

盾构法施工隧道加固所用复合腔体接头构件的抗弯性能试验

殷瑞忠¹ 曹伟飏² 柳 献³ 乔小雷¹ 沈张勇² 张 磊³ 刘旭阳²

(1. 南京地铁运营有限责任公司, 210008, 南京; 2. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对盾构法施工隧道加固所用复合腔体接头处易脱开并引起复合腔体剥离破坏的问题, 设计新型复合腔体接头进行抗弯试验, 研究其不同工况下的破坏过程、极限承载力及刚度, 并与复合腔体本体的抗弯性能进行对比。研究发现: 新型复合腔体接头构件进入塑性阶段的标志为复合腔体与接头盖板的侧边胶水失效; 负弯矩工况下的接头构件抗弯性能较弱, 复合腔体接头应避免布置于隧道的负弯矩区; 复合腔体接头构件的抗弯承载力与刚度均弱于本体, 接头构件宜布置于隧道结构反弯点处。经隧道整环试验验证, 新型复合腔体接头处无脱开现象。

关键词 盾构法; 隧道加固; 复合腔体; 接头; 抗弯性能

中图分类号 U457+.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.025

Flexural Behavior Experiment of Shield Construction Tunnel Filament Wound Profile Joints

YIN Ruizhong, CAO Weibiao, LIU Xian, QIAO Xiaolei, SHEN Zhangyong, ZHANG Lei, LIU Xuyang

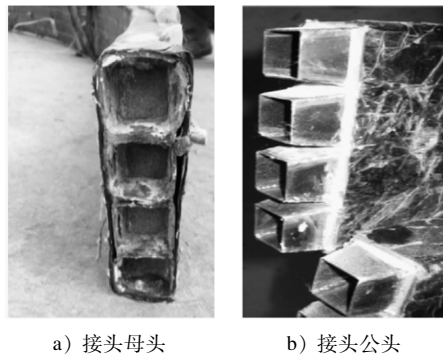
Abstract Targeting the problem of joint prone to break off, leading to stripping damage of FWP (filament wound profile) joints, flexural behavior experiment is carried out on a newly designed FWP joint. The damage process under different working conditions, maximum bearing capacity and stiffness are studied, and are compared with the flexural behavior of FWP itself. Research discovers that the sign of new FWP joint entering plastic stage is the side bond failure between FWPs and steel plate. Under negative bending moment condition, the joint flexural behavior performance is weak, hence the FWP joint should not be arranged in the negative bending moment area of the tunnel. The flexural capacity and stiffness of joints alone are weaker than that of FWPs, so joints should be placed at the reverse bending point of the tunnel structure. The new joint is successfully applied and no break-off cases detected in tunnel lining ring test.

Key words shield method; tunnel reinforcement; FWP (filament wound profile); joint; flexural behavior

First-author's address Nanjing Metro Operation Co., Ltd., 210008, Nanjing, China

目前, 盾构法施工地铁隧道(以下简为“盾构隧道”)结构常见病害中, 管片径向收敛变形可能会严重影响地铁的运营安全^[1]。对此, 目前主要采用钢板加固方法^[2-4]、复合腔体加固方法^[5-6]和钢板混凝土加固方法^[7-8]来提升隧道结构的刚度和承载能力, 减少径向变形的出现。

复合腔体构件自重较轻, 其采用节段式拼装的施工方式, 不需要机械臂的辅助, 可在抢险工作中大范围同时开展, 施工效率较高。在实际施工中, 复合腔体为分段加固, 顶部复合腔体与腰部复合腔体在圆心角 50°和 310°附近位置采用内插式接头进行连接。复合腔体内承插接头见图 1。



a) 接头母头 b) 接头公头

图 1 复合腔体内承插接头

Fig.1 FWP joint

已有足尺试验研究^[6]发现, 加固盾构隧道在加载至极限状态时, 作为加固材料的复合腔体会发生接头突然弹出的破坏现象(见图 2), 入侵结构限界, 且其为脆性破坏。此破坏将严重影响地铁的修复

和运行。针对复合腔体接头弹出的问题,本文将设计新型的复合腔体接头并以实际加固工况为背景,对新型复合腔体接头构件进行抗弯性能试验,并对其破坏模式和抗弯性能进行分析。



图 2 复合腔体接头处弹出
Fig. 2 Disengagement of FWP joints

1 试验方案

如图 3 所示,新型复合腔体接头由接头连接复合钢管和 16 mm 厚 Q345 接头盖板组成。首先,在左侧复合腔体一端安装 4 根接头连接钢管;随后插入右侧复合腔体腔内顶紧;并将钢接头盖板安装在 2 根复合腔体接头中央;最后,用 $\phi 16$ mm 高强螺栓旋入预留的螺栓孔内进行定位和固定。

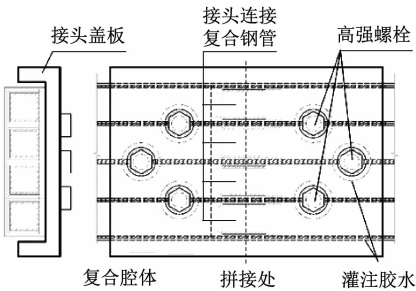
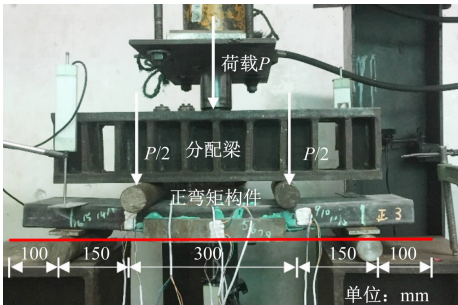


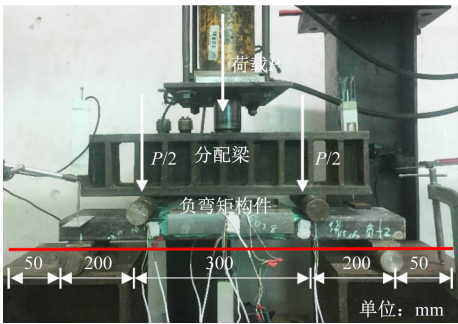
图 3 复合腔体接头细部构造
Fig. 3 Structure details of FWP joint

复合腔体构件抗弯性能试验采用千斤顶分配梁系统,以静力加载对试件进行四点抗弯试验,并采用力传感器量测千斤顶的加载值 P 。试验使用的简支梁一端为铰接支承,另一端为滚动支承。试验加载设置如图 4 所示:在正弯矩工况下,接头盖板侧受拉;在负弯矩工况下,复合腔体拼接处受拉。

试验通过位移计和应变片分别采集试件的位移及应变。应变片布置于试件上下表面及试件单侧的侧边(如图 5 所示),位移计布置于支座两端以及跨中。



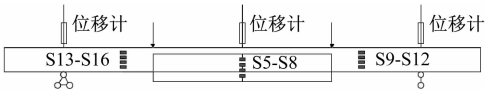
a) 正弯矩工况(接头盖板受拉)



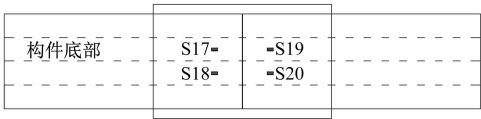
b) 负弯矩工况(接头盖板受压)

图 4 静力加载试验设置示意图

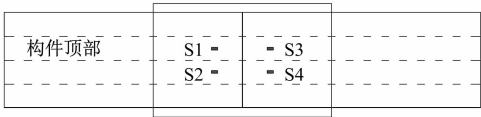
Fig. 4 Diagram of static loading test setting



a) 侧边



b) 构件底部



c) 构件顶部

图 5 应变片和位移计布置

Fig. 5 Arrangement of strain gauges and displacement meter

2 试验结果及分析

2.1 正弯矩工况

正弯矩工况弹性阶段,接头盖板通过连接螺栓与复合腔体共同承担外部荷载;构件跨中的挠度随着荷载的增加而增加;此时接头盖板受拉,复合腔体接缝受压。

当荷载达到 190 kN 左右时,接头盖板与复合腔体侧边的胶水失效,构件进入塑性状态。此时接头盖板与复合腔体共同作用的效果减弱,复合腔体本

体侧边应变发生突变。典型应变数据如图 6 所示。

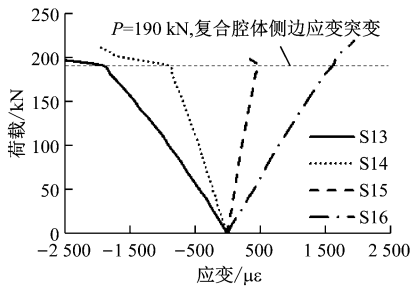


图 6 复合腔体试件侧边应变

Fig. 6 Test specimen side strains of FWPs

当荷载达到 215.67 kN 左右时,接头盖板与复合腔体侧边和顶面的胶水失效,构件抗弯刚度迅速下降,位移不断增大,复合腔体与接头盖板通过螺栓的连接保持共同作用。当荷载达到 250 kN 左右时,连接螺栓脱开,复合腔体与接头盖板连接失效,接头构造失效。构件荷载位移曲线如图 7 所示,破坏构件如图 8 所示。

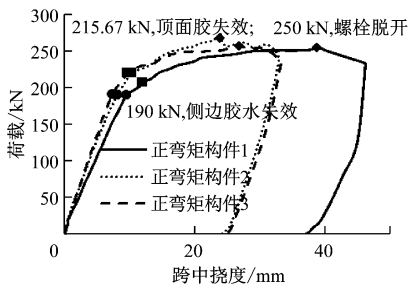


图 7 正弯矩工况下构件的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curve of joint under positive bending moment working condition

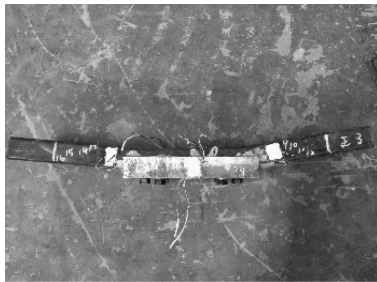


图 8 正弯矩工况构件最终破坏形态

Fig. 8 Joint ultimate failure mode under positive bending moment working condition

2.2 负弯矩工况

负弯矩工况弹性阶段,接头盖板通过连接螺栓和胶水同复合腔体连接,共同承担外部荷载;构件跨中挠度随着荷载的增加而增加,接头盖板受压,

复合腔体接缝处受拉。

当荷载达到 50 kN 左右时,复合腔体接缝受拉导致密封胶失效,插入复合腔体内的复合钢管脱开,钢板应变发生波动(见图 9);此后,复合腔体依靠侧边和顶部的胶水同接头盖板粘结为整体共同承载,其位移随着荷载的增大而增加;当荷载增至 150 kN 之后,接头盖板与复合腔体的侧边胶水逐渐失效,构件抗弯刚度下降,复合腔体与接头盖板通过顶部胶水和螺栓连接,共同承担外部荷载;当荷载达到 200 kN 左右时,接头盖板与复合腔体顶部的胶水失效,接头盖板受压屈服,接头构造失效。负弯矩工况下试验构件的荷载位移曲线如图 10 所示。负弯矩工况下的复合腔体最终破坏形态见图 11。

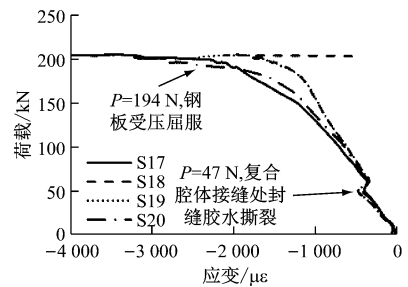


图 9 接头盖板应变

Fig. 9 Strains of joint steel plate

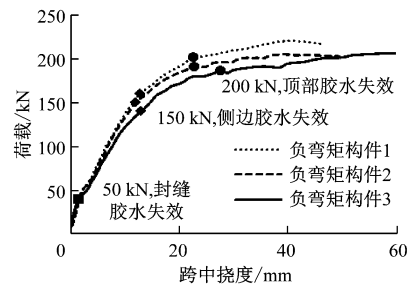


图 10 负弯矩工况下荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curve under negative bending moment working condition

2.3 不同工况的试验结果对比

2.3.1 接头破坏形式对比

在正负弯矩作用下,复合腔体接头构件的破坏形式不同,对比如表 1 所示。

由表 1 可知,在正负弯矩工况下,复合腔体接头构件进入塑性状态的标志为复合腔体与接头盖板侧边胶水失效。

2.3.2 正负弯矩工况下的构件抗弯性能对比

在正弯矩工况下,接头盖板与复合腔体侧边胶水失效,结构进入塑性阶段,此时荷载为 190 kN。

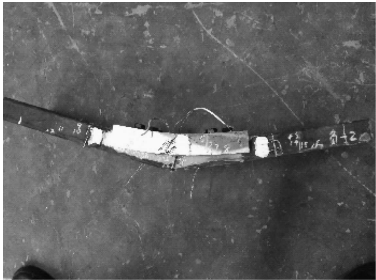


图 11 负弯矩工况构件最终破坏形态

Fig. 11 Segment ultimate failure mode under negative bending moment working condition

表 1 正负弯矩工况下的破坏形式对比
Tab.1 Comparison of failure mode between positive and negative bending mornent working condition

	正弯矩	负弯矩
弹性极限	接头盖板与复合腔体侧边胶水失效	接头盖板与复合腔体侧边的胶水失效
塑性极限	螺栓与复合腔体脱开	接头盖板与复合腔体间顶部的胶水失效

当构件与螺栓脱开时,构件失效,塑性极限荷载为 257.67 kN。在负弯矩工况下,接头盖板与复合腔体侧边胶水撕裂,结构达到弹性极限状态,进入塑性状态,此时荷载为 150 kN,弹性极限荷载为正弯矩工况下的 79.12%。当构件与接头盖板顶部胶水失效时,结构达到塑性极限状态,构件失效,此时荷载为 194 kN,塑性极限荷载为正弯矩工况下的 75.29%。不同工况下试验构件的弹性抗弯刚度见

表 3 复合腔体本体与接头的性能参数

Tab.3 Performance parameter comparison between FWP and joint				
项目	弹性极限荷载/kN	塑性极限荷载/kN	弹性阶段位移/mm	弹性阶段抗弯刚度/(kN/mm)
本体性能参数	329.50	329.50	6.23	52.89
接头性能参数	190.00	257.00	8.35	30.77

注:接头性能参数为正弯矩工况下的数据。

表 4 复合腔体接头性能参数系数

Tab.4 Performance parameter coefficients of FWP and joint	
工况	接头性能参数系数/%
弹性极限荷载	57.66
塑性极限荷载	78.00
弹性阶段位移	134.08
弹性阶段抗弯刚度	58.17

注:接头性能参数系数=(接头性能参数/本体性能参数)×100%。

表 2。由表 2 可知,正弯矩作用下构件的平均弹性抗弯刚度为 23 kN/mm,负弯矩作用下构件的平均弹性抗弯刚度为 11.97 kN/mm,正弯矩工况下构件弹性抗弯刚度是负弯矩工况下构件的 1.97 倍。

表 2 弹性阶段抗弯刚度

Tab.2 Elastic stage flexural behavior stiffness		
构件编号	弹性抗弯刚度/(kN/mm)	
	正弯矩工况	负弯矩工况
1	19.97	12.50
2	23.30	12.51
3	25.72	10.90

根据接头构造抗弯性能特点,将复合腔体接头布置在盾构隧道的正弯矩区更有利于发挥其抗弯性能。故与复合腔体本体性能对比中以正弯矩工况为主。

2.4 复合腔体本体与接头抗弯性能对比

复合腔体与接头抗弯试验荷载位移曲线对比见图 12。由图 12 可知,与复合腔体本体相比,复合腔体接头的弹性阶段抗弯刚度较低、延性更好,抗弯承载力较低。详细性能参数对比见表 3。接头性能参数系数见表 4。

由于接头的极限承载力及刚度均弱于复合腔体本体,故实际施工中应将接头布置在隧道结构反弯点处,使其承担较小的弯矩。

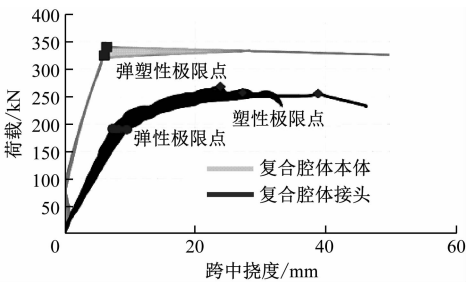


图 12 本体与正弯矩接头荷载位移曲线

Fig. 12 Load-deflection curve of FWP and joint

3 整环试验中的接头构件应用

在整环试验中,将新型接头构件布置于整环结构的两侧肩部反弯点区,如图 13 所示。当整环加固结构加载至塑性极限状态后,复合腔体与管片顶部的界面粘结失效,结构位移不断增大。此过程中,接头无弹出破坏,说明优化后的复合腔体接头构件设计合理有效。

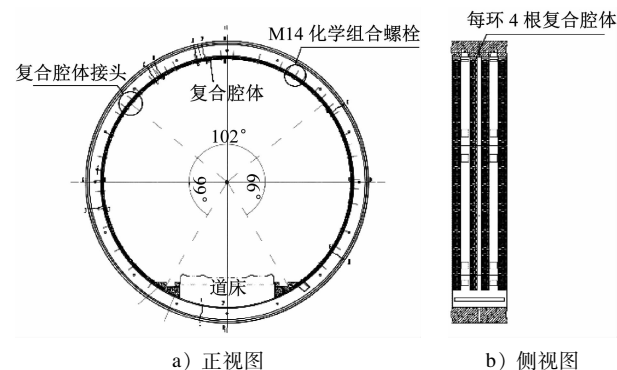


图 13 整环试验中复合腔体接头布置位置示意

Fig. 13 Arrangement of FWP joints in lining ring test (tunnel forward direction as baseline, left side as front view, right side as side view)

4 结语

本文对盾构隧道加固所用新型复合腔体接头进行抗弯性能试验,主要得到以下结论:

1) 在正弯矩工况下,构件失效的标志为复合腔体与接头盖板间连接螺栓脱开;在负弯矩工况下,构件失效的标志是钢板与复合腔体顶部的胶水失效。正负弯矩工况下进入塑性阶段的关键点为复合腔体与接头盖板侧边胶水失效。

2) 负弯矩工况下塑性极限荷载为正弯矩工况下塑性极限荷载的 75.29%。正弯矩工况下构件弹性抗弯刚度是负弯矩工况下构件弹性抗弯刚度的 1.97 倍,因此接头构件应避免布置于负弯矩区。

3) 正弯矩工况下复合腔体接头构件的抗弯弹性极限荷载为本体抗弯弹性极限荷载的 57.66%,塑性极限荷载为本体塑性极限荷载的 78%,弹性抗弯刚度为本体弹性抗弯刚度的 58.17%;接头构件相对复合腔体本体抗弯承载力较低,刚度较小。

4) 接头构件的极限承载力和抗弯刚度均弱于复合腔体本体,建议将接头构件布置在隧道结构反弯点处,使其位于弯矩小、轴力大的截面,由二次加固的复合腔体与管片共同作用承担小弯矩、大轴力的截面内力。

采用新型接头的复合腔体已成功应用于南京地铁 2 号线盾构隧道加固试验。在该试验中,加载至塑性极限状态后,无接头处复合腔体弹出现象发生。试验证明,新型复合腔体接头能有效连接复合腔体,可保证节段式拼装质量,且极限状态下无接头弹出破坏。

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. Structure safety analysis of Shanghai rail transit tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(4): 37.
- [2] LIU X, JIANG Z, 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.
- [3] 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(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(3): 131.
- [4] 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(11): 2300.
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(11): 2300.
- [5] 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(2): 376.
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(2): 376.
- [6] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015(7): 52.
LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of shield tunnel composite cavity reinforcement[J]. Urban Mass Transit, 2015(7): 52.
- [7] ZHANG J L, LIU X, REN T Y, et al. Structural behavior of reinforced concrete segments of tunnel linings strengthened by a steel-concrete composite[J]. Composites Part B, 2019, 178: 107444.
- [8] 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(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(1): 128.

(收稿日期: 2020-04-22)