

# 地铁盾构隧道复合腔体构件性能试验研究

邓世舜<sup>1</sup> 沈张勇<sup>2</sup> 柳 献<sup>3</sup> 许 文<sup>1</sup> 曹伟飏<sup>2</sup> 张 磊<sup>3</sup> 刘旭阳<sup>2</sup>

(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** 复合腔体是一种新型的加固盾构隧道的结构材料, 它能够为隧道结构提供额外的承载力, 控制结构变形。对灌浆复合腔体、空腔复合腔体和空腔钢管的抗弯、抗压性能进行研究。分析了复合腔体抗压和抗弯的破坏机理, 得到其受压承载力、受弯承载力和刚度的变化规律。结果表明, 外层碳纤维间断裂为复合腔体构件丧失抗压、抗弯承载能力的标志; 碳纤维材料的约束作用显著提高了试件的截面抗弯刚度和承载能力, 但降低了构件的延性, 砂浆材料显著提高了试件的抗压承载能力; 碳纤维、砂浆、钢管三者共同作用效果欠佳, 模拟中需考虑三者材料间的滑移。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 复合腔体构件; 性能试验

**中图分类号** U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.007

## Experimental Study on the Mechanical Performance of Metro Shield Tunnel Filament Wound Profile

DENG Shishun, SHEN Zhangyong, LIU Xian, XU Wen, CAO Weibiao, ZHANG Lei, LIU Xuyang

**Abstract** Filament wound profile (FWP) is a new type of structure material for reinforcing shield tunnel, which provides additional bearing capacity for the tunnel structure, managing structure deformation. Compressive tests and bending tests of grouted FWP, non-grouted FWP, and integrated steel tubes are carried out and studied. The destruction mechanism of FWP bearing and bending capacities is analyzed. The changing pattern of their bearing capacities and bending stiffness are determined. Results show that the tearing of the carbon fibers is a sign of bearing and bending capacities failure of FWP. The carbon fibers significantly improve both the bearing capacities and bending stiffnesses of the specimens but reduce the ductility. The mortar significantly improves the bearing capacities of the specimens. The mutual effect of carbon fibers, mortar and steel tubes is under expectation, so slipping among the three types of material should be considered in simulation.

**Key words** metro; shield tunnel; FWP (filament wound profile); performance test

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

地铁盾构隧道在长期的自然环境和环境使用环境的双重作用下, 日常检测中发现的隧道病害逐渐增多。通过长期监测和调研, 隧道结构常见病害主要表现为渗漏水、结构裂缝及损坏、隧道纵向沉降及管径环向收敛变形等<sup>[1]</sup>。其中, 隧道过大的纵向和横向变形是危及结构安全的重要病害之一<sup>[2]</sup>。

针对盾构隧道结构的整体大变形, 目前采用钢板加固较多<sup>[3-4]</sup>, 即将加固材料粘贴在管片结构内部, 对其进行后期补强, 以控制结构的后续变形和承载能力。钢板加固盾构隧道的施工方法因补强钢板自重较大, 施工需要台车协助, 无法同时大范围进行抢险加固; 而复合腔体加固方式是将复合腔体构件与既有盾构隧道衬砌通过特殊工艺叠合, 自重较轻, 可同时大范围进行抢险加固。

复合腔体构件采用在建筑结构中使用的 CFRP (碳纤维增强基复合材料) 包裹钢管混凝土形成的构件<sup>[5]</sup>。其中, 钢材作为混凝土的外侧配筋; CFRP 通过约束钢管混凝土, 有效延缓钢管的局部屈曲, 提高其承载力和耐久性; CFRP 与钢管的组合可弥补混凝土的延性。目前, 针对 CFRP 约束方钢管, 文献<sup>[6-10]</sup>通过试验对构件在受压和受弯、剪切及扭转等工况下的破坏模式和工作机理进行了研究, 并建立起相应的数值模型, 拟合出 CFRP-方钢复合管受压、受弯, 以及长柱受压、压弯承载力的计算表达式。复合腔体结构构件参考建筑结构中的 CFRP 约束方钢管形式, 根据隧道的限界要求改变构件截面形式, 将多根方管组合形成多腔钢管并外包 CFRP, 采用压力注浆的形式将砂浆灌入而成。

文献<sup>[11-12]</sup>采用足尺试验的方法对复合腔体加固盾构隧道整环极限承载力和纵缝接头的力学特性进行了研究, 并对照试验建立了模拟盾构隧道

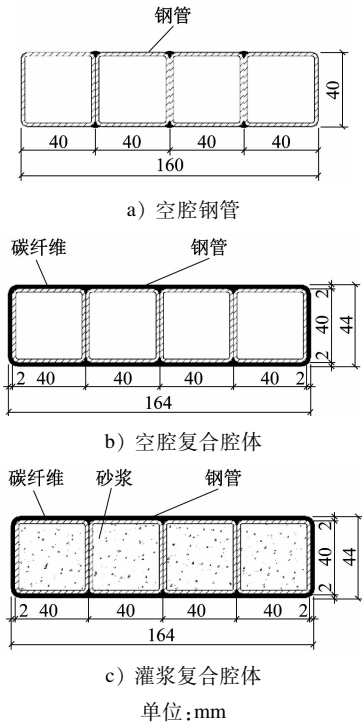
加固工况的非线性叠合模型<sup>[13]</sup>,分析了加固后叠合结构的破坏机理,为工程的实践运用提供了理论依据。

目前有关复合腔体本体压、弯、剪、扭的试验研究较少。基于此研究现状,本文对复合腔体本体的受压、受弯性能开展试验研究,研究了其破坏形态、荷载响应曲线特点,以及 3 种材料对承载力和刚度的影响,为依据盾构隧道加固要求合理设计复合腔体提供依据。

## 1 地铁盾构隧道复合腔体构件性能试验方案

### 1.1 复合腔体构件加载设计

方管间点焊后对其表面进行除锈、热处理喷砂,形成空腔钢管(见图 1 a))。钢管表面涂刷环氧树脂,并采用碳纤维包裹,将其放入高压固化炉通过真空高压将碳纤维层固化,形成图 1 b)所示的 B 组试件。对 B 组试件进行压力注浆,形成灌浆复合腔体(见图 1 c))。



注:抗压试件长 100 mm,抗弯试件长 800 mm;抗压试件代号为 A、B 和 C,对应的抗弯试件代号为 a、b 和 c。

图 1 复合腔体试件结构尺寸

Fig.1 Structure size of FWP specimens

灌浆复合腔体的钢管材料为 Q420,单层碳纤维的抗拉强度为 2 ~ 4 GPa,弹性模量为 235 GPa。复

合腔体由 3 层横向包裹和 6 层竖向包裹的碳纤维构成,碳纤维每层厚度为 0.2 mm,碳纤维与钢管的胶结厚度为 0.2 mm,故复合腔体总厚度为 2 mm。砂浆为高性能自流平砂浆,强度为 50 MPa,采用压力注浆的形式灌入腔体内。

复合腔体构件抗压试验采用静力加载方法,采用 200 t 万能试验机施加荷载。其轴压试验加载示意如图 2 所示。

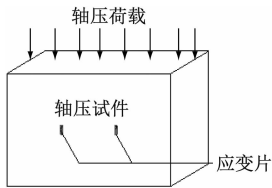


图 2 复合腔体构件轴压试验加载示意图  
Fig.2 Loading diagram of FWP axial compression test

复合腔体构件抗弯试验采用 4 点抗弯加载。该试件的约束采用简支梁,一端为铰接支承,另一端为滚动支撑,如图 3 所示。

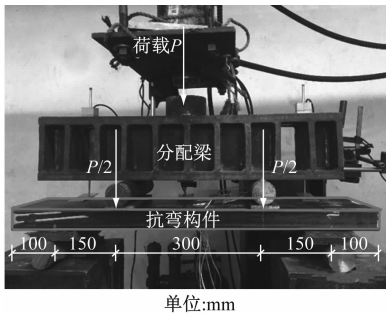


图 3 复合腔体构件抗弯试验加载图  
Fig.3 Loading diagram of FWP bending test

### 1.2 复合腔体构件性能试验方案

复合腔体构件抗压试验中,试件每侧取 4 个测点,即正、反两面各 2 个,其位置为长度方向中线的 3 等分点。采用实验仪器自动采集测点位移值。应变片布置如图 4 所示。

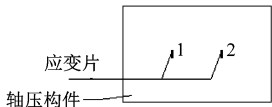


图 4 复合腔体构件抗压试验测点布置  
Fig.4 Measuring points layout of FWP compression test

在复合腔体抗弯试件上、下表面共布置 4 个应变片;考虑到钢管的焊接位置,试件上、下表面的应变片布置在截面宽度方向中线两侧,分别距中线 20 mm;试件侧面布置 3 个应变片,位于试件长度方向

的中线位置;将试件高度进行 4 等分,每隔 10 mm 粘贴 1 个应变片。应变片及位移计布置如图 5 所示。

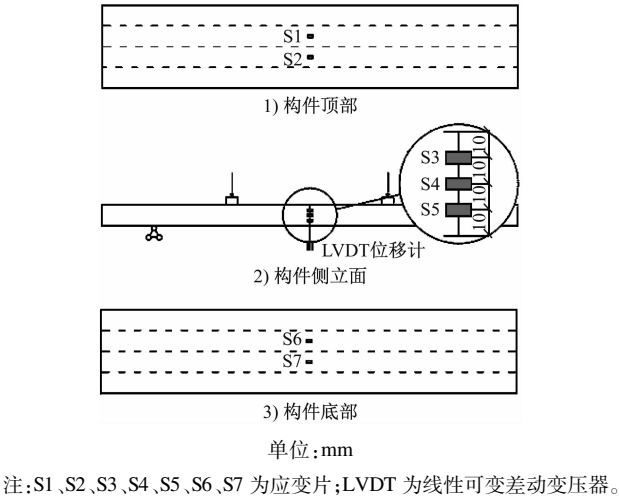


图 5 复合腔体构件应变片及 LVDT 位移计布置

Fig. 5 Layout of strain gages of FWP side elevation and LVDT displacement meter

## 2 复合腔体构件性能试验结果

### 2.1 复合腔体构件抗压试验

在抗压试验中,选取 A、B、C 3 组试件,且每组包括 3 个相同的试件。

#### 2.1.1 复合腔体构件的破坏现象

A 组空腔钢管在荷载作用下,其变形随着荷载的增加呈线性增加,当达到极限荷载时,空腔钢管发生局部鼓胀,钢管局部失稳(见图 6)。

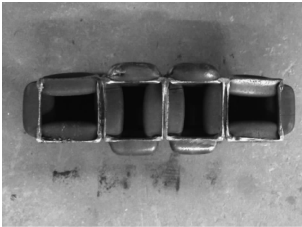


图 6 A 组试件破坏模式

Fig. 6 Failure mode of a specimen of group A

B 组空腔复合腔体在荷载作用下,其变形随着荷载的增加亦呈线性增加,即将达到极限荷载时,构件受压发出“嘶嘶”声,钢管与碳纤维布粘结的胶层发生破损,构件的抗压刚度开始降低;当达到极限荷载时,空腔钢管发生局部鼓胀,且局部产生失稳,包裹的碳纤维布无法限制钢管局部的鼓胀(见图 7)。

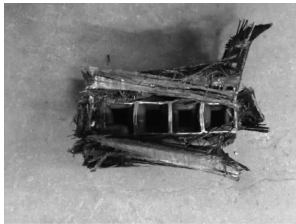


图 7 B 组试件破坏模式

Fig. 7 Failure mode of a specimen of group B

C 组灌浆复合腔体在荷载作用下,其变形随着荷载的增加呈线性增加,当荷载达到 800 kN 时,构件受压发出轻微剥离响声;当荷载达到 1 000 kN 时,构件发出大量“嘶嘶”响声,粘结的胶层发生破损,构件的抗压刚度开始降低,当达到极限荷载时,构件发生局部鼓胀,且局部产生失稳,包裹的碳纤维布无法限制其局部的鼓胀,导致碳纤维撕裂(见图 8)。

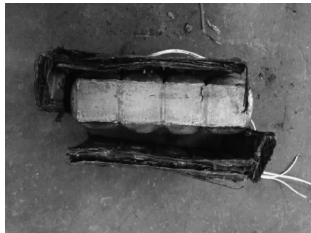


图 8 C 组试件破坏模式

Fig. 8 Failure mode of a specimen of group C

#### 2.1.2 复合腔体构件的抗压性能

空腔钢管、空腔复合腔体、灌浆复合腔体构件试验结果如表 1 所示。

表 1 复合腔体构件抗压试验结果		
Tab. 1 Test results of FWP compressive bearing capacities		
试件编号	抗压极限承载力/kN	有效位移/mm
A1	718. 01	4. 16
A2	815. 16	3. 29
A3	664. 12	4. 20
B1	822. 24	3. 35
B2	942. 28	6. 42
B3	967. 47	5. 17
C1	1 492. 49	0. 38
C2	1 291. 60	0. 36
C3	1 459. 67	1. 01

由表 1 可见,空腔复合腔体的抗压极限承载力相对于空腔钢管提高了 24. 33%,可见碳纤维的约

束作用使得构件的极限承载力得到提高;灌浆复合腔体的抗压极限承载力相对于空腔复合腔体提高了 55.33%。

试件中,钢管的截面积为 1 216 mm<sup>2</sup>;钢材选取 Q420,屈服强度为 420 MPa,极限抗压强度为 520 ~ 680 MPa,理论屈服承载力为 510 kN,理论抗压极限承载力为 632 ~ 826 kN;砂浆的理论强度为 50 MPa,理论极限强度为 259.2 kN。假设砂浆与钢材同时达到极限强度,理论极限抗压强度为 891 ~ 1 059 kN。

### 2.2 复合腔体构件抗弯试验

在抗弯试验中,选取 a、b、c 3 组试件,且每组包括 3 个相同的试件。

#### 2.2.1 复合腔体构件的破坏现象

a 组试件在破坏前未产生明显的声响,其跨中位移随着荷载的增加逐步上升。当加载至试件极限承载力后其位移剧烈增长,试件受压接触部位出现钢管局部失稳,且其侧面产生鼓曲的延性破坏(见图 9)。

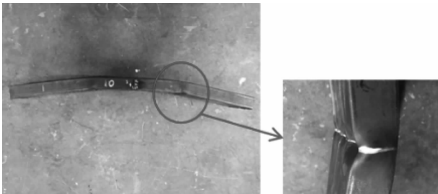


图 9 a 组试件抗弯破坏模式

Fig. 9 Bending failure mode of a specimen of group a

b 组试件在破坏前未产生明显的声响,其跨中位移随着荷载的增加逐步上升。在试件接近极限承载力前,试件发出轻微“嘶嘶”的响声,这是碳纤维层纤维间撕裂造成的。继续对试件加载极限荷载后,其位移剧烈增长。试件在受压位置处钢管局部产生失稳,且其侧面产生鼓曲,这是由于碳纤维布限制了钢管局部失稳,钢管局部鼓胀导致碳纤维布纤维间撕裂(见图 10)。

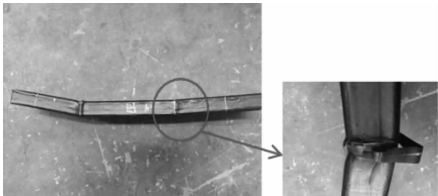


图 10 b 组试件抗弯破坏模式

Fig. 10 Bending failure mode of a specimen of group b

c 组试件在破坏前未产生任何现象,其跨中位

移随着荷载的增加逐步上升。在接近极限荷载时,试件发出轻微“嘶嘶”的响声,这是由碳纤维布在构件受压区撕裂造成的。当加载至极限荷载后试件突然破坏。试件最终在受压位置处产生钢管局部失稳,其侧面产生鼓曲,这是由于碳纤维布限制试件的局部失稳,并发生胶层破坏,表面碳纤维布纤维间撕裂造成的(见图 11)。

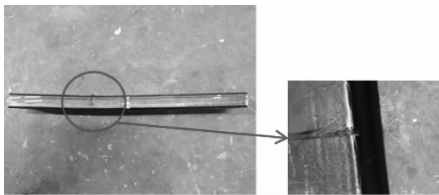


图 11 c 组试件抗弯破坏模式

Fig. 11 Bending failure mode of a specimen of group c

#### 2.2.2 复合腔体构件的抗弯性能

##### 2.2.2.1 抗弯极限承载力

不同类型试验构件跨中截面的极限弯矩及抗弯极限承载力见表 2。

表 2 构件跨中截面极限弯矩及抗弯极限承载力

Tab. 2 Ultimate bending moment and bending bearing capacities of component midspan cross section

试件编号	极限弯矩/(kNm)	抗弯极限承载力/(kNm)
a1	11.25	11.09
a2	10.98	11.09
a3	11.04	11.09
b1	21.78	21.41
b2	21.05	21.41
b3	21.39	21.41
c1	25.43	25.20
c2	24.98	25.20

由表 2 可见,空腔复合腔体和灌浆复合腔体的抗弯极限承载力分别提高了 93.0% 和 127.2%,灌浆复合腔体相对于空腔复合腔体抗弯极限承载力提高了 17.7%;包裹碳纤维后可有效提高空腔钢管的抗弯极限承载力;灌注砂浆对空腔复合腔体的抗弯极限承载力提高有限。

##### 2.2.2.2 截面抗弯刚度

试件的截面抗弯刚度为跨中弯矩和曲率的比值,其中曲率由沿试件截面高度方向的应变试验值计算得到。

弹性阶段试件的截面抗弯刚度计算结果如表 3 所示。由表 3 可见,空腔复合腔体的截面抗弯刚度

相对空腔钢管提高了 85.11%，灌浆复合腔体的截面抗弯刚度相对于空腔钢管提高了 94.75%，灌浆复合腔体的截面抗弯刚度相对空腔复合腔体提高了 5.21%。

表 3 弹性阶段复合腔体构件的截面抗弯刚度

Tab. 3 Bending stiffness of FWP cross section at elastic stage

试件编号	截面抗弯刚度平均值/(10 <sup>10</sup> kNm <sup>2</sup> )
a	6.29
b	11.60
c	12.30

3 复合腔体构件理论计算结果与分析

3.1 复合腔体构件破坏模式分析

空腔复合腔体与灌浆复合腔体的抗压破坏过程均为碳纤维无法限制钢管的局部鼓胀，导致碳纤维布纤维间的断裂。

从荷载-位移曲线的斜率可知，空腔复合腔体的截面抗弯刚度较空腔钢管要高，灌浆复合腔体的截面抗弯刚度与空腔复合腔体的截面抗弯刚度在弹性阶段基本相同，碳纤维可有效提高构件的截面抗弯刚度，砂浆对复合腔体截面抗弯刚度的提高作用不明显。灌浆复合腔体达到极限荷载后，其受弯破坏过程无塑性阶段，其抗弯破坏模式为脆性破坏。各组试件的荷载-位移曲线见图 12。

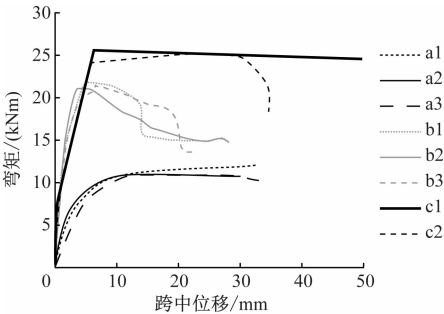


图 12 复合腔体构件荷载-跨中位移曲线  
Fig. 12 Curve of FWP load-midspan displacement

从试件弯矩-曲率曲线的斜率，即截面抗弯刚度的变化率可定性衡量该试件的延性，见图 13，空腔钢管破坏存在明显的弹塑性阶段，空腔复合腔体与灌浆复合腔体在破坏前的弯矩-曲率曲线的斜率基本无变化。空腔复合腔体和灌浆复合腔体的延性弱于空腔钢管试件的延性，究其原因在于构件的破坏形式发生变化，由钢管局部屈曲变为外包碳纤维

的纤维间绷断，砂浆材料的加入对试件延性的影响不明显。

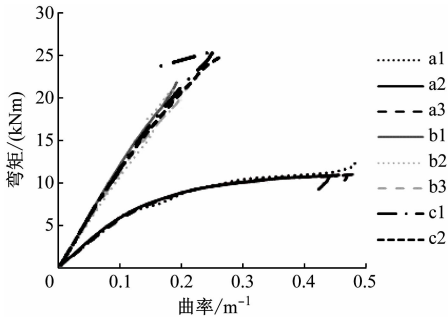


图 13 复合腔体构件弯矩-曲率曲线  
Fig. 13 FWP bending moment-curvature curves

3.2 复合腔体构件抗压极限承载力理论值与试验值对比

试件抗压极限承载力的理论值与试验值对比见表 4，不考虑碳纤维的受压性能。

表 4 复合腔体抗压极限承载力理论值与试验值对比

Tab. 4 Comparison between theoretical and experimental values of FWP compressive ultimate bearing capacity

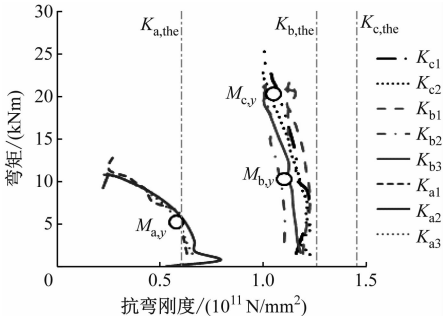
试件类型	抗压极限承载力/kN	
	理论值	试验值
A	632 ~ 826	732.43
B	632 ~ 826	910.66
C	891 ~ 1 059	1 414.59

由表 4 可知，在碳纤维包裹下，空腔复合腔体抗压极限承载力的试验值相对于其理论值提高了 10.24%，灌浆复合腔体的抗压极限承载力的试验值相对于其理论值提高了 33.58%。由此可见，碳纤维的约束作用使得钢管和砂浆的抗压极限承载力大幅提高。

在平截面假定及材料间完美共同作用假定的前提下，根据材料的弹性模量按照等面积法计算截面的抗弯刚度，其理论值与试验值对比见图 14。空腔钢管弯矩达到 6 kNm 后，钢板屈服，截面抗弯刚度呈下降趋势。空腔复合腔体和灌浆复合腔体的截面抗弯刚度基本不变，且其破坏时截面未屈服。

复合腔体构件弹性阶段截面抗弯刚度试验值与理论值对比见表 5。由表 5 可知，a 组试件的截面抗弯刚度试验值大于理论值，4 根钢管焊接后的共同作用效果好；b、c 组试件的截面抗弯刚度试验值均小于理论值，碳纤维、砂浆和钢管三者结合不能

完美共同作用,后续模型研究中需考虑材料间的滑移。



注:  $K_{a,the}$ 、 $K_{b,the}$  和  $K_{c,the}$  为抗弯屈服弯矩;  $M_{a,y}$ 、 $M_{b,y}$  和  $M_{c,y}$  为截面抗弯刚度理论值;  $K_a$ 、 $K_b$  和  $K_c$  为截面抗弯刚度试验值; ○代表截面理论屈服弯矩。

图 14 复合腔体构件截面抗弯刚度-弯矩曲线  
Fig. 14 Curve of bending stiffness-bending moment of FWP cross section

表 5 复合腔体构件截面抗弯刚度平均值  
Tab. 5 Average value of bending stiffness of FWP cross section

试件类型	截面抗弯刚度平均值/( $\text{kNm}^2$ )		
	试验值	理论值	试验值与理论值的差值
a	$6.29 \times 10^{10}$	$6.05 \times 10^{10}$	$0.24 \times 10^{11}$
b	$1.16 \times 10^{11}$	$1.26 \times 10^{11}$	$-0.10 \times 10^{11}$
c	$1.23 \times 10^{11}$	$1.45 \times 10^{11}$	$-0.22 \times 10^{11}$

3.3 复合腔体材料作用机制

在碳纤维包裹下,相对于空腔钢管,空腔复合腔体的抗压极限承载力提高了 24.33%,抗弯极限承载力提高了 93.00%;相对于未灌浆的复合腔体,灌浆复合腔体的抗压极限承载力提高了 55.33%,抗弯极限承载力提高了 17.70%。根据构件抗压极限承载力理论值与试验值的对比,碳纤维的包裹作用能有效提高构件的受压性能。

碳纤维主要提高复合腔体的截面抗弯性能,碳纤维的包裹作用提高构件的受压性能;砂浆主要提高构件的抗压性能。

4 结论

1) 在抗压试验中,复合腔体受压破坏模式为钢管发生局部鼓胀,碳纤维无法限制其变形,纤维间发生断裂。

2) 在抗弯试验中,复合腔体的截面抗弯刚度随着荷载增加而降低。空腔钢管加载位置处发生局部屈曲,管壁鼓胀。空腔复合腔体和灌浆复合腔体

的抗弯破坏标志均为加载位置处钢管发生局部屈曲导致外层包裹碳纤维的纤维间发生断裂。

3) 复合腔体的抗压极限承载力为 1 414.59 kN,其弹性阶段的截面抗弯刚度为  $1.23 \times 10^{11} \text{ kNm}^2$ 。空腔钢管间共同作用较好,而复合腔体内的空腔钢管、碳纤维、砂浆三者未能完美共同作用。

4) 包裹碳纤维可有效提高复合腔体的抗弯极限承载力,其对钢管和砂浆的包裹作用能有效提高构件的抗压能力;灌注砂浆可提高复合腔体的抗压能力,但对抗弯极限承载力提高有限,复合腔体充分发挥了各材料的力学特性。

5) 复合腔体具有较高的抗压、抗弯承载力及截面抗弯刚度,能够有效限制盾构隧道的横向变形。后续研究将基于本文试验基础,考虑材料间的界面滑移,合理设计复合腔体的截面形式,满足盾构隧道加固的需求。

参考文献

[1] YUAN Y, JIANG X, LIU X. Predictive maintenance of shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 69.

[2] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析 [J]. 地下工程与隧道, 2009(1): 1.

WANG Rulu. Analysis of influencing factors and deformation characteristics of Shanghai soft soil railway tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009(1): 1.

[3] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, et al. Response of a Taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 167.

[4] KIRIYAMA K, KAKIZAKI M, TAKABAYASHI T, et al. Structure and construction examples of tunnel reinforcement method using thin steel panels [J]. Nippon Steel Technical Report, 2005, 92: 45.

[5] 王庆利,车媛,谭鹏宇,等. CFRP-钢管混凝土结构研究的进展与展望 [J]. 工程力学. 2010(12): 48.

WANG Qingli, CHE Yuan, TAN Pengyu, et al. Progress and prospect in research on concrete filled CFRP-steel tubular structures [J]. Engineering Mechanics, 2010(12): 48.

[6] 王庆利,车媛,叶茂. CFRP 增强方截面钢管混凝土受弯性能研究 [J]. 土木工程学报, 2011(增刊1): 17.

WANG Qingli, CHE Yuan, YE Mao. Research on flexural performances on the CFRP confined concrete filled steel tube with square cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2011(S1): 17.