

复合材料叠合衬砌加固管片接头抗正弯矩研究*

宿文德

(上海隧道工程有限公司,上海 200032)

摘 要:复合材料叠合衬砌是加强各种隧道的一种新型结构形式。这种结构具有强度高、操作轻便、施工效率高、构件所占空间小等优点,特别适合于城市地铁隧道修复时复杂的施工条件。笔者主要研究了管片接头采用复合材料叠合衬砌加固后的抗正弯矩性能,对加固前后管片接头的荷载-挠度变化、荷载-接缝张开量变化(内外两侧)、荷载-接缝张角变化、螺栓应力及复合构件应力变化等进行了对比分析,研究了复合构件加固接头的破坏形态。结果表明,复合材料叠合衬砌能有效提高管片接头在正弯矩区的抗弯承载能力和接头转角刚度,可作为隧道管片加固的一种新方法。

关键词:盾构隧道加固;复合材料叠合衬砌;复合构件;管片接头;荷载试验

中图分类号:TU921 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)06-1517-08

Study on Flexural Behavior of Segment Joints Strengthened with Fiber and Mortar-filled Tubes Composite Lining under Positive Moment

Su Wende

(Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd., Shanghai 200032, P.R. China)

Abstract: In strengthening a tunnel structure, the fiber and mortar-filled tube composite lining (FMTCL) is a new structure with the advantages of high strength, convenient operation, efficient installation, small occupied space, and especially suitable for reinforcing the structure of urban subway. In the current study, a series of experiments were conducted on standard/reinforced segment joints to investigate the flexural behaviors of segment joints strengthened with FMTCL under positive moment. The load-deflection curves, load-displacement curves and load-bolt stress of the standard and reinforced opening segment joints were measured. The load-angle and load-stiffness curves were then obtained. The failure patterns of the standard and reinforced segment joints were furthermore analyzed. It shows that, FMTCL may efficiently enhance the flexural bearing capacity and rotation stiffness of segment joints in the positive moment area; FMTCL is a new technique in reinforcing the structure of shield tunnel in the future.

Keywords: shield tunnel strengthening; fiber and mortar-filled tubes composite lining (FMTCL); composite cavity component; segment joint; load test

0 引言

近年来,我国各地轨道交通得到了快速发展,地铁已成为各大城市最主要的公共交通工具之一。

目前,全国各地的地铁隧道主要采用盾构法建造,而地铁盾构法隧道均采用若干块弧形管片(Segment)拼装成环(Element)。管片之间通过螺栓紧固连接,形成一种多铰不连续圆拱结构。由于

* 收稿日期:2017-07-03(修改稿)
作者简介:宿文德(1982-),男,新疆塔城人,大学本科,高级工程师,主要从事市政公用工程与地下工程等领域的设计、施工和研究等工作。E-mail:wend1982@hotmail.com
基金项目:上海市科委重点支撑项目(13231200400);上海市青年科技启明星计划项目(13QB140340);上海市产学研合作年度计划项目(沪 CXY-2013-9)

地铁线路在地面并未明确显示,随着城市建设的进程,时常发生在地铁隧道上方荷载突然增大,超出隧道结构设计荷载,继而出现管片变形过大、接缝张开角度过大或管片局部压碎、管片之间错台、缺角、接缝螺栓屈服、结构渗漏水等隧道结构病害^[1-3]。这些病害会严重影响已投入运营的地铁隧道。如何加固并修复受损隧道或对既有隧道补强^[4-7],控制隧道结构变形,是地铁隧道修复领域极需解决的问题。

目前,地铁隧道内衬加固的方法^[4-7]主要有 2 种:粘贴纤维布加固法^[8]和粘钢板加固法^[9-13]。粘贴纤维布加固中,纤维布只能承受拉力,仅对管片顶、底部内侧受拉区起到加固效果,而对管片侧部内侧受压区没有作用。粘钢板加固法主要是在内侧粘贴钢板支撑隧道结构,对于管片侧部内侧受压区无法直接提供作用,而且粘钢加固法还存在加固构件笨重、安装施工复杂、质量控制难度大和易受腐蚀等问题需要解决。

因此,本文对一种新型加固构件进行研究,这种新型构件是由内中外 3 层主要结构组成的,中间由定型加工而成的钢管腔体组成,钢管外侧粘贴包裹高强纤维,内腔充填高强砂浆。这种复合材料叠合衬砌是一种用于各种地铁隧道结构加强的新型结构形式^[14-15]。该构件是在空腔状态下与管片坚固安装后,采用合理的方式将自密实砂浆注入构件腔内,最终形成密实构件。由于其安装构件较小,具有安装部件质量小、安装操作快、可以多线同步施工等特点,尤其适合于操作时间短暂的运营地铁隧道内加固。该构件在空管轻质状态下分节段安装于管片内侧,然后对其充填自密实砂浆,使其同时满足抗压和抗拉受力要求。复合构件加固于管片内侧,增加了管片受力面积,高强的抗压和抗拉受力性能显著提高了加固后管片的抗压强度和抗弯刚度。本文将通过正弯矩承载力试验,对加固前后管片接头的荷载-挠度变化、荷载-接缝张开量变化(内外两侧)、荷载-接缝张角变化、螺栓应力及复合构件应力变化等进行了对比分析,研究复合构件加固接头的破坏形态,验证该结构对管片接头抗正弯矩的能力。

1 加固管片接头抗正弯矩试验概况

1.1 试验目的和内容

本试验是为了验证研究复合材料叠合衬砌加

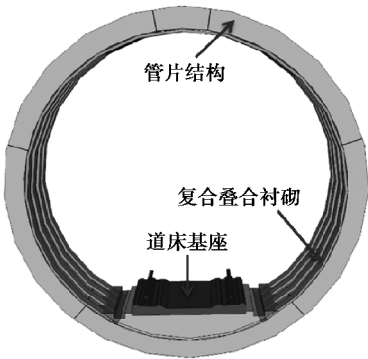


图 1 复合叠合衬砌加固整环管片示意图

Fig. 1 Sketch of the whole segment lining ring reinforced with FMTCL

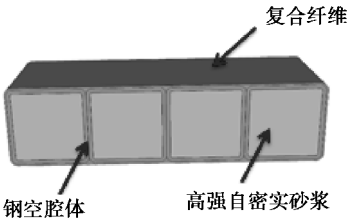


图 2 复合叠合衬砌截面示意图

Fig. 2 Sketch of the section of FMTCL

固正弯矩区管片接头的弯矩承载能力。试验构件由通用混凝土管片标准块切削而成,管片外半径为 3 100 mm,厚度为 350 mm。构件是由标准块沿环缝方向切削成 1 300 mm(外弧长)×350 mm(高)×1 200 mm(管片宽),每套构件由两个上述构件按隧道管片拼装方式连接。先后对构件组成的未加固管片接头和加固管片接头进行正弯矩加载破坏试验。两次试验在同一平台上按相同步骤进行加载,加载装置如图 3。加固管片的方式是在管片构件内侧安装一层复合叠合构件。复合叠合构件的截面尺寸为 160 mm(宽)×40 mm(高),如图 4。

通过试验确定管片接头跨中挠度变形、管片接头抗弯刚度、螺栓应力变化,复合构件应力分布规律等随荷载的变化在未加固及加固两种条件下的发展规律,同时确定管片接头抗正弯矩极限承载能力的大小和破坏形态,对比加固与未加固管片接头试验数据,评价复合构件对管片接头的加固效果。

试验内容为实测荷载-挠度曲线、荷载-接缝张开量曲线、荷载-接头处的螺栓应力、荷载-右支座位移曲线,研究复合材料加固构件的应力分布、荷载-接缝张角曲线、荷载-接头转角刚度曲线。

1.2 加载设备及加载步骤

加载设备是同济大学研制的管片接头试验加

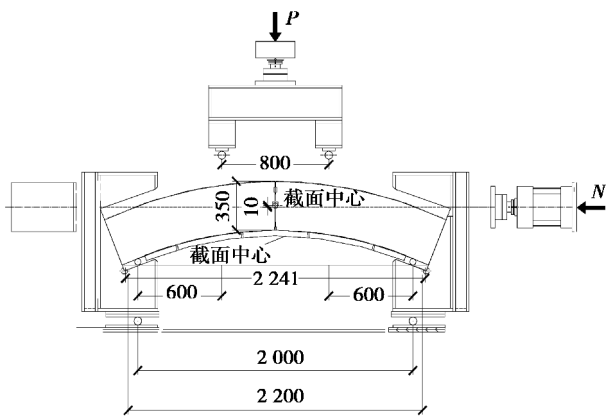


图3 管片接头正弯矩承载加载装置

Fig. 3 Loading device of bending resistance tests of reinforced segment joints under positive moment

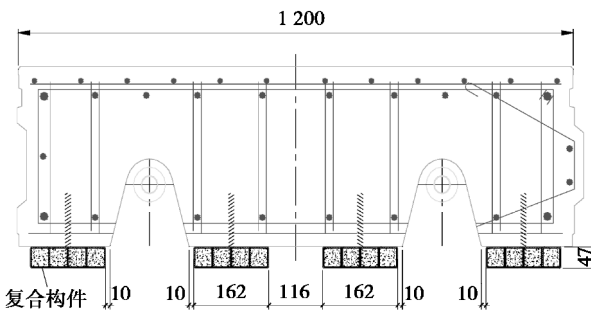


图4 复合叠合构件加固管片断面图(单位:mm)

Fig. 4 Section of reinforced segment joints with FMTCL(unit:mm)

载系统^[16]。该系统的组成部分有:主加载框架、电液伺服加载作动器、试样座、试样装配与纵向加载装置和 POP-M 工控 PC 电液伺服多通道控制器等。

试验采用数控式千斤顶,通过施加水平荷载 N 和竖向荷载 P 对未加固及加固管片进行接头抗正弯矩破坏试验,使用惯用法计算管片封顶块接头在常见覆土深度(15 m)时对应荷载($M=143.7\text{ kN}\cdot\text{m}$, $N=900\text{ kN}$)下的受力情况及变形破坏特征。试验管片受力计算简图如图3。如图所示,加载构件的轴力为轴向偏心10 mm,加载轴力根据覆土深度计算取值 $N=900\text{ kN}$ 。构件接头的弯矩由两部分力产生:竖向加载力 P 和平台水平偏心轴力 N 。于是,竖向加载力 P 使接头产生相应的弯矩内力 M 应按式(1)计算得出,为模拟达到原覆土管片内力状态的试验荷载经计算如表1。

$$M = P \cdot l_1/2 - N \cdot e$$

(1)

式中: l_1 是竖向加载力 P 在管片上作用点到支座边的水平距离; e 是水平加载力 N 产生的偏心距。

表1 模拟覆土15 m管片接头受力试验荷载表

Table 1 Load corresponding to internal force of segment joint under 15 m from the ground

竖向加载力 P/kN	水平加载力 N/kN	接头模拟弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	接头模拟轴力 P/kN
500	900	143.7	900

为使接头管片在试验设备上的状态接近真实情况,拟定先对其施加少量竖向荷载起到限位作用,确保水平荷载施加过程中不会失稳翻翘;然后逐步施加水平荷载至模拟轴力;最后逐步施加竖向荷载至模拟竖向力,完成还原管片模拟状态。为简化试验模型得到直观的结果对比,仅通过增加竖向荷载而水平力不变模拟正弯矩增加,未模拟竖向荷载施加过程中的轴力增加状态。其试验结果偏于安全,并用于比较时更加直观明确。

未加固管片接头的加载过程如下:

- (1) 竖向千斤顶施加竖向力 P 至100 kN,维持荷载5 min;
- (2) 保持 P 不变,施加水平力 N ,每级施加100 kN、维持荷载5 min,加载至900 kN。

(3) 保持水平力 N 不变,继续施加竖向力 P ,每级施加50 kN、维持荷载5 min,加载至破坏。

加载过程中,为避免轴力突然加载过大产生剪力导致复合叠合构件自身及其与管片粘结处被破坏,采用了水平轴力和竖向力交替按阶段加载的方式进行。当荷载达到表1数值后(覆土深度15 m的模拟状态),保持水平加载力 N 不变,逐步增加竖向力 P 、直至管片接头受正弯矩加载破坏。加固管片接头试验时加载速度均为20 kN/min,具体加载过程如下:

- (1) 施加竖向力 P ,施加至50 kN、持荷5 min。
- (2) 施加水平力 N ,施加至100 kN、持荷5 min。
- (3) 重复(1)、(2)两步骤,每次 P 增加50 kN,持荷5 min后, N 增加100 kN,持荷5 min,直至 $P=500\text{ kN}$, $N=900\text{ kN}$ 。
- (4) 保持水平加载力 N 不变,逐级增加竖向力 P ,直至破坏,加载过程每级50 kN、持荷5 min。

1.3 测试内容及测点布置

1.3.1 位移计的布置

试验采用位移计测试管片挠度及接缝张开量,位移计测点布置如图 5 所示,布置方法是:

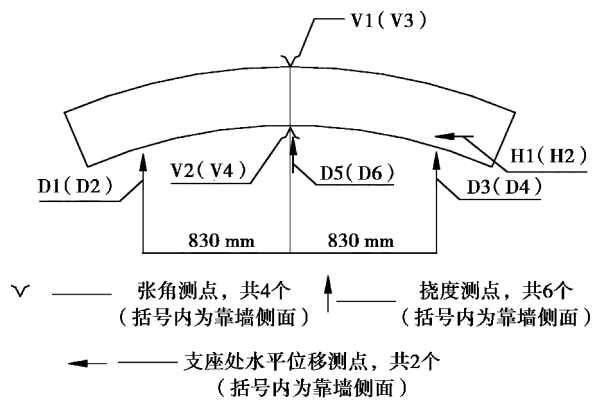


图 5 管片位移计布置图

Fig. 5 Layout of displacement meters

- (1) 4 个支座处分别布置一个位移计(编号分别为 D1~D4)测量支座沉降。
- (2) 管片跨中位置沿宽度方向在两侧各布置 1 个位移计(编号分别为 D5~D6)测量跨中挠度。
- (3) 在管片纵缝上、下表面各布置一个位移计测量缝张开量,沿宽度方向在两侧及中间部位布置两组,编号分别为 V1~V4。
- (4) 在管片右侧支座附近布置两个水平位移计,编号分别为 H1~H2。

1.3.2 应变片的布置

应变片将布置于复合材料叠合衬砌下方,具体如图 6 所示。

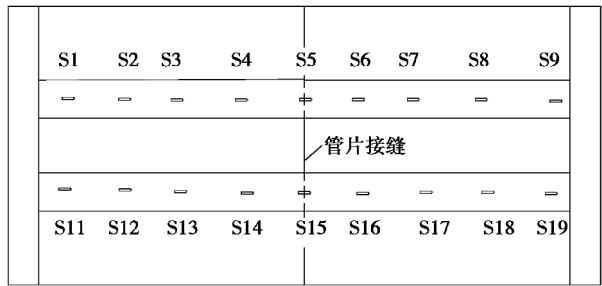


图 6 复合构件应变片布置图

Fig. 6 Layout of strain gauges installed on FMTCL

2 管片接头试验结果分析

2.1 荷载-挠度曲线分析

图 7 为未加固和加固管片接头的荷载-跨中挠度关系曲线。由图 7 可以看出,对未加固管片接

头,在竖向力 P 达到 400 kN 前,跨中挠度随竖向加载线性增加,荷载-挠度曲线无明显拐点。 P 继续增加时,跨中挠度随荷载增加,转动刚度较 400 kN 之前大幅减少。 P 达到 500 kN 时,对应接头弯矩为 143 kN·m、轴力为 900 kN,达到 15 m 上覆土对应管片顶部接头内力,跨中挠度为 2.38 mm; P 加载至 950 kN 时,跨中挠度已达 15 mm;当 P 加载至 1 100 kN 时,跨中挠度已达 20.36 mm,继续加载接头破坏,挠度急剧变大。

如图 7 所示, P 在 400 kN 前后荷载-挠度曲线刚度变化显著,分析其原因在于, P 达到 400 kN 前的试验加载方式与管片接头实际受力不一致,试验时水平逐步先加载到 900 kN 后,再逐步增加 P 荷载,导致 $P=400$ kN 前管片接头刚度过大。

因此,可以判定 P 在 400 kN 以后的荷载-挠度曲线基本能反映管片接头实际力学响应。拟定加固接头以 $P=400$ kN 为参考点,比较 $P=400$ kN 之后未加固与加固的管片接头荷载挠度曲线。

对加固管片接头,竖向荷载 P 由 400 kN 加载至 1 450 kN,对应跨中挠度为 3.03 mm,荷载-挠度曲线近似直线,刚度较未加固管片大幅提高; P 加载至 1500 kN,试验构件发生明显响声,构件与管片部分脱裂,试验紧急终止,最终变形不大,跨中最终挠度为 3.4 mm。对于该加固管片达到极限状态后的受力性能未进一步完成。

经试验数据分析对比,当荷载 $P>400$ kN 后,加固管片接头较未加固管片接头在相同挠度变形下对应的承载力有明显的提升,对应刚度大幅提高。如表 2 所示,与未加固管片接头相比,挠度达到 1 mm 时,加固后管片接头正弯矩承载力提高 116%;挠度达到 1.85 mm 时,加固后管片接头正弯矩承载力提高 190%;破坏时加固管片接头极限抗正弯矩承载力提高 37%。

表 2 未加固及加固管片在同一跨中挠度对应的承载力对比
Table 2 Comparison of bearing capacity of unreinforced/reinforced segment joints at a certain deflection

挠度 /mm	未加固			加固后		
	承载力 /kN	承载力 /kN	提高 /%	弯矩 承载 能力 /(kN·m)	弯矩 承载 能力 /(kN·m)	弯矩 承载 能力 提高 /%
1	480	1000	108	135	291	116
1.85	520	1450	179	147	426	190
破坏时	1100	1500	36	321	440	37

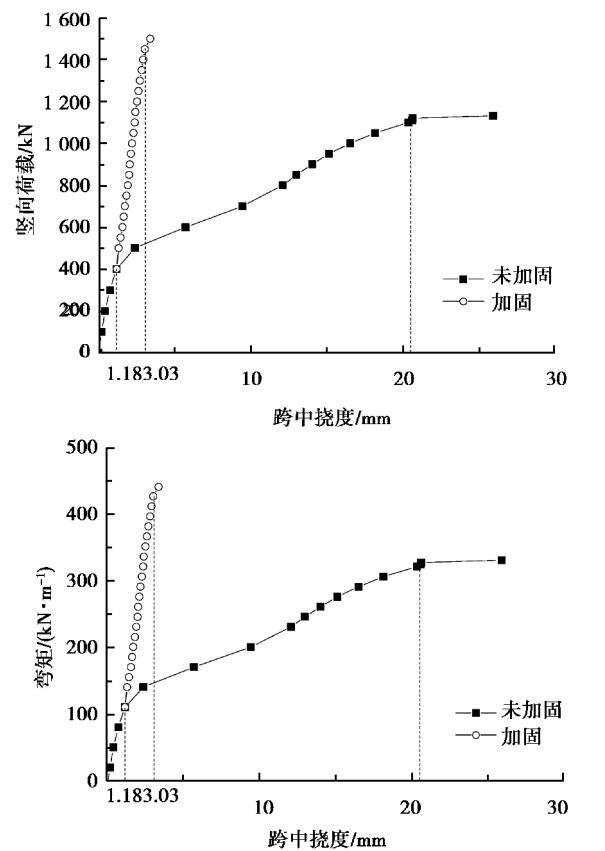


图7 荷载与跨中挠度关系曲线
Fig. 7 Relationship between load and mid-span deflection

2.2 荷载-接缝张开量关系研究

荷载-接缝张开量的变化关系如图8所示。从图中可以看出,未加固管片接头在竖向力 P 达到极限荷载1100 kN(相应弯矩为321 kN·m)前,接缝张开量随正弯矩快速增加;弯矩达到321 kN·m时,外侧接缝收缩达5.35 mm,内侧接缝张开10.4 mm;随着 P 的继续增加,弯矩承载力逐步下降,接缝张开量急剧增加,进而接头破坏。

由图8还可以看出,加固管片接头在 P 由400 kN($M=111$ kN·m)加载至1450 kN($M=426$ kN·m)过程中,内、外侧接缝张开量随正弯矩增加呈线性增加; P 达到极限荷载1500 kN($M=440$ kN·m)时,外侧接缝收缩1.08 mm,内侧接缝张开1.18 mm;随后加固构件与管片脱离,接头逐步破坏。由图8可知,加固管片有效限制了张开量变化,相对于 $P=400$ kN($M=111$ kN·m)时,外侧接缝张开0.72 mm时加固管片接头的正弯矩承载力比未加固管片提高312%。

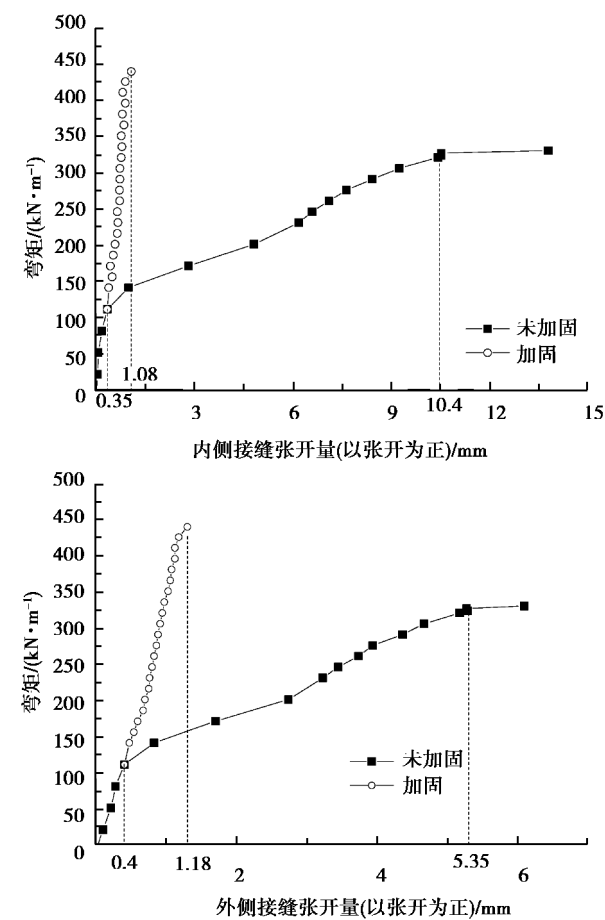


图8 荷载与接缝张开量关系曲线
Fig. 8 Load vs. joint opening displacement curves

2.3 荷载-接缝张角/转角刚度的关系研究

加固前后的荷载-接缝张角、荷载-接缝转角刚度的关系曲线如图9、图10所示。

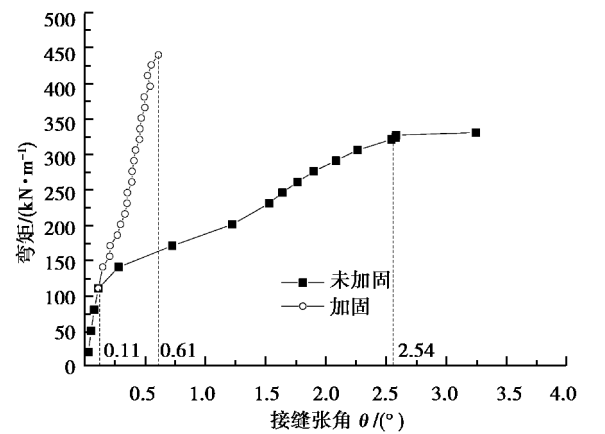


图9 荷载与接缝张角关系曲线
Fig. 9 Load vs. joint angle relationship curves

由图9和图10可以看出,未加固管片接头由于预先施加较大水平力,在 $P=400$ kN($M=111$ kN·m)

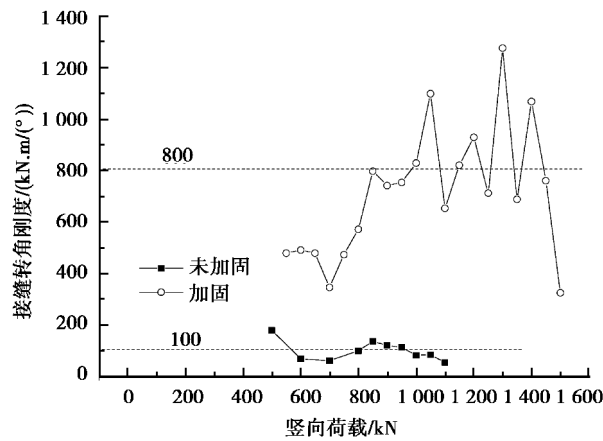


图 10 荷载与接缝转角刚度关系曲线

Fig. 10 Load vs. joint rotation stiffness relationship

之前,接缝张角随弯矩线性增加,接缝张角由 0° 增加到 0.11° ;当弯矩由 $111\text{ kN}\cdot\text{m}$ 增加到 $321\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,接缝张角由 0.11° 快速增加到 2.54° ,接缝转角刚度升至 $135\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 下降到 $53\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$;随着荷载的继续增加,接头逐步破坏。

加固管片接头在 $P=400\text{ kN}$ ($M=111\text{ kN}\cdot\text{m}$) 加载至 $P=800\text{ kN}$ ($M=231\text{ kN}\cdot\text{m}$),接缝张角由 0.11° 增加至 0.35° ,接缝转角刚度在 $500\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 左右;当 P 超过 800 kN 至 $1\,450\text{ kN}$ ($M=426\text{ kN}\cdot\text{m}$)时,接缝张角由 0.35° 增加至 0.55° ,接缝转角刚度维持在 $800\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 附近;当 P 加载至极限 $1\,500\text{ kN}$ ($M=440\text{ kN}\cdot\text{m}$),接缝张角增加至 0.61° ,转角刚度突降至 $323\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$;随后承载弯矩下降,复合构件与管片脱离,接头逐步破坏。由图 9、图 10 知,加固后承受正弯矩状态下管片接头的转角刚度得到显著提高。加固后管片接头平均转角刚度 $800\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 较未加固接头平均转角刚度 $100\text{ kN}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 提高约 8 倍;接缝张角 0.55° 时,加固管片接头承载正弯矩能力($426\text{ kN}\cdot\text{m}$)较未加固接头提高 258%。

2.4 螺栓应力

图 11 为螺栓应力随荷载变化关系曲线。由图 11 可以看出,对于未加固管片接头,由于水平力预先施加,竖向荷载 $P=500\text{ kN}$ 之前螺栓应力基本为 0 MPa ,管片接头全截面处于受压状态;当 P 超过 600 kN 时,螺栓应力快速增加; P 增加至 $1\,100\text{ kN}$ 时,螺栓应力超过 400 MPa 屈服。

对于加固管片接头,由图 11 显示,在 P 由 400 kN 加载至破坏过程中,螺栓应力在 25 MPa 以内变

化。这是由于管片预拼装后即进行加固,管片接头加载中大部分拉力由加固复合构件承担,螺栓应力基本维持较小应力水平。

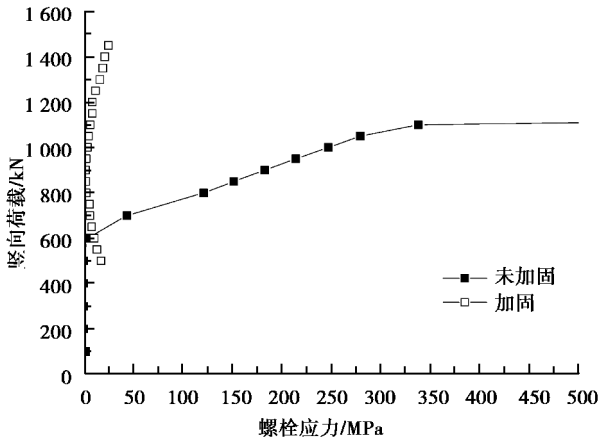


图 11 管片螺栓应力与荷载关系

Fig. 11 Load vs. bolt stress relationship of segment joints

2.5 复合叠合构件应力应变分析

复合叠合构件应变大小与接缝中心距离的关系曲线如图 12 所示。

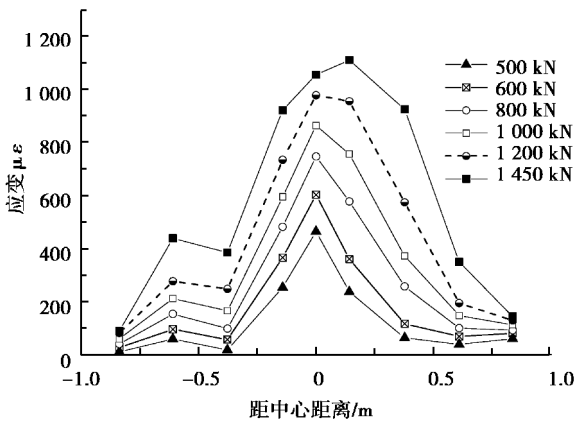


图 12 复合叠合构件应变和与接缝距离关系

Fig. 12 Relationship between FMTCL component strain and the distance to segment joint

由图 12 可以看出,复合构件应变随竖向荷载增加和正弯矩的增大而逐步增加, P 加载至 600 kN 之前,复合构件应变集中在管片接缝中心两侧 0.4 m 范围内(P 加载设备范围),接缝中心处应变最大; P 增加至 800 kN ($M=231\text{ kN}\cdot\text{m}$)以上时,应变变化区扩大到 $-0.5\sim 0.6\text{ m}$ 范围,最大应变向可移动支座偏移;当 $P=1\,450\text{ kN}$ ($M=426\text{ kN}\cdot\text{m}$)时,距接缝 $-0.142, 0, 0.142, 0.377\text{ m}$ 处,复合构件应变分别为 $920.8, 1\,054.3, 1\,109.4, 923.8\text{ }\mu\text{ε}$,变化显著,最大应变在距接缝为 0.142 m 处;当竖向荷

载 P 增大至 1 500 kN 时,复合构件与接缝处管片撕裂脱开,接头发生破坏。

2.6 破坏形态研究

2 套构件通过试验加载到破坏的形态如图 13、图 14 所示。



图 13 未加固管片接头破坏形态

Fig. 13 Failure pattern of unreinforced segment joints



图 14 加固管片接头破坏形态

Fig. 14 Failure pattern of reinforced segment joints

由图 13 可以看出,未加固管片接头在轴力 $N=900$ kN、正弯矩 $M=321$ kN·m 时发生破坏。管片接头在承受正弯矩时,其受力状态是由管片内侧紧固螺栓承受拉力,由外侧部分混凝土接触承受压力。螺栓的位置和强度直接决定了未加固管片的接头的正弯矩承载能力。当达到极限荷载时,管片接缝处内侧螺栓受拉屈服,管片接头外侧混凝土被压碎,接头挠度达到 20.36 mm,内侧接缝收缩达 5.35 mm,外侧接缝张开 10.4 mm。

由图 14 可以看出,加固管片接头在轴力 $N=900$ kN、正弯矩 $M=440$ kN·m 时发生破坏。加固后的管片受力情况发生了改变,由复合构件表面的高强度纤维承担全部拉力,通过安装时的胶水与螺栓使复合构件与管片共同作用。拉力位置的内移以及抗拉能力的显著提高,也使得管片弯矩受力的

中性轴下移,有更多外侧混凝土接触抗压,从而提高抗正弯矩的能力。逐步增加竖向荷载接头产生变形后,管片接头处跨中混凝土首先拉裂,引起接头转动中心上移,复合构件对接头转动约束能力失效,活动支座处管片与复合构件紧固螺栓拉断崩坏,随后复合加固构件与管片界面剪拉破坏,管片外侧受压区混凝土被压碎,管片接缝整体发生破坏。

3 结论

对复合材料叠合衬砌加固管片正弯矩承载性能进行了试验研究,对加固前后管片接头的荷载-挠度变化、荷载-接缝张开量变化(内外两侧)、荷载-接缝张角变化、螺栓应力及复合构件应力变化和破坏形态等进行了对比分析,得到如下主要结论:

(1)对于未加固管片接头,在轴力 $N=900$ kN、正弯矩 $M=321$ kN·m 时发生破坏,抗正弯矩极限承载能力为原设计工况下弯矩值约两倍;接头破坏时,内侧接缝收缩达 7.61 mm,外侧接缝张开达 29.8 mm;接头破坏形式为管片接头外侧混凝土挤压破裂,抗正弯矩截面高度明显降低,继而导致坚固螺栓拉力激增后屈服以及接头外侧混凝土的进一步挤压破裂。

(2)加固后,管片接头的抗正弯矩能力和刚度均有显著提高,与未加固管片接头相比,挠度达到 1 mm 时,加固后管片接头正弯矩承载力提高 116%;挠度达到 1.85 mm 时,加固后管片接头正弯矩承载力提高 190%;破坏时加固管片接头极限抗正弯矩承载力提高 37%。加固管片接头平均转角刚度为 800 kN·m/(°),较未加固管片接头提高约 8 倍;接缝张角 0.55°时,加固管片接头承载弯矩 (426 kN·m)较未加固管片接头提高 258%。

(3)本次加固试验时,复合加固构件外侧包裹一层芳纶纤维,经试验证实芳纶纤维与管片粘结强度较低,在一定程度上降低了此次试验的加固效果。经过工艺改善,在此后试验用粘结更强的复合纤维替代芳纶纤维,得到接头加固效果明显优于本次试验结果。

(4)本次试验证明,复合材料叠合衬砌对于管片正弯矩接头的加固效果是明显和有效的,其加固效果具备规律可掌握,可以作为隧道管片加固的一

种新方法得以应用。

参考文献(References)

- [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): 37-43. (Wang Rulu. Structural safety analysis of shanghai rail transit tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(4): 37-43. (in Chinese))
- [2] 王如路, 肖同刚, 朱妍. 上海地铁盾构隧道渗漏水治理与变形控制[J]. 地下工程与隧道, 2011(增2): 102-108. (Wang Rulu, Xiao Tonggang, Zhu Yan. Water leakage treatment and deformation control of shield tunnel in Shanghai metro [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(Supp.2): 102-108. (in Chinese))
- [3] 朱逢斌, 王月香. 基坑施工对下方既有盾构隧道结构变形影响分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3): 94-100. (Zhu Fengbin, Wang Yuexiang. Analysis of the effects of foundation pit construction on the structural deformation of an existing underlying shield tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(3): 94-100. (in Chinese))
- [4] Morgan D R. Compatibility of concrete repair materials and systems [J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(1): 57-67.
- [5] Richards J A. Inspection, maintenance and repair of tunnels: international lessons and practice [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(4): 369-375.
- [6] Song H W, Lu S M. Repair of a deep-mine permanent access tunnel using bolt, mesh and shotcrete [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 235-240.
- [7] Asakura T, Kojima Y. Tunnel maintenance in Japan [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2-3): 161-169
- [8] 刘梓圣, 张冬梅. 软土盾构隧道芳纶布加固机理和效果研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 155-160. (Liu Zisheng, Zhang Dongmei. The mechanism and effects of arfp reinforcement for a shield tunnel in soft soil [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 155-160. (in Chinese))
- [9] 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): 2300-2306. (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): 2300-2306. (in Chinese))
- [10] 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. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131-137. (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): 131-137. (in Chinese))
- [11] 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): 128-137. (Bi Xiangli, Liu Xian, Wang Xiuzhi, et al. Full-scale experimental study on the ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by steel plate [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 128-137. (in Chinese))
- [12] Chang C T, Wang M J, Chang C T, et al. Repair of displaced shield tunnel of the Taipei rapid transit system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 167-173
- [13] Kiriya K, Takeuchi T. Structure and construction examples of tunnel reinforcement method using thin steel panels [J]. Nippon Steel Technical Report, 2005(92): 45-50, (in Japanese))
- [14] 姚宪平, 许宝根, 张超, 等. 一种复合腔体构件[P]. 中国专利: 102536260. 2012-07-04. (Yao Xianping, Xu Baogen, Zhang Chao, et al. A kind of composite component [P]. China Patent: 102536260. 2012-07-04. (in Chinese))
- [15] 万敏. 复合材料叠合衬砌加固管片接头抗负弯矩试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 8(增2): 75-80. (Wan Min. Experimental study on flexural behavior of segment joints strengthened with high strength fibre and mortar-filled steel tubes composite lining under negative moment [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Supp.2): 75-80. (in Chinese))
- [16] Li X J, Yan Z G, Wang Z, et al. Experimental and analytical study on longitudinal joint opening of concrete segmental lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46: 52-63.