

Experimental Study of the Compressive Property of Compound Cavity Axis

Wenli Shi¹, Shouchao Jiang¹, Yan Zhang², Xian Liu¹

¹School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Municipal Utilities Engineering Design and Research Institute, Shanghai
Email: shirley.zb.2008@163.com

Received: Apr. 20th, 2015; accepted: May 10th, 2015; published: May 14th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Two sets of experiments were carried out on CFRP and steel members under axial compression. The results indicated that the two sets of specimens experienced similar structural behavior under compressive loads. The CFRP spalling appeared before the yielding of steel tubes. However, due to the difference between the configuration and material of two sets of specimens, their yielded strength and ultimate load-bearing capacity differed to some extent.

Keywords

Compound Cavity, Compressive Property, Experimental Study

复合腔体轴心抗压性能试验研究

时文丽¹, 蒋首超¹, 张 衍², 柳 献¹

¹同济大学土木工程学院, 上海

²上海隧道工程股份有限公司市政公用工程设计研究院, 上海

Email: shirley.zb.2008@163.com

收稿日期: 2015年4月20日; 录用日期: 2015年5月10日; 发布日期: 2015年5月14日

摘要

本文研究了两组复合腔体试件在轴心压力作用下的性能。利用万能试验机对该复合材料进行轴心压缩试验。研究发现：在试验过程中，两组复合腔体试件的破坏过程相似，均为外裹碳纤维首先出现拉断剥离现象，其后钢管屈服。但是由于加工工艺不同导致两组试验结果的屈服荷载以及破坏荷载不同。

关键词

复合腔体，抗压性能，试验研究

1. 引言

本文研究的复合腔体材料是一种用于地铁隧道结构加固使用的矩形截面新型加固材料，其由空心钢管构成基本形状，内部灌注混凝土，钢管外部包裹碳纤维。近些年来纤维增强复合材料作为轻质、高比强度、高比模量材料在军事、航空、工业方面得到了广泛的运用[1]。关于圆筒形碳纤维增强钢管混凝土的抗压试验以及抗弯等力学性能试验之前已有过一些研究[1][2]，目前国内还没有本文矩形试件结构材性的研究。由于近些年地铁隧道的快速发展出现的一些问题，本文对提供的两种不同碳纤维加固工艺和粘结胶水材料的复合腔体试件进行轴向抗压性能试验，比较两种不同加工工艺试件的抗压承载力。A、B两组试件所用的钢材及混凝土相同，所用的粘结胶水和碳纤维加工工艺不同。试验表明，复合腔体的抗压性能比单一种材料的抗压性能提高很多，其外层纤维材料的厚度及加工工艺对复合腔体的整体抗压性能影响较大。相比较而言，B组试件的碳纤维使用方式和粘结胶水比A组试件的轴压强度高。

2. 试验设计

2.1. 试件设计

复合腔体是由混凝土、钢管、碳纤维三种材料复合而成。其截面形式为4个 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (截面长 \times 宽 \times 厚度)的钢管焊接而成，钢管空腔内部灌注混凝土，钢管外部包裹碳纤维，厚度为 t ，截面尺寸如图1所示。试验采用的复合腔体试件尺寸为 $160\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (截面长 \times 宽 \times 长度)。

2.2. 加载方案

本试验以加载力的大小控制速度，试验机最大试验力 2000 kN ，测量精度 $\leq \pm 1\%$ ；调试好试验设备后，进入正常加载状态，第一个试件加载时根据初步计算，第二个试件的加载方案根据第一个试件加载

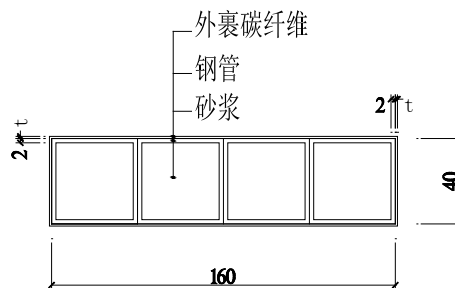


Figure 1. Sectional dimensions of the specimen

图 1. 试件截面尺寸

得到的极限值对加载方案做调整,采集加载过程中的荷载、位移、应变。加载临近最终破坏的极限承载力时以位移值控制,当试件轴向压缩位移达到变形率的 35%~39%时认为轴压试件达到破坏状态,终止试验。

2.3. 测量内容及测点布置

试验测试内容包括轴向位移和轴向应变。具体的测点布置如图 2 所示。本试验由 200 t 万能试验机设备自动采集轴向位移。轴向应变采用应变采集仪采集。本试验共布置了四个应变测点,试件正反面每侧各两个,每侧位置为长度方向中线位置的三等分点。

3. 试验分析

3.1. 材料性能指标、试件数量及编号

本试验所用的三种材料混凝土、钢管、碳纤维的各项材料性能指标如表 1 所示。本试验分别有 A、B 两组试件,其中 A、B 两组试件的碳纤维厚度取值根据实际测量确定。每组试件数量为 3 个。A、B 两组试件的编号以及试验所测值如表 2 所示。

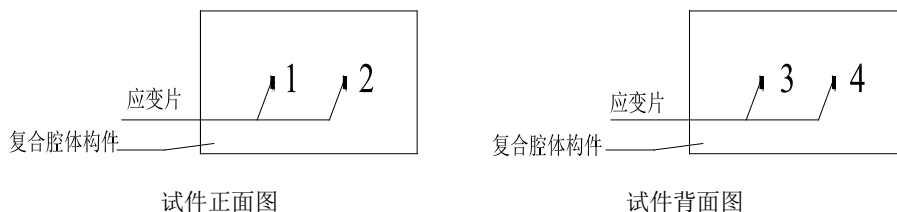


Figure 2. Diagram: position of the strain gauges
图 2. 应变片测点布置图

Table 1. Mechanical properties of the specimen
表 1. 试件所用材料性能指标

材料属性	混凝土 C60	钢材 Q235	碳纤维
弹性模量(N/mm ²)	3.6×10^4	2.06×10^5	2.3×10^5
抗压强度设计值(N/mm ²)	27.5	215	-
抗拉强度设计值(N/mm ²)	2.04	215	≥3500

Table 2. Experimental results
表 2. 试件编号及试验结果

分组	试件数量	试件编号	最大荷载值(kN)	最大位移值(mm)
A	3	C-1	1099.48	39.264
		C-2	1159.91	39.251
		C-3	1363.32	38.924
B	3	C-11	1316.91	35.457
		C-22	1493.19	39.276
		C-33	1451.01	37.367

3.2. 试验过程及现象

本试验中定义的平均应力 $\sigma = \frac{\text{轴向压力}N}{\text{构件的截面轮廓面积}A}$ 。试件上测点 1、2 同侧，测点 3、4 同侧，在

试件轴心受压过程中，当轴力增大到一定值后，混凝土受到钢管及外包碳纤维的约束，钢管混凝土向外鼓出，最终使外裹的碳纤维受拉破坏。

3.2.1. A 组试验结果

选取其中一个试件分析，如图 3 为 A 组试件 c-1 的平均应力应变曲线图，由图中可以看出，当平均应力依次达到 72 N/mm^2 、 105 N/mm^2 时，测点 3、4 处应变先后出现突变，表明该处碳纤维先出现破坏。最后测点 1、2 处的应变发生突变，表明测点 1、2 处的碳纤维基本上同时出现受拉破坏，此时对应的应力为 110.0 N/mm^2 左右，对应的外荷载值为 704.0 kN 。图 4、图 5 分别为另外两个试件加载过程中的试验现象。

由 A 组复合腔体试件轴心抗压试验结果可以看出，在轴压试验过程中，在荷载值达到 700.0 kN 左右时，外部碳纤维由于钢管混凝土的压鼓环向受拉逐步破坏。

图 6 为 A 组 3 个试件的轴向荷载位移曲线图，A 组复合腔体试件在轴向压力 $770 \text{ kN} \sim 830 \text{ kN}$ 时开始屈服，进入弹塑性阶段，此时位移为 5.8 mm 左右。由图中可以看出该复合试件本身具有很好的延性。

图 7 中 8 张图片分别为 A 组试件在试验前的构件尺寸及外观，以及试验后试件的破坏形态、截面尺寸，碳纤维的破坏形态以及钢材的破坏形态。

3.2.2. B 组试验结果

选取 B 组其中一个试件分析，图 8 为 B 组试件 c-11 的平均应力应变曲线图，由图中可以看出，当平均应力达到 63.0 N/mm^2 ，测点 2 处应变发生突变，表明该处碳纤维先出现破坏，其后当平均应力达到 119.0 N/mm^2 时，测点 3、4 处应变发生突变，表明该测点处的碳纤维出现受拉破坏，最后测点 1 处应变发生突变，表明该处碳纤维受拉破坏，此时的平均应力为 130.0 N/mm^2 左右，对应外荷载值为 832.0 kN 。由图上可以看出测点 1、3、4 处碳纤维开始破坏的时间相差不大。图 9、图 10 分别为另外两个试件加载过程中的试验现象。

图 11 为 B 组 3 个试件的轴向荷载位移曲线图，从图中可以看出，B 组复合腔体试件在轴向压力达到 $1000.0 \text{ kN} \sim 1100.0 \text{ kN}$ 时开始屈服，进入弹塑性阶段，此时位移为 5.81 mm 。由图中还可以看出该复合试件具有很好的延性。图 12 为 A、B 两组试件的荷载位移曲线关系对比图。

图 13 中 8 张图片分别为 B 组试件试验前的构件尺寸及外观，试验后试件的破坏形态、截面形状，碳纤维的破坏形态以及钢材的破坏形态。

在试验过程中首先出现碳纤维开始拉坏时，同时可听到碳纤维拉坏断裂的声音，此后碳纤维逐渐破坏失去承载力，复合腔体试件的承载力出现短暂的下降趋势，随后荷载基本维持不变，位移不断增加。此阶段为屈服阶段。当位移达到 30 mm 左右时，复合腔体的承载能力又有所增强。从破坏形态来看，A、B 组试件钢板均被压缩，破坏形态基本一致，但是外裹碳纤维的破坏形态是不相同的。A 组试件的碳纤维在试验过程中断裂，与钢板表面脱离，而 B 组试件的碳纤维拉坏，还未与钢板完全脱离。

3.3. 试验结果分析

图 14、图 15 分别为本试验中采用的复合腔体试件钢材和混凝土在轴压试验中采用的截面计算面积示意图。

根据材料性能指标，可计算得到混凝土在轴压力作用下的截面设计承载力[3] [4]:

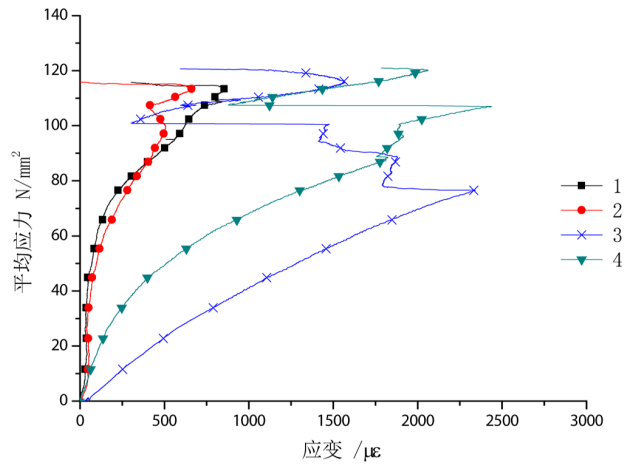


Figure 3. Curve:stress-strain of C-1

图 3. C-1 应力-应变曲线

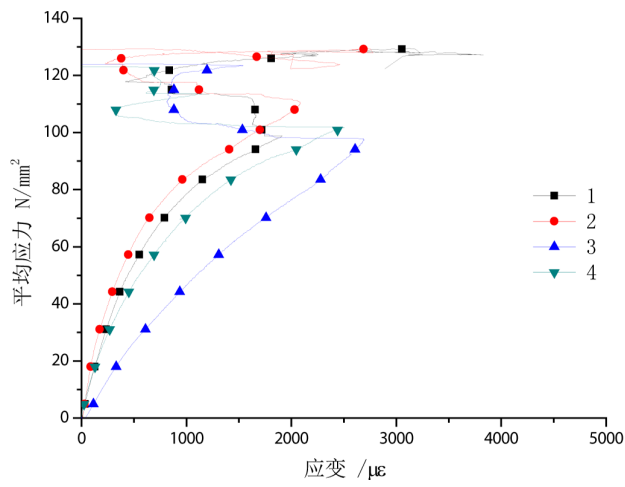


Figure 4. Curve:stress-strain of C-2

图 4. C-2 应力-应变曲线

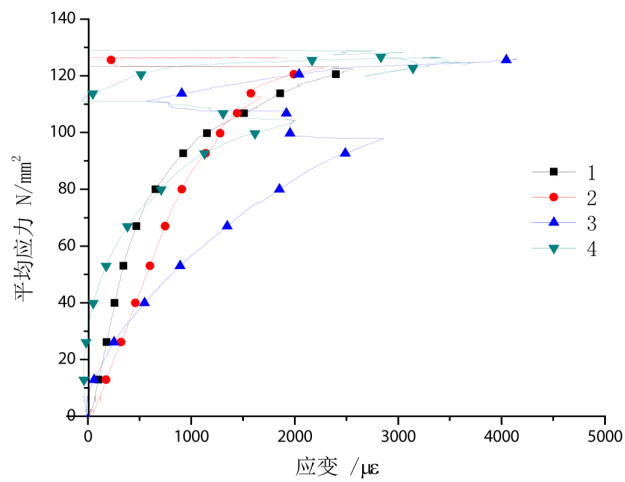


Figure 5. Curve:stress-strain of C-3

图 5. C-3 应力-应变曲线

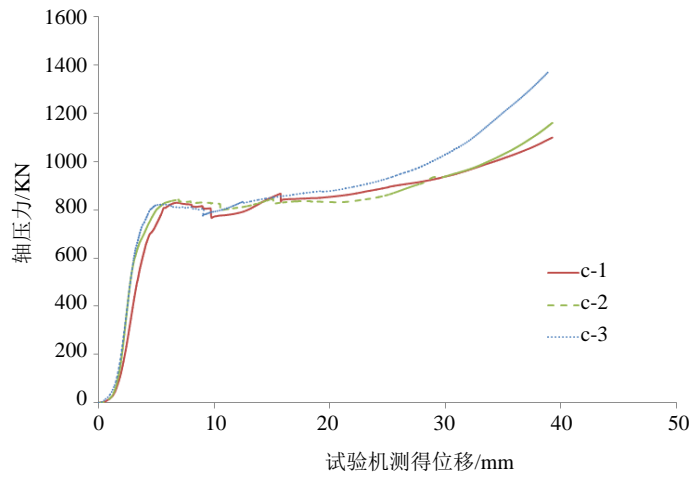


Figure 6. Curve:load-displacement of sets A
图 6. A 组试件荷载-位移曲线



Figure 7. Photos: the specimens of sets A
图 7. A 组试件试验图片

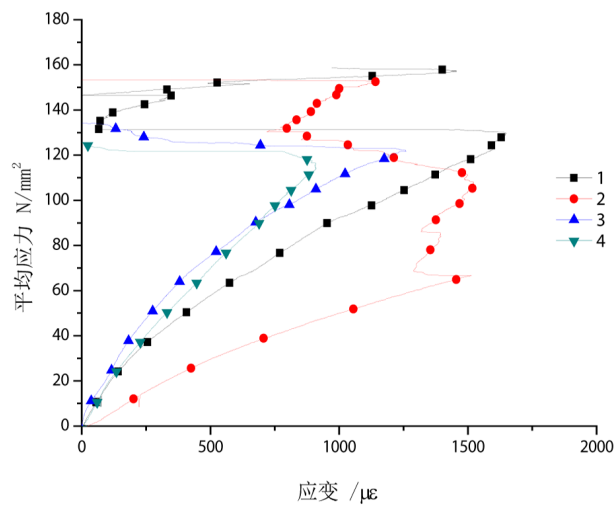


Figure 8. Curve:stress-strain of C-11
图 8. C-11 应力应变曲线

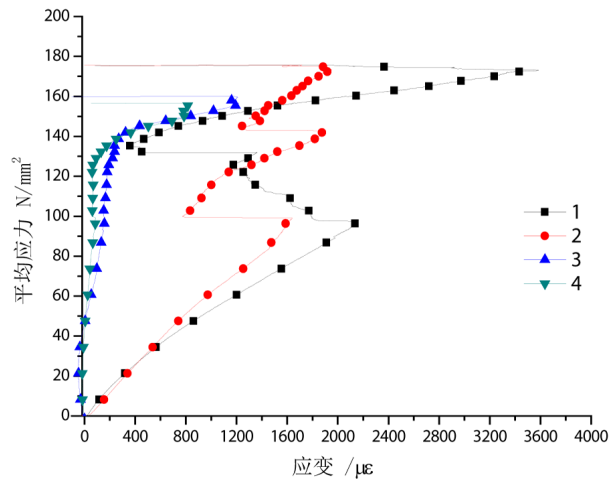


Figure 9. Curve:stress-strain of C-22

图 9. C-22 应力应变曲线

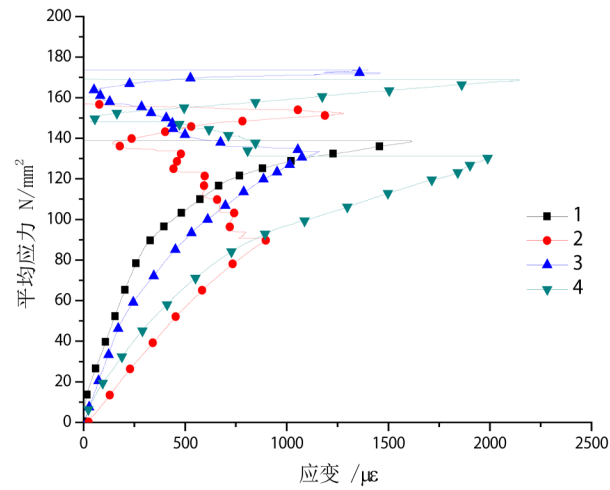


Figure 10. Curve:stress-strain of C-33

图 10. C-33 应力应变曲线

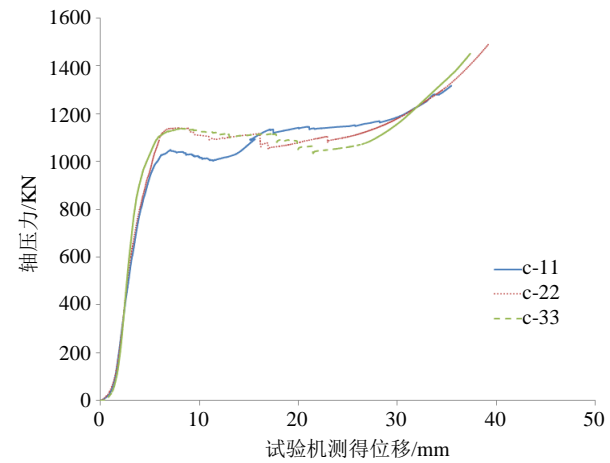


Figure 11. Curve:load-displacement of sets B

图 11. B 组试件荷载-位移曲线

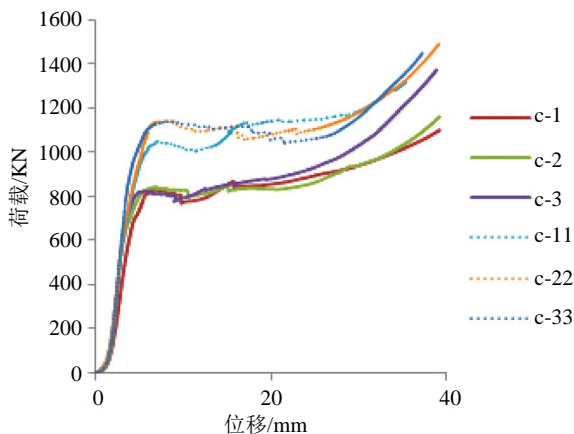


Figure 12. Curve:load-displacement of sets A and B
图 12. A、B 组试件荷载-位移曲线对比



Figure 13. Photos: the specimens of sets B
图 13. B 组试件试验图片

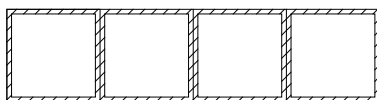


Figure14. Steel section for computing
图 14. 轴压钢材计算截面示意图

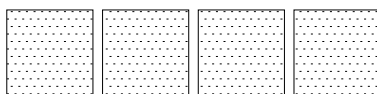


Figure15. Concrete section for computing
图 15. 轴压混凝土计算截面示意图

$$N_c = f_c \cdot A_c = 27.5 \text{ N/mm}^2 \times 36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 4 = 142.56 \text{ kN}$$

在轴压力作用下的截面设计承载力:

$$N_g = f_g \cdot A_g = 215 \text{ N/mm}^2 \times (160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} - 36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 4) = 261.44 \text{ kN}$$

混凝土和钢材截面承载力之和 N 为 404 kN。

表 3 所示为试验所得复合腔体试件的屈服荷载、极限荷载以及试验所测值与理论计算值的一些比较。表 4 为试验过程中，试件表面碳纤维最初开始破坏时的荷载、碳纤维被拉坏逐渐退出工作时荷载、试件开始屈服的荷载、试验所测极限荷载的汇总表。表 5 中数据为 A 组、B 组试件分别取 3 个试件各项荷载的平均值。

由表 5A、B 两组数据处理结果来看，A 组和 B 组试件碳纤维开始出现破坏时的荷载很接近，均为 529.0~550.0 kN。但 B 组试件的其他承载力均比 A 组试件大。由表中可知，碳纤维开始退出工作时的荷载 A 组为 725.3 kN 左右，B 组为 893.87 kN，B 组试件的碳纤维开始退出工作时荷载比 A 组高 23.2%。A 组的屈服荷载均值为 827.56 kN，B 组的屈服荷载均值为 1112.43 kN，B 组试件的屈服荷载比 A 组试件高 34.4%。试验所得的极限荷载承载力 A 组均值为 1207.57 kN，B 组为 1420.37 kN，B 组试件的极限承载力比 A 组高 17.6% 左右。从承载力方面来看 B 组试件比 A 组试件的承载力大。表 5 中还列出 A 组试件的强屈比均值为 1.46，而 B 组为 1.28，均比设计所要求的 1.25 大，说明二组试件均满足延性要求。但 A 组试件的延性要比 B 组试件好，高 14% 左右。

Table 3. Analysis of the experimental results
表 3. 试件试验结果分析

试件编号	混凝土截面设计承载(kN)	钢材截面设计承载力(kN)	二者之和 N (kN)	试验测得屈服荷载 F_s	F_s/N	试验测得极限荷载 F (kN)	F/N	F/ F_s 强屈比
C-1				825.91	2.04	1099.48	2.72	1.33
C-2				835.90	2.07	1159.91	2.87	1.39
C-3	142.56	261.44	404	820.87	2.03	1363.32	3.37	1.66
C-11				1125.1	2.78	1316.91	3.26	1.17
C-22				1104.2	2.73	1493.19	3.70	1.35
C-33				1108.0	2.74	1451.01	3.59	1.31

Table 4. Experimental results list
表 4. 试验结果汇总表

试件编号	碳纤维最先开始破坏时的荷载 (kN)	测点碳纤维全部破坏时的荷载 (kN)	试验测得屈服荷载 (kN)	试验测得极限荷载 (kN)
C-1	460.8	704.0	825.91	1099.48
C-2	608.0	704.0	835.90	1159.91
C-3	588.8	768.0	820.87	1363.32
C-11	403.2	832.0	1125.10	1316.91
C-22	608.0	972.8	1104.20	1493.19
C-33	576.0	876.8	1108.00	1451.01

Table 5. Comparison of experimental results between sets A and sets B
表 5. A、B 组试验结果对比列表

	碳纤维最先开始破坏时的荷载(kN)	测点碳纤维全部破坏时的荷载 (kN)	屈服荷载 (kN)	试验所测极限荷载(kN)	强屈比
A	552.53	725.33	827.56	1207.57	1.46
B	529.07	893.87	1112.43	1420.37	1.28
(B - A)/A	-4.2%	23.2%	34.4%	17.6%	-14.3%

4. 结论

通过对两种不同复合腔体试件的轴心抗压试验可以得到如下结论：

- 1) 复合腔体试件的这种材料结构相较于三种材料抗压强度直接组合得到的抗压强度提高很多。
- 2) 复合腔体试件在轴向压力作用下的失效模式主要体现在外层碳纤维剥离钢材表面，碳纤维被拉断，钢管被压鼓屈曲。
- 3) 通过两组复合腔体试件的轴心受压试验，可知复合腔体的 A、B 组试件承载力均比单一材料提高很多，而且都具有很好的延性。
- 4) B 组试件的承载性能更好，B 组试件的承载力比 A 组高 30% 左右。这主要是由于 B 组试件提供的粘结胶水和外层包裹碳纤维的加工工艺与 A 组不同。

参考文献 (References)

- [1] 王庆利, 车媛, 谭鹏宇, 邵永波 (2010) CFRP-钢管混凝土结构研究的进展与展望. *工程力学学报*, 27(增刊), 48-60.
- [2] 钟卫洲, 张青平, 黄西成, 李思忠 (2006) 碳纤维复合材料结构抗压性能实验研究. *第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集*, 中国力学学会爆炸力学实验技术专业组, 4, 80-83.
- [3] (2010) 混凝土结构设计规范 GB 50010-2010.
- [4] 沈祖炎, 陈扬冀, 陈以一 (2005) 钢结构基本原理. 中国建筑工业出版社, 北京.