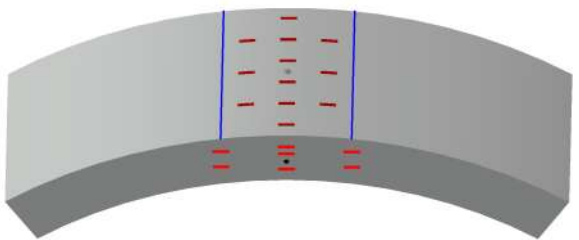
采用力和位移混合控制加载过程,荷载以 50 kN 递增,每次持荷 2 min。位移加载的初始速率为 2 mm/min,当管片出现初始裂缝后,将加载速率调整为 4 mm/min。在试验过程中同时进行数据采集及裂缝观测(位置、宽度等)。

1.5 测点布置

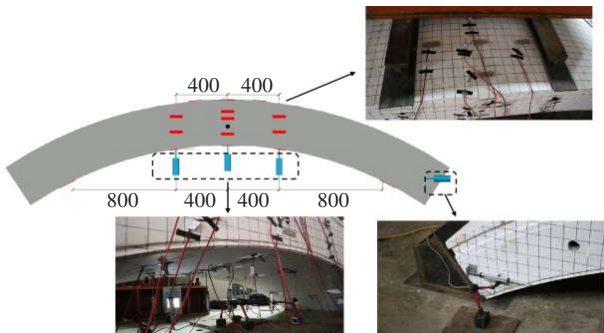
在跨中及加载位置等关键截面布置应变计与位移计,实时监测管片在加载过程中的应变和变形。利用管片的对称性,将混凝土应变测点布置在 1/2 内弧面和侧面位置。其中,在内弧面跨中位置布置 6 个水平应变片,在内弧面加载点布置 3 个水平应变片;在侧面跨中位置布置 3 个水平应变片,在侧面加载点布置 2 个水平应变片,如图 7 所示。在跨中和加载点对称布置位移计测试竖向变形,在滑动支座布置水平位移计测试纵向位移。



(a) 底面



(b) 立面

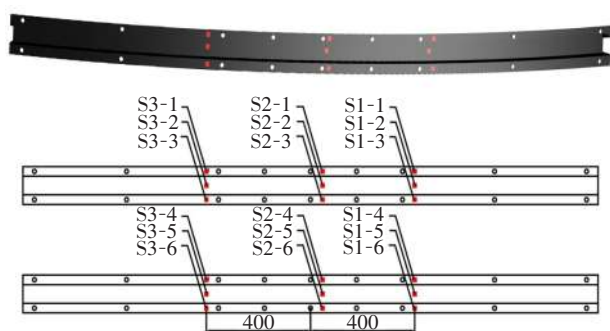


(c) 现场照片

图 7 测点布置(单位:mm)

Fig. 7 Measuring point layout (unit: mm)

针对加固构件,在跨中及加载位置的槽钢翼缘、底板布置应变片,测试其应力状态,如图 8 所示(图中 S3-1 等为应变片编号)。



(a) “Ω”形槽钢应变片粘贴位置(单位:mm)



(b) 现场照片

图8 应变片布置

Fig. 8 Strain gauge arrangement

2 试验结果及分析

2.1 关键力学性能指标

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)将管片最大裂缝宽度0.2 mm的状态定义为管片正常使用的极限状态(使用荷载);当管片最大裂缝宽度达到2.0 mm或者混凝土出现压溃现象时,认为管片结构达到了承载能力极限状态(极限荷载)。

试件加载结果见表2。加固前两管片的开裂荷载、使用荷载基本一致,两管片处于同一损伤状态。加固后管片(S2)的承载能力明显提高。极限荷载大约提高了33.0%,失效荷载大约提高了25.9%。

表2 管片特征荷载值

Table 2 Characteristic load value of segment

管片	是否加固	加固前损伤级别/kN	开裂荷载/kN	使用荷载/kN	极限荷载/kN	失效荷载/kN
S1	否		213.4	266.1	582.8	738.8
S2	是	525.0	219.8	277.1	775.0	930.0

2.2 试件破坏特征

2.2.1 裂缝分布

对于试件S1,受拉裂缝主要分布在管片内弧面及侧面,如图9所示。当加载至213.4 kN时,加载点

的内弧面同时出现2条最早的贯通裂缝 C_{S1-1} 、 C_{S1-2} ;随着荷载的施加,在加载点附近,首条裂缝周围间隔150 mm左右开始出现新裂缝,且已出现裂缝的宽度和长度也不断增加。当荷载为266.1 kN时, C_{S1-1} 裂缝的宽度首先达到容许最大裂缝宽度0.2 mm;当荷载为582.8 kN时, C_{S1-1} 裂缝的宽度首先达到2.0 mm;当荷载达到738.8 kN时,管片外弧面的混凝土被局部压碎,并发生破坏。最终形成了5条主要贯通裂缝(约束端加载点处3条,可动端加载点处2条),并向周边不断延伸的裂缝分布模式。

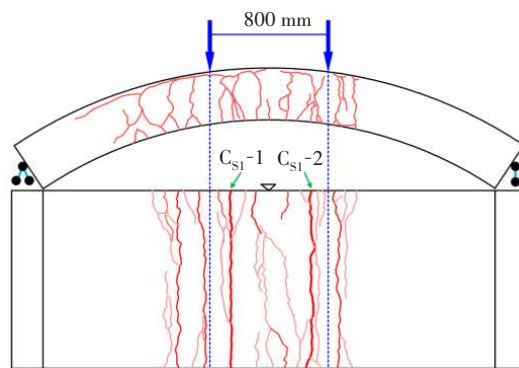


图9 S1试件裂缝分布

Fig. 9 Crack distribution for S1

图10所示为试件S2的裂缝分布。当荷载为219.8 kN时,加载点的内弧面同时出现3条最早的裂缝 C_{S2-1} 、 C_{S2-2} 和 C_{S2-3} ;在荷载施加至277.1 kN时, C_{S2-2} 裂缝的宽度首先达到容许最大裂缝宽度0.2 mm。与未加固管片的裂缝主要分布在两加载点之间不同的是,加固管片的裂缝主要分布在左侧加载点与约束端之间,且裂缝网更细密。当荷载达到最大值时,侧面裂缝贯通整个管片厚度,但未沿外弧面发展,表明加固构件能够有效抑制跨中区域裂缝的发展,提升管片的整体刚度。

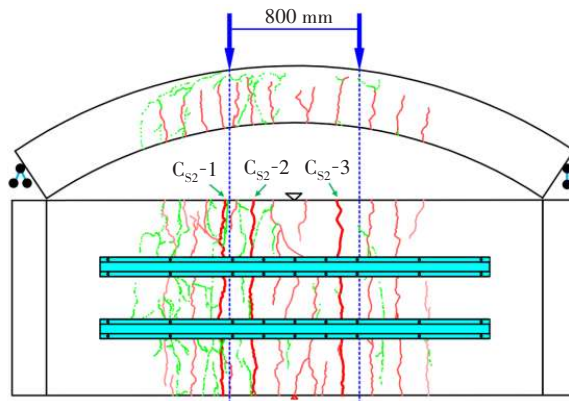


图10 S2试件裂缝分布

Fig. 10 Crack distribution for S2

加固管片的破坏从约束支座端开始,首先是槽钢与管片上的混凝土发生轻微剥离,当荷载加至296.0 kN时,管片加固前的原始裂缝开始明显张开;当荷载加至930.0 kN时,槽钢产生明显剥离,其端部翼板被撕裂,膨胀螺栓变形显著,内填砂浆破碎并与管片发生脱离(图11),此时裂缝迅速发展,位移急剧增大,管片失效。



(a) 约束端破坏



(b) 端头砂浆破碎

图11 S2试件端部最终破坏图

Fig. 11 Failure mode at fixed end for S2

2.2.2 裂缝宽度

S2管片3条最早出现的裂缝的宽度随荷载的发展情况如图12所示。本试验在每个持荷阶段通过裂缝观测仪HC-F800测量裂缝宽度。

由图12可知,在损伤阶段,在荷载由0.0 kN增加至461.2 kN的过程中,裂缝 C_{S2-1} 、 C_{S2-2} 、 C_{S2-3} 的宽度发展得较为缓慢,当加载到461.2 kN时,3条裂缝的宽度均为0.38 mm左右;在荷载由461.2 kN增加至525.0 kN的过程中,裂缝发展迅速,当加载到525.0 kN时,3条裂缝的宽度分别为0.43、1.00、0.85 mm,其增长率分别为13%、163%、124%,表明越靠近约束端裂缝宽度发展得越快。

在加固阶段,加固构件可有效延长已损伤管片的弹性阶段和塑性阶段,且灌浆槽钢与管片共同发挥着作用。当荷载为525.0 kN~808.5 kN时,裂缝宽度发展平缓;当荷载为808.5~930.0 kN时,裂缝宽度发展迅速。裂缝 C_{S2-1} 、 C_{S2-2} 、 C_{S2-3} 的最终宽度

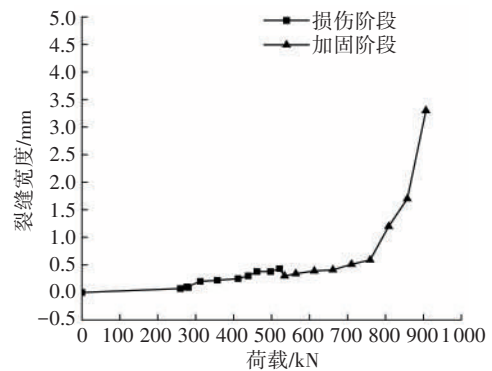
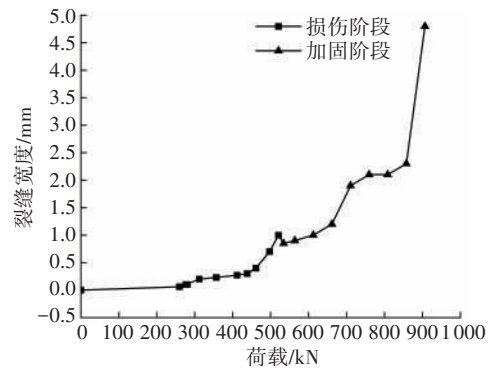
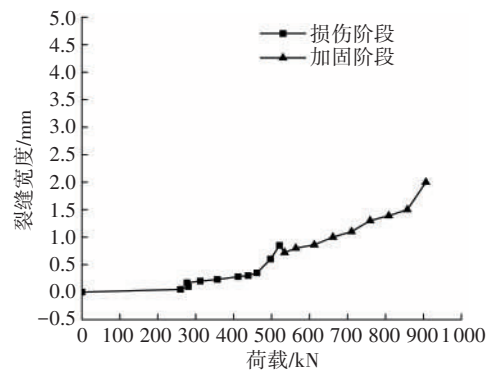
(a) C_{S2-1} (b) C_{S2-2} (c) C_{S2-3}

图12 S2裂缝宽度发展情况

Fig. 12 Crack width development for S2

分别为3.3、4.8、2.0 mm。

2.3 管片位移

管片跨中、加载点、可动端部的荷载-位移曲线如图13所示。由图13(a)可知,管片加固前后弹性阶段荷载-位移曲线的变化趋势基本一致。加固后管片的弹性阶段大幅延长,加固前管片的弹性阶段只持续到230.0 kN左右,加固后管片的弹性阶段可以持续到600.0 kN左右,峰值荷载显著提高(由738.8 kN增至930.0 kN)。在加载过程中加固管片的位移明显比未加固管片的小,未加固管片失效时(738.8 kN)的跨中挠度约为59.72 mm,加固管片失

效时(930.0 kN)的跨中挠度约为25.50 mm,其极限变形抵抗能力提高了57.3%,表明灌浆槽钢加固管片后结构抵抗变形的能力明显增强,刚度显著提高。图13(b)、图13(c)的变化趋势类似,这里不再赘述。

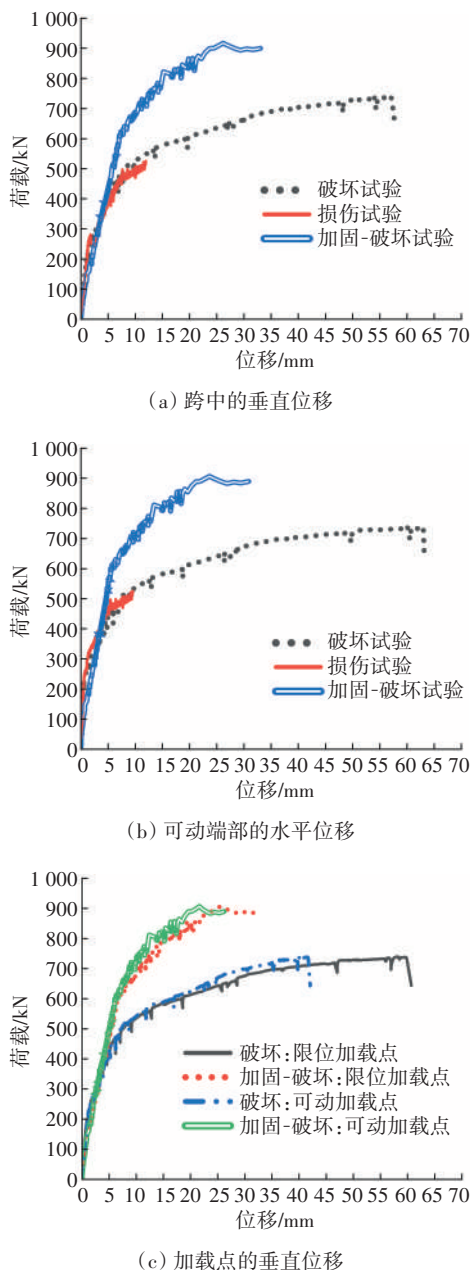


图13 管片的荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of segments

2.4 混凝土应变

管片S1与S2跨中的内、外弧面及侧面的混凝土应变随荷载的变化如图14所示。由图14可知,内弧面与侧面的混凝土以受拉为主,而外弧面的混凝土以受压为主,且在相同的荷载作用下,加固管片S2的混凝土应变明显比基准管片S1的小,表明

灌浆槽钢与管片之间连接有效,两者共同作用,槽钢可分担一部分混凝土应力。

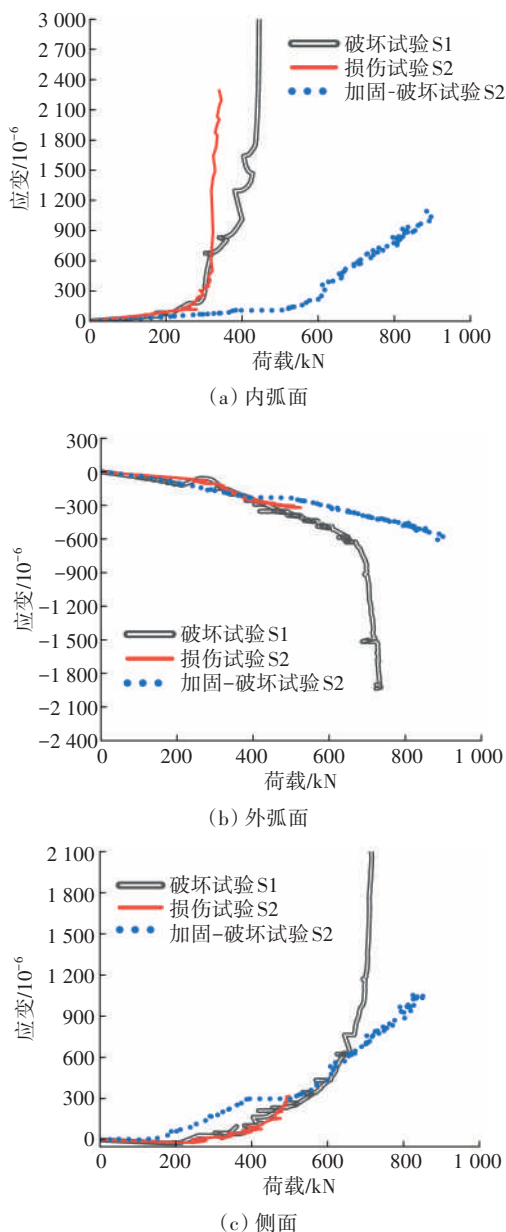


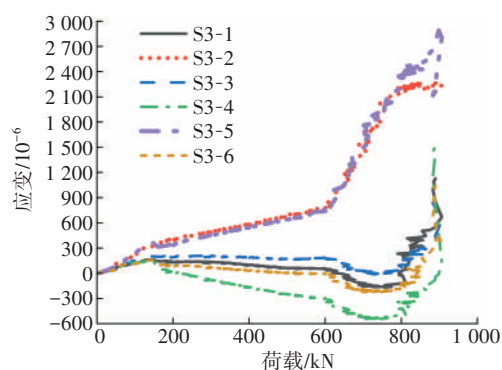
图14 荷载-混凝土应变曲线

Fig. 14 Load-concrete strain curves

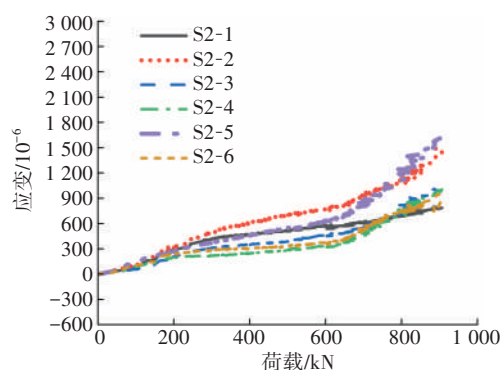
2.5 槽钢应变

图15所示为槽钢的应变曲线。由图15可知,槽钢底板(尾数为2、5应变片对应的位置)应变的变化趋势基本一致,且加载点的应变明显比跨中的大。槽钢翼缘板(尾数为1、3、4、6应变片对应的位置)的应变在约束端加载点处波动较大,并在荷载为600.0 kN左右时,由拉应变转为压应变,而跨中和可动端加载点在荷载为600.0 kN左右时仍受拉。这是因为当加载至600.0 kN时,约束端的槽钢开始剥离,翼板纵向拱起,应变以受压为主;当荷载加载至

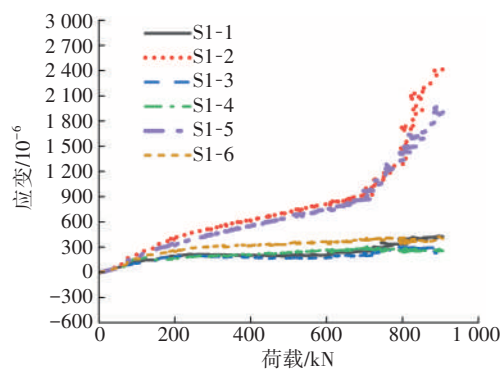
800.0 kN时,约束端槽钢边缘的螺栓变形显著,翼板撕裂,应变以受拉为主。



(a) 约束端加载点



(b) 跨中



(c) 可动端加载点

图15 槽钢应变

Fig. 15 Channel steel strain

3 结论

本文提出了一种灌浆槽钢加固盾构衬砌管片的方法,开展了足尺模型抗弯试验对管片加固前后的力学性能和破坏特征进行了研究,得到以下结论:

1) 灌浆槽钢加固方法可以有效提高受损管片的承载能力,其极限荷载和失效荷载分别提高了33.0%与25.9%,显著降低了管片跨中内、外弧混凝土

土的应变,同时有效延长了损伤管片的弹性阶段和塑性阶段,抑制了裂缝宽度的增长。

2) 管片加固前后混凝土裂缝的扩展特征基本一致:先在内弧面加载点出现贯通裂缝,随着荷载的增加,裂缝逐渐向约束端发展。

3) 加固管片最终的破坏从约束端开始,槽钢端部翼板处螺栓变形显著,约束端翼板被撕裂,荷载急剧下降,管片裂缝宽度大幅增加,试件失效。

本文所提出的加固方法适用于隧道运营阶段开裂损伤管片的加固。在加固时,除了关注槽钢与管片间的有效连接,还应确保加固构件本身的强度,并采用合理的施工方案避免锚固螺栓、灌浆槽钢对既有结构的影响。

参考文献(References):

- [1] 孙建平. 城市轨道交通安全风险全周期防控的理论与实践[J]. 现代城市轨道交通, 2020(9): 57-60.
SUN Jianping. Theory and practice of full cycle prevention and control of urban rail transit safety risks [J]. Modern Urban Transit, 2020(9): 57-60.
- [2] 谢沃,周维政,欧阳慕,等. 不良地质堆积体隧道洞口段稳定性分析[J]. 西部交通科技, 2024(5): 122-124. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2024.05.039.
XIE Wo, ZHOU Weizheng, OUYANG Mu, et al. Western China Communication Science & Technology, 2024(5): 122-124. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2024.05.039.
- [3] 魏德伟,廖文彬,尹鹏. 公路隧道结构健康状况分类及常见病害分析[J]. 工程与建设, 2024, 38(5): 1085-1087.
WEI Dewei, LIAO Wenbin, YIN Peng. Classification of health status and common disease analysis of highway tunnel structures [J]. Engineering and Construction, 2024, 38(5): 1085-1087.
- [4] 朱瑶宏,高一民,董子博,等. 盾构法T接隧道结构受力现场试验研究:以宁波轨道交通3号线联络通道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1759-1768. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.11.003.
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on Ningbo metro line No. 3 [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1759-1768. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.11.003.
- [5] MENG G W, GAO B, ZHOU J M, et al. Experimental investigation of the mechanical behavior of the steel fiber reinforced concrete tunnel segment[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 98-107. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.028.

- [6] ZHANG Wenjun, JIN Mingming, SU Ren, et al. Experiment on mechanical properties of steel and concrete composite segment for shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(5): 84-94.
- [7] 何川, 刘川昆, 王士民, 等. 裂缝数量对盾构隧道管片结构力学性能的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 210-219. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.10.020.
- HE Chuan, LIU Chuankun, WANG Shimin, et al. Influence of crack number on mechanical properties of shield tunnel segment structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 210-219. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.10.020.
- [8] CHEN J S, MO H H. Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1): 91-102. DOI: 10.1016/j.tust.2008.05.007.
- [9] DE-ANDRADE G G, DE-FIGUEIREDO A D, GALO BARDES I, et al. Experimental and numerical investigation of flexural behavior of precast tunnel segments with hybrid reinforcement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 154: 106094. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106094.
- [10] KUANG J J, CHEN Y Q, LI X F, et al. Assessment of reinforcement effect of FRP-strengthened shield segment joint based on the CZM model[J]. Advances in Civil Engineering, 2024, 2024(1): 8888139. DOI: 10.1155/2024/8888139.
- [11] 孙倩. 内粘钢板加固盾构隧道管片的力学性能试验与数值模拟[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001501.
- SUN Qian. Test and numerical simulation of mechanical properties of shield tunnel segments strengthened by internally bonded steel plates[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001501.
- [12] 彭武. 基于钢板加固的盾构隧道管片衬砌承载性能数值模拟研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(6): 254-261. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.06.050.
- PENG Wu. Numerical simulation study on the bearing capacity of segmental lining in shield tunnels reinforced with steel plates[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(6): 254-261. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.06.050.
- [13] WU B, OU Y L. Experimental study on tunnel lining joints temporarily strengthened by SMA bolts[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 125018. DOI: 10.1088/0964-1726/23/12/125018.
- [14] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2015.02.024.
- 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): 376-383. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2015.02.024.
- [15] 罗跃春. 基于钢管混凝土部件的盾构隧道加固试验与分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.004215.
- LUO Yue Chun. Experiment and analysis of shield tunnel strengthened with concrete filled steel tubes[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.004215.
- [16] CONFORTI A, TRABUCCHI I, TIBERTI G, et al. Precast tunnel segments for metro tunnel lining: a hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers[J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109628.
- [17] 朱明勇, 耿欧, 孙倩, 等. 内粘钢板法加固盾构隧道衬砌管片的力学性能试验研究[J]. 特种结构, 2022, 39(2): 9-14. DOI: 10.19786/j.tzjg.2022.02.002.
- ZHU Mingyong, GENG Ou, SUN Qian, et al. Experimental study on mechanical properties of shield tunnel lining segments strengthened with internal bonded steel plate[J]. Special Structures, 2022, 39(2): 9-14. DOI: 10.19786/j.tzjg.2022.02.002.
- [18] 罗实. 盾构隧道衬砌内衬钢板加固的力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2023.000600.
- LUO Shi. Mechanical properties of shield tunnel linings strengthened by internally bonded steel plates[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2023.000600.
- [19] 高晓静, 李鹏飞, 张明聚, 等. 局部失效盾构隧道管片承载特性及破坏机理[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 302-311. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.11.011.
- GAO Xiaojing, LI Pengfei, ZHANG Mingju, et al. Bearing characteristics and failure mechanism of partially failed segments in shield tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 302-311. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.11.011.

(责任编辑:石月珍)