

内钢圈加固盾构隧道黏结界面力学性能

周顺华^{1,2}, 张克平^{1,2}, 张小会^{1,2}, 张 权^{1,2}, 裴政川^{1,2}, 赵旭伟³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;
3. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要: 开展静力加载条件下加固体与混凝土界面单轴拉伸与单轴剪切的单元体试验, 分析了黏结界面的破坏形态、极限承载力、平均黏结强度、荷载-位移曲线以及界面应变变化规律, 研究了不同黏结剂厚度、膨胀螺栓等级以及混凝土表面粗糙度对于黏结界面力学性能的影响。试验结果表明, 界面拉伸条件下, 黏结界面的最终破坏形态主要为混凝土内聚破坏; 剪切条件下, 黏结界面的最终破坏形态主要为加固体与黏结剂界面的脱开。黏结界面极限承载力和黏结强度均随黏结剂厚度的减小而增大, 而界面厚度为 1 mm 对应的拉伸极限承载力和剪切极限承载力较 2 mm 厚度仅提高了 4.6% 和 5.6%, 却极大地增加了环氧树脂的注浆难度, 因此选择界面厚度为 2 mm 更为合理。增加膨胀螺栓加固可显著提升黏结界面的拉伸和剪切强度, 推荐使用 M18 膨胀螺栓, 特殊工况下也可使用 M20 提升加固效果。混凝土表面越粗糙, 黏结界面黏结强度就越大, 其中混凝土表面粗糙度对黏结界面拉伸黏结强度的影响要大于对剪切黏结强度的影响。

关键词: 盾构隧道; 内钢圈加固; 黏结界面; 承载性能; 试验研究

中图分类号: U451; TU43

文献标志码: A

Mechanical Properties of Bonding Interfaces of Shield Tunnels Reinforced with Inner Steel Rings

ZHOU Shunhua^{1,2}, ZHANG Keping^{1,2}, ZHANG Xiaohui^{1,2}, ZHANG Quan^{1,2}, PEI Zhengchuan^{1,2}, ZHAO Xuwei³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: This paper presents unit tests under static

loading conditions to investigate the uniaxial tensile and shear behavior at the interface between the reinforcing material and concrete and analyzes the failure modes, ultimate bearing capacity, average bond strength, load-displacement curves, and the strain variation at the interface. Additionally, it examines the influence of different adhesive thicknesses, expansion bolt grades, and concrete surface roughness on the mechanical properties of the bond interface. The experimental results indicate that the final failure mode of the bonding interface is mainly concrete cohesive failure under interfacial tension conditions, the final failure mode of the bonding interface is mainly the detachment of the interface between the steel ring and the bonding agent under shear conditions. The ultimate bearing capacity and bonding strength of the bonding interface increase with the decrease of the adhesive thickness, while the tensile and shear ultimate bearing capacity corresponding to an interface thickness of 1mm only increase by 4.6% and 5.6% compared to a 2 mm thickness, which greatly increases the difficulty of epoxy resin grouting. Therefore, choosing an interface thickness of 2 mm is more reasonable. Adding expansion bolts for reinforcement can significantly improve the tensile and shear strength of the bonding interface. It is recommended to use M18 expansion bolts, and under special working conditions, M20 can also be used to enhance the reinforcement performance. The bonding strength of the bonding interface increases with the roughness of the concrete surface. The influence of concrete surface roughness on the tensile bonding strength of the bonding interface is greater than that on the shear bonding strength.

Keywords: shield tunnel; steel ring reinforcement; bonding interface; ultimate bearing capacity;

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(52208443); 上海市自然科学基金(22ZR1466500)

第一作者: 周顺华, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市轨道交通与铁道工程。

E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

通信作者: 张小会, 助理教授, 工学博士, 主要研究方向为行车环境下的轨道交通结构安全。

E-mail: 1988xiaohui@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

experimental study

随着服役年限的增加,运营地铁盾构隧道受地质条件、周边环境、列车荷载等多种因素的影响,会出现不同程度的结构病害,如横向收敛变形、纵向不均匀沉降、管片开裂、接头变形、钢筋和螺栓锈蚀、隧道渗漏水、管片表面伤损及衬砌材质劣化等^[1-5]。如果这些问题不能得到及时处理,受损情况会随着地铁运营时间的推移进一步恶化,严重威胁地铁线路的安全运营,甚至引发严重事故。因此,在隧道结构出现超限变形、开裂和渗漏水等情况时,甚至在此之前,对隧道结构进行补强加固等综合治理是非常重要的。

内钢圈加固法是在隧道衬砌结构内表面通过黏结剂(环氧树脂)和膨胀螺栓(或化学锚栓)与钢板组合形成复合承载结构,以增强隧道衬砌结构的强度和承载性能,抑制隧道结构变形的发展^[6-8]。Asakura等^[9]对日本铁路隧道结构大变形和局部破损病害的治理措施进行了研究,就日本铁路隧道目前的病害治理对策进行了介绍;Zhai等^[10]基于平面应变条件下的物理模型试验,对采用钢板加固隧道衬砌结构的加固效果进行了研究,试验结果表明钢板加固隧道结构的刚度和承载力较未加固前分别提高190%和69%;柳献等^[11-12]首次开展了内张钢圈半环加固和整环加固盾构隧道衬砌结构极限承载性能的足尺试验研究,发现加固后结构的破坏缘于钢板与混凝土衬砌的黏结失效。Zhao等^[13]针对内钢圈加固盾构隧道管片非线性响应问题,提出了一种基于纤维梁单元和离散元的高效简化建模方法,该方法考虑与整个加载过程相关的关键材料和几何非线性;翟五洲等^[14]采用有限元数值模拟的方法,建立了盾构隧道管片环缝钢板加固的三维数值分析模型,研究了外荷载作用下钢板加固管片环缝错台变形发展规律,并就该加固方法与接缝错台量之间的关系进行探讨;孙雅珍等^[15]通过将内聚力模型与扩展有限元方法相结合,建立了可精确描述管片裂缝扩展过程的内张钢圈加固隧道结构三维实体非线性有限元模型,对钢板与混凝土黏结界面滑移破坏及开裂等劣化行为进行了动态模拟。

内钢圈加固盾构隧道结构足尺破坏试验结果表明^[16-17],极限承载条件下加固结构的破坏模式主要是加固体黏结界面的失效,表现为加固体的剥离。目前关于内钢圈加固盾构隧道的研究大多集中在加固

隧道结构的力学性能和承载特性等方面,关于内钢圈与混凝土衬砌间黏结界面力学特性以及黏结界面参数的影响少有研究。因此,本文通过内钢圈加固盾构隧道黏结界面力学性能的单轴拉伸与单轴剪切单元体试验,对加固结构黏结界面的破坏形态、极限承载力、平均黏结强度、荷载-位移曲线以及界面应变变化规律等进行分析,探究不同界面黏结形式、不同黏结剂厚度、不同膨胀螺栓强度等级以及不同混凝土表面粗糙度等因素对加固结构黏结界面力学性能的影响规律,结论可为盾构隧道内钢圈加固性能评估以及加固界面参数优化提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

已有研究表明^[11-12,18],内钢圈加固盾构隧道黏结界面破坏模式主要为在拉应力作用下的拉拔破坏以及在剪应力作用下的剪切破坏,很少有压坏的情形发生。因此本文关于内钢圈加固盾构隧道黏结界面力学性能试验研究主要考虑黏结界面的抗剪切性能和径向拉伸性能,以及由此导致的界面剥离破坏。试验内容主要包括黏结界面的单轴拉伸试验和单轴剪切试验,如图1所示。

试件主要由混凝土试块、界面黏结剂、加固钢板以及膨胀螺栓等构成。混凝土试块尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,等级为C50,采用商品混凝土在工厂预制和养护后运至试验场地;加固用钢板尺寸为100 mm×100 mm,厚度为20 mm。

为了防止钢板表面可能存在的凹凸不平或锈蚀等缺陷对界面加固性能产生的影响,需要对混凝土试块和钢板表面进行打磨和除锈处理并及时进行粘贴钢板加固施工,以免再次落入灰尘等杂质影响界面黏接效果。按照质量比为2:1的比例配置环氧树脂,搅拌均匀后进行灌注环氧树脂施工。将制作好的试件置于室内恒温和恒湿条件下养护7 d,待环氧树脂固化后拆除四边密封胶,检查加固试件的完整度和界面胶层的均匀度等情况,对边界向外溢出的多余胶层进行清除处理,整个试件制作流程如图2所示。

1.2 试件材料参数

本文混凝土试块主要由水泥、水、细骨料(砂)和粗骨料(碎石)等按照一定配比混合搅拌而成。混凝土试块养护完成后按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)^[19]中的有关规定进

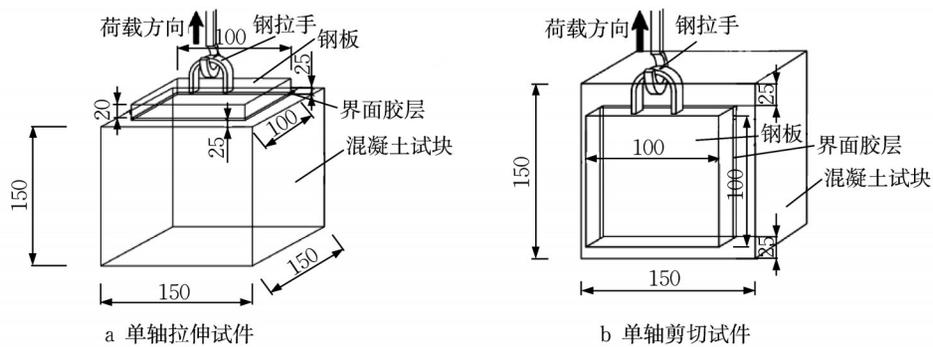


图1 内钢圈加固盾构隧道黏结界面单元体试件(单位:mm)

Fig. 1 Unit specimen of adhesion interface of steel reinforced shield tunnel (unit:mm)

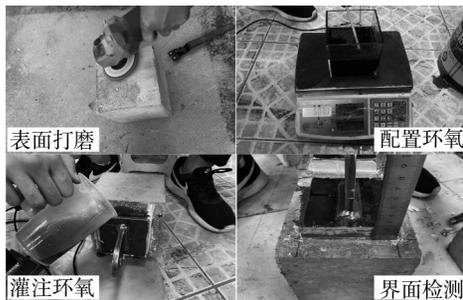


图2 试件制作流程

Fig. 2 Production process of test specimens

行试验,测得混凝土抗压强度平均值为40.8 MPa,抗拉强度平均值为3.9 MPa。

加固钢板采用标准的Q345型钢,厚度为20 mm,密度为 $78.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T2975—2018)^[20]设计和制作标准试件,在万能试验机上进行材料拉伸试验,测得材料的屈服强度为309.2 MPa,极限抗拉强度为469.6 MPa。

黏结剂采用曼卡特公司生产的改性环氧树脂类灌注型黏钢胶作为钢板与混凝土试件间界面黏结材料,该环氧树脂是一种用于混凝土结构注浆的超高强度环氧树脂,其构成主要包括A、B两组分环氧树脂,使用时需把A、B两组分按照质量比为2:1进行配置,充分混合后的环氧树脂颜色呈深蓝色。按照厂家提供的力学参数,该环氧树脂固化后密度为 $1.15\sim 1.20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,混合后可使用时间大约为20~50 min(视环境温度而定),固化时间约2~6 h,最低使用温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,具体材料力学参数如表1所示。

膨胀螺栓作为连接加固钢板和混凝土管片的重要构件,其强度的变化可能会影响加固界面的刚度。在内钢圈加固盾构隧道的工程应用中,通常采用4.8级的M16膨胀螺栓作为锚固件。为研究不同膨胀螺栓规格对结构加固效果的影响规律,以工程中通常使用的膨胀螺栓等级为参考,分别选取了M8×80、M12×100、M16×120和M18×150(以下简称M8、M12、M16和M18)4种规格的膨胀螺栓进行试验。

表1 材料力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of materials

名称	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
C50	2.50×10^3	27.7	40.8	3.9			27.9
Q345	7.85×10^3	206.0			309.2	469.6	27.9
环氧树脂	1.20×10^3	3.1	79.0	47.0			10.0

2 试验加载及数据采集

2.1 试验方案设计

通过对内钢圈加固盾构隧道黏结界面开展单元体试验,主要研究不同黏结界面参数对加固界面力学性能及承载性能的影响,并对极限荷载下界面破坏机理和破坏模式进行讨论。根据试验研究内容,

共设计静力加载试验工况20组,如表2所示。其中试件编号U(uniaxial static loading test)表示单轴静力加载试验,T(tensile test)表示拉伸试验,S(shear test)表示剪切试验。试验在上海同济大学轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室进行,结合沿海地区地铁隧道实际温度和湿度情况,试验室温度设定为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,室内湿度为 $60\%\text{RH}\pm 5\%$ 。

表 2 试验工况分组

Tab. 2 Grouping of test condition

试件编号	试验工况	黏结剂厚度/mm	膨胀螺栓等级	混凝土表面粗糙度	试件编号	试验工况	黏结剂厚度/mm	膨胀螺栓等级	混凝土表面粗糙度
UT-1	黏结剂厚度	1	M8	Roughness I	UT-11	膨胀螺栓等级	2	M12	Roughness I
US-2					US-12				
UT-3					UT-13				
US-4		US-14			M16				
UT-5		US-15			M18				
US-6		US-16							
UT-7		US-17			2		Roughness II		
US-8	US-18	混凝土表面粗糙度							
UT-9	US-19								
US-10	膨胀螺栓等级	2	M8	Roughness I	US-20			Roughness III	

注:“Roughness I”表示表面仅做打磨处理;“Roughness II”表示表面每间隔 15 mm 凿出一个凹槽;“Roughness III”表示表面每间隔 8 mm 凿出一个凹槽。

2.2 试验加载装置

试验加载采用基于杠杆原理设计而成的静态加载装置,如图 3 所示。该装置主要由一级杠杆和二级杠杆系统构成,基本组成构件主要包括底座、前支撑梁、后支撑梁、上臂梁、下臂梁、可伸缩拉杆、固定夹具以及荷载传感器等。荷载的调节方式主要有两种,一种是通过增减配重块的质量来实现加载,另一种是通过改变二级杠杆的动力臂长度来实现荷载的微调。该装置最小可实现 0.01 kN 的荷载控制精度,通过一级杠杆和二级杠杆的组合放大作用,该装置可以实现至少 100 倍的荷载放大效果,从而极大地减少试验所需的配重块的数量。在开始试验之前需要对加载装置进行调平处理,使得一级杠杆和二级杠杆处于相对水平状态。在试验正式加载之前需要对试件进行一定的预加载,以确保试件处于纯剪切或纯拉伸状态。



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Loading device of test

2.3 试验数据采集

试验中荷载值可通过加载装置中的荷载传感器读取并记录,黏结界面应变数据通过粘贴传统应变片的方式获取,应变片型号为 BX120-#AA 的箔式应变片,电阻值为 $(120.0 \pm 0.1) \Omega$,灵敏度为 $2.0 \pm$

1%。其中剪切试件选用丝栅尺寸为 $5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ (BX120-5AA) 的应变片,拉伸试件采用丝栅尺寸为 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ (BX120-3AA) 的应变片。采用东华 DH3816N 多通道静态应变测试仪记录应变数据,在连接应变片通道设置温度补偿,测试仪采集频率设置为 2 Hz。应变片布置在钢板与混凝土试件间黏结界面胶层位置,剪切试件沿荷载施加方向每间隔 20 mm 均匀布置 1 个应变片,共布置 5 个应变片,分别命名为 S1~S5。拉伸试件沿拉伸荷载方向每侧边布置 2 个应变片,共布置 8 个应变片,分别命名为 S6~S13。应变片布置位置示意如图 4 所示。

3 黏结界面力学性能和破坏特征

3.1 黏结界面厚度影响

内钢圈加固盾构隧道时,加固体与混凝土管片间通常采用环氧树脂进行灌注,而环氧树脂的厚度往往对加固界面的力学性能具有一定的影响。为研究不同黏结剂厚度对加固界面力学性能的影响,分别对 1、2、3 和 4 mm 厚度下黏结界面开展单轴拉伸试验和单轴剪切试验,主要从黏结界面的极限承载性能、平均黏结强度、荷载-应变曲线以及最终破坏形态等方面进行分析。

黏结界面的极限承载力和平均黏结强度是评价加固结构加固性能的重要参数之一。界面平均黏结强度是指加固体与混凝土结构间单位面积所承受的极限荷载。本文界面黏结强度可分为抗剪黏结强度(位于黏结面内)和抗拉黏结强度(垂直于黏结面)两种,其计算式如下:

$$\tau_{av} = P/A \quad (1)$$

式中: τ_{av} 为黏结界面的平均黏结强度,MPa; P 为界

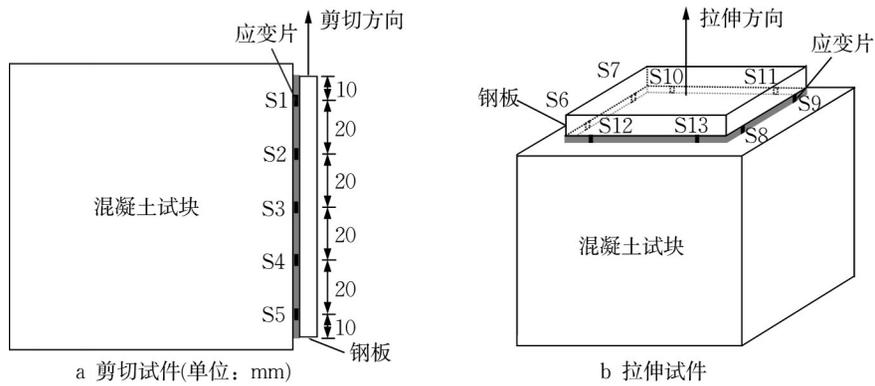


图 4 应变片粘贴位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of strain gauge pasting position

面破坏时的极限承载力, N ; A 为界面黏结面积, mm^2 。

图 5 所示为不同黏结界面厚度下试件在拉伸荷载和剪切荷载作用下的极限承载力和平均黏结强度。从图 5 中可以看出, 1 mm 厚度下黏结界面的拉伸极限承载力和剪切极限承载力较 2 mm 厚度下分别提高了 4.6% 和 5.6%, 3 mm 厚度较 4 mm 厚度的拉伸极限承载力和剪切极限承载力则分别提高了 10.2% 和 33.7%。由此可见, 黏结界面厚度越小界面极限承载力和黏结强度就越大, 但增幅逐渐降低。从界面极限承载力最大值来看, 黏结界面厚度为 1 mm 时无论是界面极限承载力还是黏结强度均为最优,

但厚度从 2 mm 减小到 1 mm 时黏结界面极限承载力提升不到 5.0%, 相比从 3 mm 到 2 mm 的提升效果较为有限, 但却极大地提高了环氧树脂灌注施工的难度。因此, 综合对比后建议在内钢圈加固盾构隧道工程中优先选择黏结剂厚度为 2 mm 更为合理。在拉伸荷载下所有试件黏结界面的最终破坏形态均为混凝土内聚破坏, 即混凝土界面发生剥离, 如图 6a 所示; 剪切荷载下黏结界面的最终破坏形态主要为加固体与黏结剂界面的脱开, 其中 4 mm 厚度下界面的破坏形式则主要为表层混凝土的剥离, 如图 6b 所示。因此, 在实际盾构隧道内钢圈加固工程中应重点关注管片结构强度对隧道整体加固性能的影响。

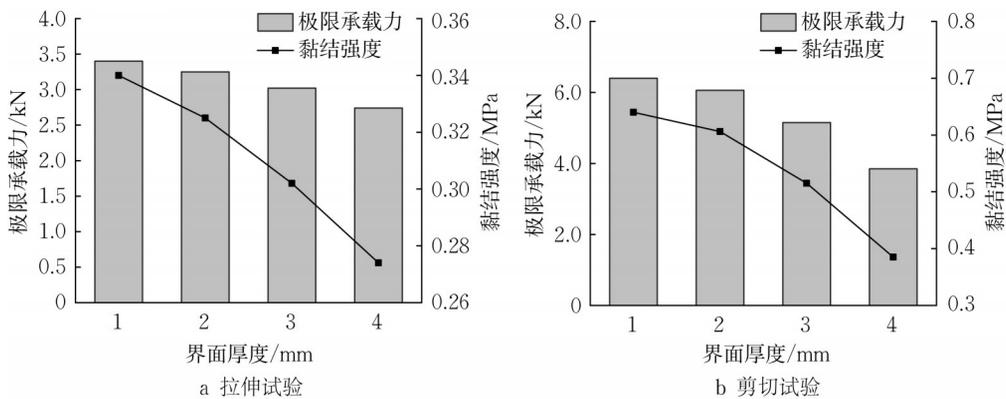


图 5 不同黏结剂厚度下界面极限承载力与黏结强度

Fig. 5 Ultimate bearing capacity and bonding strength of interfaces at different adhesive thicknesses

为进一步分析加载过程中黏结界面应变随荷载的变化规律, 绘制出不同黏结界面厚度下界面的荷载-应变曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 拉伸荷载加载初期, 黏结界面应变随拉伸荷载的增大近似呈线性增大, 当荷载接近黏结界面极限拉伸荷载时, 界面应变开始急剧增大; 当荷载达到界面极限拉伸承载力后, 此时荷载突然降为零, 应变值达到最大,

黏结界面发生完全破坏。对比不同黏结界面厚度下加固界面荷载-应变曲线可以发现, 黏结界面厚度越大对应的荷载-应变曲线斜率就越陡, 即同一荷载下黏结界面厚度越大对应的应变值就越大。

剪切荷载下黏结界面的荷载-应变曲线变化规律与拉伸荷载下类似。在加载前期, 应变随荷载的增长近似呈线性增大, 其中黏结界面厚度越大相应

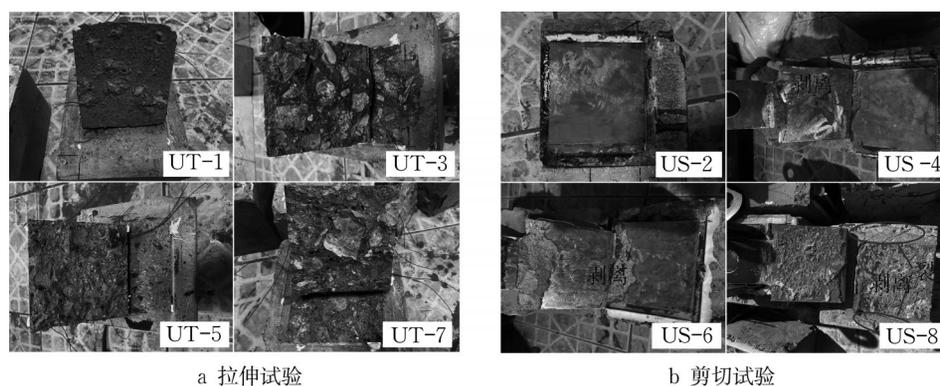


图 6 不同黏结剂厚度下界面破坏形式

Fig. 6 Failure mode of interfaces at different adhesive thicknesses

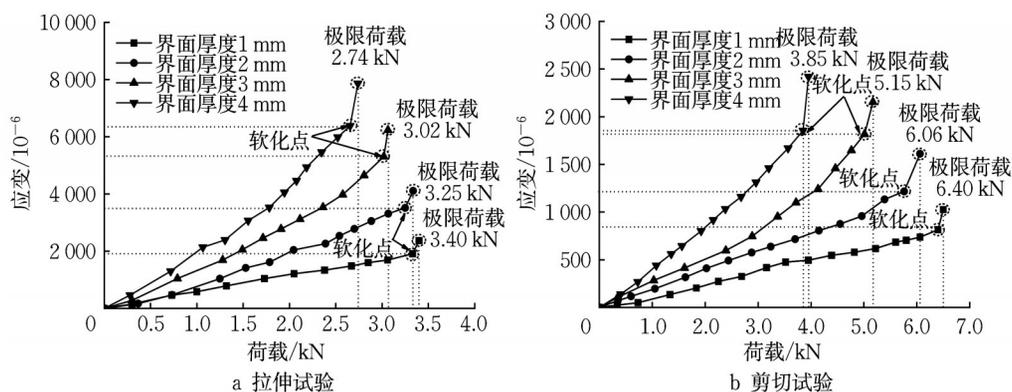


图 7 不同黏结剂厚度下界面荷载-应变曲线

Fig. 7 Interface load-strain curves at different adhesive thicknesses

的曲线斜率就越大。当荷载接近黏结界面极限剪切荷载时,应变值开始急剧增大,直至荷载达到界面极限剪切荷载时,此时应变值达到最大,界面发生破坏。

3.2 膨胀螺栓等级影响

内钢圈加固盾构隧道中钢板与隧道衬砌界面通常以黏结剂和膨胀螺栓(或化学锚栓)组合而成,其中膨胀螺栓作为连接钢板与混凝土管片间的重要构件,其强度的变化可能会影响加固界面的力学性能。为研究膨胀螺栓等级对内钢圈加固盾构隧道黏结界面力学性能的影响,本节分别对不同型号膨胀螺栓加固下的黏结界面开展单轴拉伸试验和单轴剪切试验,试验中黏结界面厚度为 2 mm。

不同型号膨胀螺栓加固下黏结界面的极限承载力和平均黏结强度如图 8 所示。通过与试件 UT-3、US-4 对比可以发现,无论是剪切工况还是拉伸工况,增加膨胀螺栓后的黏结界面极限承载力和平均黏结强度均有所提高,且提升效果随膨胀螺栓等级的增大而增大。例如试件 UT-9、UT-11、UT-13、UT-15 的极限承载力比试件 UT-3 分别提高了约

5.2%、12.3%、23.6% 和 52.6%,而试件 US-10、US-12、US-14 和 US-16 的极限承载力比试件 US-4 分别提高了约 9.2%、18.9%、42.5% 和 77.4%。

从拉伸和剪切工况下界面极限承载力提升比例来看,增加膨胀螺栓对黏结界面剪切性能的提升效果要显著优于对拉伸性能的提升,且这种影响规律随膨胀螺栓等级的增大更加明显。以 M16 型号膨胀螺栓加固界面极限承载力为例,剪切荷载下界面极限承载力相比同厚度黏结剂加固提高了 42.5%,而拉伸荷载下极限承载力仅提高了 23.6%。综合来看,M8 和 M12 型号膨胀螺栓无论是在抗剪切性能还是抗拉伸性能方面提升效果均较为有限,而 M18 型号膨胀螺栓对加固界面承载性能和黏结强度的提升效果最好,因此在内钢圈加固盾构隧道工程中应优先选择 M18 规格的膨胀螺栓。膨胀螺栓加固试件界面破坏形态与黏结剂加固形式类似,且膨胀螺栓型号对黏结界面的破坏形态影响很小。

图 9 为不同型号膨胀螺栓加固界面的荷载-应变关系曲线。分析图 9 曲线可以看出,黏结界面荷载-应变曲线斜率随膨胀螺栓等级的增大而减小,而

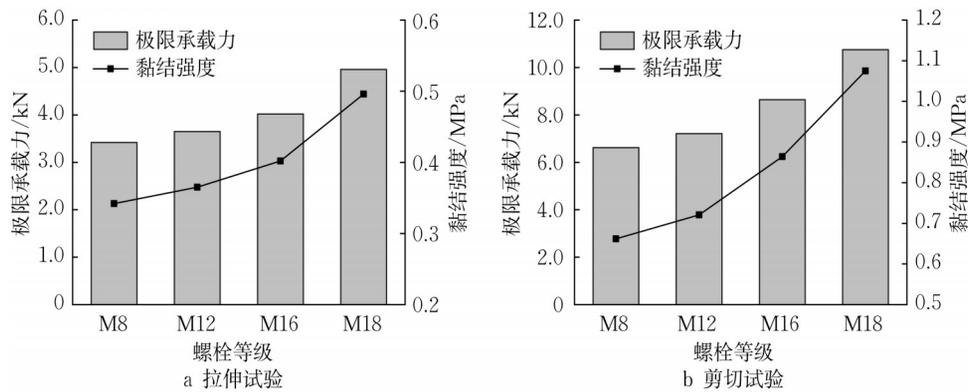


图 8 不同膨胀螺栓等级下界面极限承载力与黏结强度

Fig. 8 Ultimate bearing capacity and bonding strength of interfaces at different expansion bolt grades

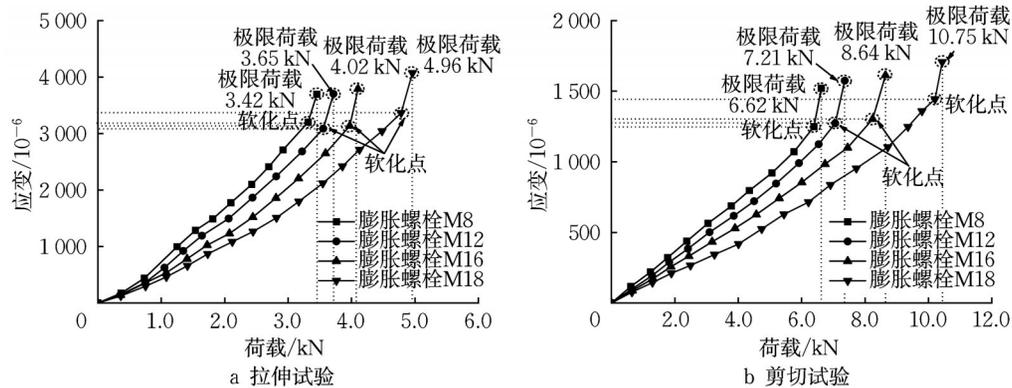


图 9 不同膨胀螺栓等级下界面荷载-应变曲线

Fig. 9 Interface load-strain curves at different expansion bolt grades

极限承载力随膨胀螺栓等级的增大而增大。分析原因主要是因为膨胀螺栓的加入分担了部分黏结界面荷载,且膨胀螺栓等级越高其分担的比例也就越大,从而极大地增强了黏结界面的刚度,进而导致黏结界面极限承载力更大但应变值反而降低。因此,在实际盾构隧道内钢圈加固工程中应尽可能选择强度等级更高的膨胀螺栓进行加固。

3.3 混凝土表面粗糙度影响

内钢圈加固盾构隧道黏结界面的力学性能通常受多种复杂因素的综合影响,除了受黏结剂厚度以及膨胀螺栓等级影响之外,混凝土表面粗糙度也是影响加固结构界面力学性能的重要因素之一。为了研究混凝土表面粗糙度对加固界面力学性能的影响,本文定义了3种不同等级的混凝土表面粗糙度,分别为“Roughness I”“Roughness II”和“Roughness III”,其中“Roughness I”表面仅做打磨处理,“Roughness II”表面每间隔 15 mm 凿出一个凹槽,“Roughness III”表面每间隔 8 mm 凿出一个凹槽,处理后的混凝土表面如图 10 所示。

分析 3 种不同混凝土表面粗糙度下黏结界面的

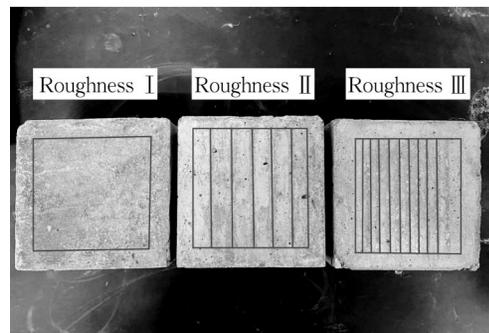


图 10 不同混凝土表面粗糙度

Fig. 10 Different surface roughness of concrete

极限承载力和平均黏结强度如图 11 所示。从图 11 中数据可以看出,混凝土表面粗糙度对黏结界面拉伸黏结强度的影响要大于对黏结界面剪切黏结强度的影响,整体影响规律为混凝土表面越粗糙黏结界面黏结强度就越大。例如,当混凝土表面粗糙度由“光滑”到“较粗糙”时对应的黏结界面拉伸黏结强度和剪切黏结强度分别提升了 8.3% 和 4.9%,混凝土表面由“较粗糙”到“粗糙”时对应的黏结界面拉伸黏结强度和剪切黏结强度分别提升了 17.0% 和

14.9%,出现这种现象的原因主要与黏结界面的最终破坏形态有关。试验结果表明,剪切荷载下黏结界面的破坏形态主要是加固体与黏结剂界面的脱开,即混凝土界面尚未达到极限承载状态时加固体界面已率先发生脱开。拉伸荷载下黏结界面破坏形态均为混凝土内聚破坏,其中混凝土表面粗糙度对黏结界面破坏形态的影响主要表现在表层混凝土被剥离的深度,混凝土表面越粗糙被剥离的深度就越深,钢板表面黏连的胶层和混凝土也就越多。剪切

荷载下黏结界面的破坏形态均为加固体与黏结剂界面的脱开破坏,同时伴有部分混凝土表面的剥离,其中试件US-4表面混凝土被剥离面积约占黏结界面总面积的15%左右,而试件US-18和试件US-20表面混凝土被剥离的面积约占黏结界面总面积的10%和5%左右。由此可见,在内钢圈加固盾构隧道工程中对混凝土表面进行一定的凿毛很有必要,且凿毛密度越大界面黏结性能也就越好。

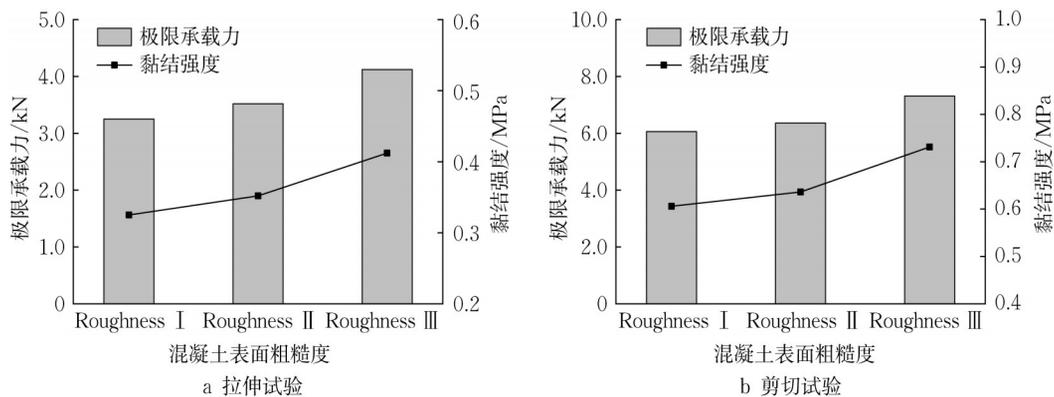


图 11 不同粗糙度下界面极限承载力与黏结强度

Fig. 11 Ultimate bearing capacity and bonding strength of interfaces at different roughness

图 12 为不同混凝土表面粗糙度下黏结界面的荷载-应变关系曲线。分析图 12 曲线可以看出,在黏结界面出现软化之前,不同混凝土表面粗糙度的

黏结界面荷载-应变曲线规律基本一致,这说明在界面出现软化之前,黏结界面应变变化规律受混凝土表面粗糙度影响很小。

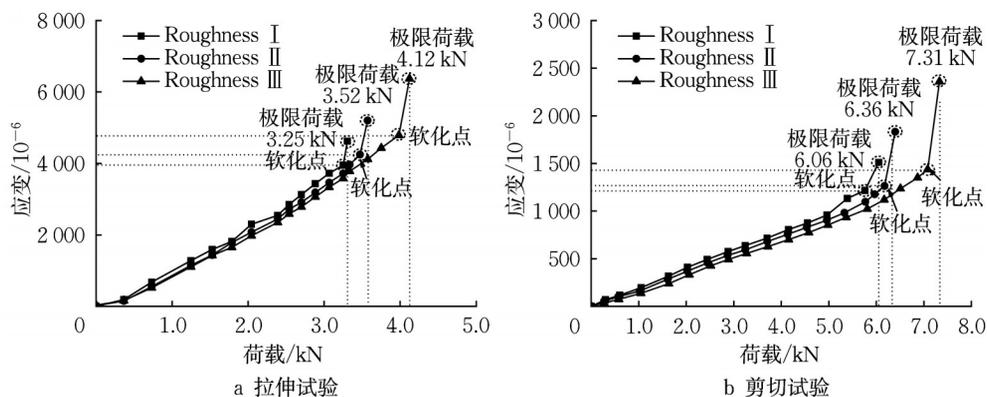


图 12 不同粗糙度下界面荷载-应变曲线

Fig. 12 Interface load-strain curve at different roughness

由于混凝土表面粗糙度对黏结界面力学性能的影响主要表现在极限承载力的差异,因此荷载-应变曲线的差异也主要表现在界面达到极限荷载时的应变值。例如拉伸极限荷载时,试件UT-17的应变值比试件UT-3的大 580×10^{-6} ,而试件UT-19的应变值比试件UT-17的大 $1\,172 \times 10^{-6}$;剪切极限荷载时,试件US-18的应变值比试件US-4的大 $321 \times$

10^{-6} ,而试件US-20的应变值比试件US-18的大 527×10^{-6} ,这与极限承载力和黏结强度的变化规律一致。

4 结论

针对内钢圈加固盾构隧道黏结界面力学性能及

黏结界面参数选择问题,开展了加固体与混凝土界面单轴拉伸与单轴剪切的单元体试验,探究了不同黏结厚度、不同膨胀螺栓等级以及不同混凝土表面粗糙度等因素对加固结构黏结界面力学性能的影响规律,重点对黏结界面的破坏形态、极限承载力、平均黏结强度、荷载-位移曲线以及界面应变变化规律等进行分析,得出以下主要结论:

(1)相同界面参数下,黏结界面的抗剪切性能普遍优于抗拉伸性能。在拉伸荷载下,黏结界面的最终破坏形态主要为混凝土内聚破坏,即界面混凝土发生剥离。剪切荷载下,黏结界面的最终破坏形态主要以加固体与黏结剂界面的脱开为主,同时伴有部分边缘混凝土的剥离。

(2)黏结界面极限承载力和黏结强度均随界面厚度减小而增大,但增幅逐渐减小。无论是剪切工况还是拉伸工况,增加膨胀螺栓加固可显著增强黏结界面的极限承载性能和黏结强度,且提升效果随膨胀螺栓等级的增大而增大。

(3)混凝土表面越粗糙黏结界面的力学性能越高,其中混凝土表面粗糙度对黏结界面拉伸黏结强度的影响要大于对剪切黏结强度的影响。因此,在内钢圈加固盾构隧道工程中对混凝土表面进行一定的凿毛处理,可显著提升钢环与衬砌之间的黏结效果。

作者贡献声明:

周顺华:提供研究支持,撰写论文。

张克平:方案设计,数据收集与分析,撰写论文。

张小会:提出研究思路,指导试验方案设计,论文审阅与修改。

张 权:协助试验,数据分析。

裴政川:协助试验,数据分析。

赵旭伟:全文审阅。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周顺华. 我国城市轨道交通地下工程的施工技术现状与发展[J]. 城市轨道交通研究, 2004(2): 34.
ZHOU Shunhua. Present situation and development of metro construction engineering in China [J]. Urban Mass Transit, 2004(2): 34.
- [3] 何川,封坤,孙齐,等. 盾构隧道结构耐久性问题思考[J]. 隧道建设, 2017, 37(11): 1351.
HE Chuan, FENG Kun, SUN Qi, *et al.* Consideration on issues about structural durability of shield tunnels [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1351.
- [4] 叶耀东,朱合华,王如路. 软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 157.
YE Yaodong, ZHU Hehua, WANG Rulu. Analysis on the current status of metro operating tunnel damage in soft ground and its causes [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 157.
- [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] 刘海京,夏才初,朱合华,等. 隧道病害研究现状与进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 947.
LIU Haijing, XIA Caichu, ZHU Hehua, *et al.* Studies on tunnel damage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 947.
- [7] 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.
- [8] 李芹峰,柳献,许熠. 隧道结构受损补强加固措施的演变和发展浅析[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊2): 5.
LI Qinfeng, LIU Xian, XU Yi. Analysis on evolution and development of reinforcement measures for damaged tunnel structures [J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S2): 5.
- [9] ASAKURA T, KOJIMA Y. Tunnel maintenance in Japan [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2): 161.
- [10] ZHAI W, CHAPMAN D, ZHANG D M, *et al.* Experimental study on the effectiveness of strengthening over-deformed segmental tunnel lining by steel plates [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103530.
- [11] 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 on ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2300.
- [12] 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.
- [13] ZHAO H L, LIU X, Bao Y H, *et al.* Simplified nonlinear

- simulation of shield tunnel lining reinforced by epoxy bonded steel plates [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 51: 362.
- [14] 翟五洲, 翟一欣, 张东明, 等. 盾构隧道钢板加固衬砌管片环缝抗剪性能数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊 2): 235.
- ZHAI Wuzhou, ZHAI Yixin, ZHANG Dongming, *et al.* Numerical study on shearing performance of steel plate strengthened circumferential joints of segmental tunnel linings [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2): 235.
- [15] 孙雅珍, 于阳, 王金昌, 等. 考虑界面效应的内张钢圈加固盾构管片结构力学性能研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 343.
- SUN Yazhen, YU Yang, WANG Jinchang, *et al.* Study on mechanical properties of shield tunnel lining strengthened by steel plates considering interface effect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 343.
- [16] LIU X, JIANG Z J, 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.
- [17] 毕湘利, 柳献, 王秀志, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(11): 128.
- BI Xiangli, LIU Xian, WANG Xiuzhi, *et al.* Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(11): 128.
- [18] 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.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods for concrete physical and mechanical properties: GB/T50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [20] 国家市场监督管理总局. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T2975—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation. Steel and steel products-location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T2975—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.