

# 带纤维编织网增强 ECC 层钢管混凝土轴 压力学性能试验研究

成 彤<sup>1</sup>, 李宁景<sup>2</sup>, 陈光明<sup>2</sup>, 李召兵<sup>1</sup>, 熊 焱<sup>2</sup>, 赵新宇<sup>2</sup>

(1. 广州市城建规划设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

**摘要:** 钢管混凝土柱由于受压力学性能良好、施工方便, 已经在土木工程结构中大量使用。耐腐蚀及耐火性能较差, 轴压时钢管易向外局部屈曲是其主要不足。ECC(Engineered Cementitious Composite)是一种具有多裂缝开展和应变硬化特征的纤维增强水泥基复合材料, 具有延性好、韧性高、耐久性好等优点。用带纤维编织网增强 ECC 层来加固钢管混凝土结构, 可克服上述不足(耐火性能不足、钢管易屈曲), 同时也增加钢管混凝土的耐久性性能。由此, 针对纤维编织网增强 ECC 层加固钢管混凝土柱进行了系列研究。本文介绍带纤维编织网增强 ECC 层加固钢管混凝土柱常温下轴压力学性能试验研究结果。后续还研究了高温对带纤维编织网增强 ECC 层加固钢管混凝土柱受压力学性能的影响, 相关研究成果将另文介绍。

**关键词:** 钢管混凝土柱; 纤维编织网; ECC; 轴压; 组合结构

中图分类号: TU398<sup>+.9</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0202-09

## Experimental study on axial compressive mechanical properties of concrete-filled steel tube with ECC layer reinforced by textile

CHENG Tong<sup>1</sup>, LI Ningjing<sup>2</sup>, CHEN Guangming<sup>2</sup>, LI Zhaobing<sup>1</sup>, XIONG Yan<sup>2</sup>, ZHAO Xinyu<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Urban Construction Planning & Design Co. Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of  
Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Concrete-filled steel tubular (CFST) columns have been widely used in civil engineering structures due to their good compressive mechanical properties and construction convenience. However, their corrosion resistance and fire resistance are poor, and the steel tube is prone to outward local buckling under axial compression. ECC (engineered cementitious composite) is a fiber-reinforced cement-based composite with the characteristics of multi-cracking and strain hardening (after cracking), which has the advantages of good ductility, high toughness and excellent durability. Therefore, strengthening the CFST column with textile-reinforced ECC (TR-ECC) layer can overcome the above shortcomings, and enhance the durability of CFST. Based on this concept, a series of studies have been carried out in the authors' research group on the compression behavior of CFST strengthened by the TR-ECC layer. In this paper the test results of the axial compression behavior of CFST strengthened by TR-ECC layer at ambient temperature are presented, while the influence of higher temperature on the compressive mechanical properties of CFST strengthened by TRECC layer has been also studied, and the related research results will be introduced in another paper.

**Key words:** CFST column; textile; ECC; axial compression; composite structure

钢管混凝土是一种在工程得到广泛应用的组合结构形式, 由混凝土浇筑在不同形状的钢管中形成。在钢管混凝土中, 钢材和混凝土两种材料在受力过程中能形成如下有利相互作用: 钢管对核心混凝土

提供约束作用, 使混凝土处于三向受压应力受力状态, 后者强度与变形能力均得到显著提升, 同时钢管还与混凝土共同受力, 承受部分外力; 而混凝土能对钢管形成侧向支撑, 提升其抗屈曲能力。此外,

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2022-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978281, 51878298)、广东省现代土木工程重点实验室基金资助项目(2021B1212040003)

第一作者: 成彤(1968—), 男, 硕士, 高级工程师。主要从事桥梁加固和道路立交设计。E-mail: 819680220@qq.com

通信作者: 陈光明(1978—), 男, 博士, 教授。主要从事 FRP-混凝土-钢新型组合结构和再生混凝土应用研究。E-mail: guangminghen@scut.edu.cn

钢管还可以作为浇筑混凝土的模板、实现免模板施工<sup>[1-2]</sup>。钢管混凝土存在一些不足, 如: 耐腐蚀及耐高温能力不足; 受压荷载较大时, 钢管可能向外屈曲导致承载力下降<sup>[3]</sup>。耐火性不足, 一般涂抹防火涂料<sup>[4-5]</sup>加以解决。此外, 还可以通过设置横向增强措施(如设置栓钉、约束拉杆和箍筋等)和纵向增强措施(如纵向加劲肋、钢管和纵向钢筋等)来提升钢管混凝土柱的轴向受力性能。上述增强措施中, 一部分还能提升钢管混凝土柱的耐高温性能(如设置箍筋、设置约束拉杆等); 然而, 大多数的增强措施都会增大钢材用量, 从而增加造价<sup>[6]</sup>。因此, 如何在增强钢管混凝土受力性能的同时, 提升其耐久性及耐高温性能, 同时不增加用钢量, 是一个既有科学研究价值又有重要工程应用价值, 亟待解决的技术问题。

ECC(Engineered Cementitious Composite)是一种具有多裂缝开展和应变硬化特征的纤维增强水泥基复合材料, 具有受拉延性好、韧性高、耐久性好等优点; ECC 的抗压强度与普通混凝土类似, 弹性模量略低于普通混凝土, 但其极限拉应变能达 3% 以上, 最大裂缝宽度能控制在 50  $\mu\text{m}$  以内(平均裂缝间距 1 mm<sup>[7]</sup>)。ECC 中常用的纤维有 PVA(聚乙烯醇)纤维、PE(聚乙烯)纤维及 PP(聚丙烯)纤维等。现有研究通过对 PVA-ECC、PE-ECC 和普通混凝土的抗压性能进行比较, 发现 PVA-ECC 有更好受压延性<sup>[8]</sup>。常温下 PVA 纤维能起到桥联作用从而抑制裂缝发展, 高温时又能熔融形成水蒸汽溢出通道, 有利于内部水蒸汽压力释放, 避免 ECC 发生爆裂, 使得 ECC 在经历了高温后的完整性优于普通混凝土<sup>[9-11]</sup>; 因此, ECC 除了具有上述受力性能及耐久性方面的优点外, 还具有较好的耐高温性能。

纤维编织网增强 ECC (Textile-reinforced ECC)是将纤维编织网(textile)嵌入 ECC 基体中组成的一种新型纤维增强复合材料应用形式, 以下简称 TR-ECC。与纤维编织网增强混凝土(Textile-reinforced concrete, 简称 TRC)和纤维编织网增强砂浆(Textile-reinforced mortar, 简称 TRM)相比, TR-ECC 具有更好的韧性、延性及变形能力, 能更好地控制裂缝开展(较细的多裂缝)。因此, 将纤维编织网与 ECC 材料结合, 不仅能够解决 ECC 中乱向分布的短切纤维(PVA)不能有效承担荷载的问题, 还能够解决 TRC 开裂后导致基体刚度及承载的能力不足, 同时能避免纤维编织网和基体界面因为基体开裂早期脱粘的问题, 提高纤维编织

网与基体间的界面粘结性能, 从而有效控制裂缝的发展, 使该新型纤维增强复合材料具有优异的力学性能(如延性及变形能力, 后期刚度)和裂缝控制能力<sup>[12-13]</sup>。Al-Gemeerl 与 Zhu 等<sup>[14]</sup>采用玄武岩纤维编织网和 ECC 基体相结合的方法, 研究了其对于混凝土柱的约束效果。试验发现玄武岩纤维编织网增强 ECC 具有限制混凝土圆柱膨胀的潜力, 对被约束柱的延性和承载能力都有较大改善。高皖扬等<sup>[15]</sup>开展了使用 TR-ECC 加固的受火后混凝土板(8 块)的四点弯曲试验。试验结果表明: 利用玄武岩纤维编织网增强 ECC 加固受火后混凝土板能够有效抑制裂缝的开展; 加固受火后混凝土板抗弯承载力提升幅度在 70%~200%之间; 潘金龙等<sup>[16-17]</sup>研究了 ECC 外包钢管混凝土柱的滞回性能和轴压性能。试验结果表明: ECC 包裹钢管混凝土柱具有更高的承载力和更好的延性, 累计耗能是相同几何形状的混凝土包裹钢管混凝土柱的两倍左右。因 ECC 层较厚, 实际工程应用时成本高, 不经济。卢亦焱等<sup>[18]</sup>则对采用碳纤维编织网增强 ECC 加固钢管混凝土柱的轴压力学性能进行了试验研究, 研究了纤维编织网层数、钢管径厚比及混凝土强度对组合柱轴压力学性能的影响。试验结果表明: ECC 加固层能有效提升钢管混凝土柱的承载力, 且添加纤维编织网的试件表现出了更高的延性。但是, 该研究测试的试件尺寸较小(圆柱体 140 mm $\times$ 500 mm), 试验结果虽然初步证实了采用碳纤维编织网增强 ECC 加固钢管混凝土柱的可行性, 其实际工程应用价值有待较大尺寸试件研究进一步确认。另一方面, 该研究中, TR-ECC 加固层采用手工涂抹方式附着在钢管混凝土柱表面, 耗时较长, 效率较低, 控制 ECC 的厚度有一定的困难。

现有对钢管混凝土构件的研究多集中在其常温力学性能方面, 而对其耐久性与极端条件(如高温或火灾)性能的研究相对较少。针对钢管混凝土的增强措施一般都会增加用钢量, 仅有小部分措施能同时增加其耐高温性能及耐久性。TR-ECC 作为一种新型 ECC 应用形式, 将其用于钢管混凝土的外包加固, 具有以下优势: 由于采用了具有良好的抗裂性能、韧性及抗高温爆裂性能的 ECC 作为基体材料, 同时由于使用纤维编织网作为增强材料, 使 TR-ECC 的加固效果明显高于 ECC 单独使用, 有望同时提升被加固钢管混凝土的耐高温性能及受力性能。由此, 本文开展了带纤维编织网增强 ECC(TR-ECC)加固层的钢管混凝土轴压力

学性能试验研究. 带纤维编织网增强 ECC 加固层有望实现以下效果: (1)作为保护层提升钢管耐腐蚀能力不足; (2)作为保护层提升钢管耐高温不足; (3)作为约束措施抑制由于钢管外屈曲, 避免早期轴向承载力下降, 从而提升其受压力学性能. 其中效果(3)的实现主要是由于带纤维编织网增强 ECC 加固层有可观的后期约束刚度. 本课题系统研究了 ECC 厚度、纤维编织网层数、钢管厚度及受高温作用对带纤维编织网增强 ECC 加固层钢管混凝土轴压力学性能的影响.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

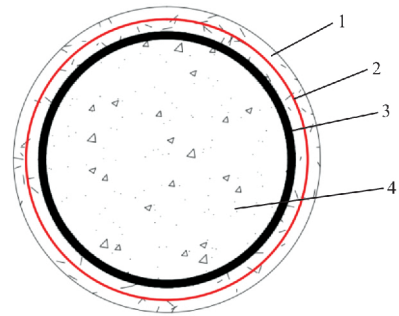
为研究带 TR-ECC 层的钢管混凝土力学性能, 共设计了 3 组共 9 根较大尺寸组合短柱, 如表 1 所示. 试件编号含义如下: 第一个字母 S 代表钢管, 其后数据代表钢管的厚度(单位 mm); 第二个字母 E 表示 ECC 层, 其后数据表示 ECC 层的厚度; 第三个字母 G 表示纤维编织网, 其后数据表示纤维编织网的网眼间距. 具体而言, 9 个试件包括 2 根钢管混凝土柱(如 S4、S8), 2 根带 ECC 层钢管混凝土柱(如 S4E25、S4E50)及 5 根带纤维编织网增强 ECC 层钢管混凝土柱试件(如 S4E50G50、S4E50G25), 其中, 钢管混凝土柱主要用于对比研究. 所有试件钢管外径均为 300 mm, 高度均为 900 mm, 主要变化参数为钢管厚度、ECC 厚度及纤维编织网网眼尺寸. 钢管使用的钢材设计强度等级为 Q345, 混凝土设计强度等级为 C30. 试件主要参数如表 1 所示, 构件横截面示意图如图 1 所示.

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of specimens

试件编号	钢管壁厚 /mm	ECC 层厚 度/mm	网格 层数	网眼尺寸 /mm <sup>2</sup>
S4	4	/	/	/
S8	8	/	/	/
S4E25	4	25	/	/
S4E25G50	4	25	1	50×50
S4E25G25	4	25	1	25×25
S4E50	4	50	/	/
S4E50G50	4	50	1	50×50
S4E50G25	4	50	1	25×25
S8E50G25	8	50	1	25×25

注: 钢管的外径为 300 mm, 试件的高度为 900 mm.

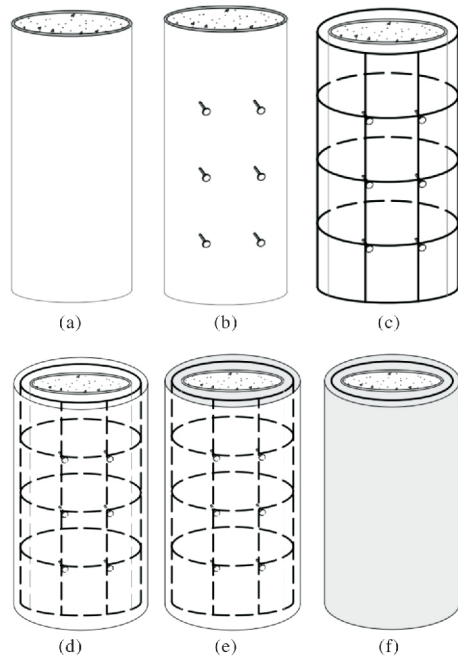


1为ECC, 2为纤维编织网, 3为钢管, 4为核心混凝土

图 1 试验试件截面图示意图

Fig. 1 Section diagram of test specimen

需要指出的是: 由于本研究中试件采用了接近实际工程的较大截面尺寸, 试件 ECC 层最大厚度依据《建筑构件耐火实验方法 第 1 部分: 通用要求》(GB/T 9978.1—2008)<sup>[19]</sup>, 以按照 ISO 834 标准升温曲线升温 120 min 钢管表面温度不超过 400 °C(大于此温度钢管受力性能将发生明显退化<sup>[20]</sup>)为原则, 通过有限元分析选定. 试件浇筑过程按照如下步骤进行: (a)浇筑钢管内混凝土, (b)在钢管外表面焊接栓钉, (c)将编织网固定在栓钉上, (d)固定 GFRP 管作为外模板, (e)在 GFRP 管和钢管之间浇筑 ECC, (f)去掉 GFRP 管模板(如图 2 所示).



(a)为钢管混凝土, (b)在钢管外表面焊接栓钉, (c)将网格固定在栓钉上, (d)固定GFRP管作为外模板, (e)在GFRP管和钢管外表面间浇筑ECC, (f)拆除GFRP管

图 2 试件浇筑过程示意图

Fig. 2 Process of casting specimen

### 1.2 材性力学性能

#### 1.2.1 NSC/ECC 材料性能

普通混凝土的材料性能试验参考 ASTM-

C469/C469M-14<sup>[21]</sup> 规范, 浇筑了 3 个  $\Phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的标准圆柱体, 在 60 d 测得的混凝土强度性能如表 2 所示. ECC 的强度和弹性模量测试参考日本土木工程协会标准<sup>[22]</sup>, 分别通过 3 个  $\Phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  的圆柱体进行受压性能测试, 同时准备 3 个狗骨形试件进行受拉性能测试, 分别在试件试验阶段(浇筑试件约 7 个月)和 28 d 测得的 ECC 材料性能如表 3 所示.

1.2.2 钢管材料性能

试验所用钢管为 Q345 有缝(焊接)钢管, 厚度有两种, 分别为 4 mm 和 8 mm. 参考 GB/T

228.1—2010 规范<sup>[23]</sup>, 在每种厚度的钢管非焊接区沿纵向各切割了 3 根狗骨形试样用于测量钢材的屈服强度、弹性模量和泊松比. 钢管材性试验结果如表 3 所示.

表 2 混凝土材料性能

Tab. 2 Material properties of concrete						
试件编号	$f_c/\text{MPa}$	Ave.	$E_c/\text{GPa}$	Ave.	$\nu_c$	Ave.
1	31.3		25.19		0.21	
2	32.3	32.1	24.79	24.79	0.22	0.215
3	32.8		24.64		0.15	

注:  $f_c$  代表受压强度,  $E_c$  代表混凝土弹性模量,  $\nu_c$  代表泊松比; Ave 指平均值.

表 3 ECC 材料性能

Tab. 3 Material properties of ECC							
试件编号	$f_{ec}/\text{MPa}$	Ave.	$E_c/\text{GPa}$	Ave.	$f_{et}/\text{MPa}$	Ave.	$\epsilon_{ut}/\%$
1	29.61		13.01		2.76		3.43
2	28.34	28.37	11.59	12.79	2.14	2.28	2.82
3	27.15		13.78		1.94		2.29

注:  $f_{ec}$  代表 ECC 抗压强度,  $E_c$  代表 ECC 的受压弹性模量,  $f_{et}$  代表 ECC 的抗拉强度,  $\epsilon_{ut}$  代表 ECC 最大受拉应变; Ave 指平均值

表 4 钢材材料性能

Tab. 4 Material properties of steel								
试件编号	$f_y/\text{MPa}$	Ave.	$f_u/\text{MPa}$	Ave.	$E_s/\text{GPa}$	Ave.	$\nu_s$	Ave.
4mm-1	419		544		203		0.27	
4mm-2	429	424	547	542	200	201	0.27	0.27
4mm-3	425		536		201		0.28	
8mm-1	438		561		202		0.27	
8mm-2	432	446	566	565	201	202	0.27	0.28
8mm-3	469		567		204		0.3	

注:  $f_y$  代表钢材屈服强度,  $f_u$  代表钢材极限强度,  $E_s$  代表钢材弹性模量,  $\nu_s$  代表泊松比; Ave 指平均值.

1.3 试验装置及测量方案

研究试件加载均在华南理工大学结构实验室 1 500 t 长柱压力机上进行, 加载装置如图 3 所示. 位移计(LVDT)及应变片测点布置如图 4 所示.



图 3 加载装置图  
Fig. 3 Test set-up

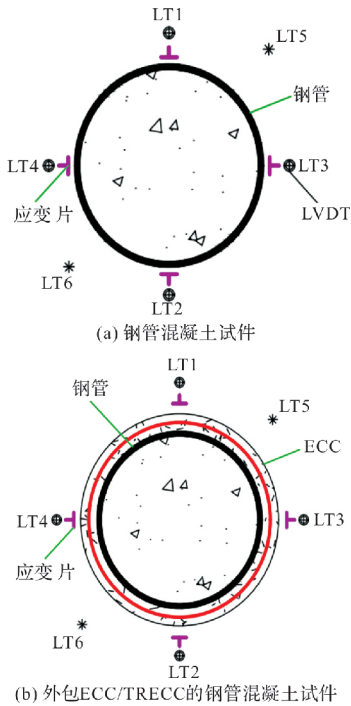


图 4 测点布置  
Fig. 4 Arrangement of measuring points



对钢管混凝土试件及 TR-ECC 加固钢管混凝土试件,在钢管或 ECC 层试件中部处沿环向间隔  $90^\circ$  共布置 4 个纵向应变片和 4 个横向应变片,同时每个试件的中部沿着环向等间距安装了 4 个量程为 100 mm 的 LVDT(即 LT1-LT4)用以测量柱中高度 450 mm 范围的轴向变形;此外,还安装了两个位移计 LT5 和 LT6 用以测量试件的轴向总变形。加载方式采用位移控制,参考柳钦<sup>[24]</sup>的轴压试验方案,轴向应变增长速率取  $10^{-5}/s$ ,位移加载速率取 0.009 mm/s。在正式加载之前,对试件进行预压,施加 10% 的预估极限荷载,观察轴向应变片读数,按照如下方式检验试件是否对中。试件上对称位置 2 个轴向应变数据之差在其平均值的  $\pm 10\%$  范围内,然后进行正式加载。加载至满足以下两个条件之一时停止加载:(1)荷载下降至 85% 峰值荷载;(2)试件到达最大荷载点后荷载下降至最低谷且开始出现明显上升趋势(不考虑加载过程可能出现的荷载瞬时快速下降,然后回弹上升的情况,详见论文第 4 节讨论)。

## 2 试件破坏过程及破坏模式

部分试件的典型最终破坏模式图 5 所示。破坏模式及破坏过程归纳如下:(1)两个 CFST 试件(S4 和 S8)的破坏过程和破坏模式基本相同,即当竖向荷载增至约 90% 峰值荷载时,钢管受压屈服,试件进入弹塑性阶段;当竖向荷载到达峰值并开始迅速下降至峰值的 90% 时,试件中部及附近开始发生膨

胀,随着荷载的继续增加,局部屈曲现象逐渐明显,试件上端部或下端部出现“象足屈曲”直至钢管沿焊缝开裂,试验结束;(2)外包 ECC 或 TR-ECC 的钢管混凝土试件:外包层一般在加载至第一个峰值荷载时出现一条明显裂缝(肉眼可视),同时伴随较大开裂声响,荷载急剧下降随后上升。随着荷载的增加,其他细裂缝逐渐产生并发展,裂缝开展整个过程伴有滋滋声,开裂处能看到 ECC 中的 PVA 纤维拔出,表明该处 PVA 逐渐失去桥联作用。对于外包 ECC 层试件(S4E25 及 S4E50),试验后期 ECC 开展非常明显(裂缝宽度在 5 mm 以上)甚至完全脱落(S4E50);对于有纤维编织网的试件,裂缝发展相对缓慢,且试件破坏时外包层并未完全脱落,试件的完整性更好,个别试件(如 S4E50G25)由于加载时间较长,试验停止时位移已达到试验机器量程,因此 ECC 层裂缝开展达到 10 mm 以上,同时钢管变形更加严重;(3)去掉外包 ECC 层后,发现所有钢管都存在向外鼓曲变形,有 ECC 外包层的试件钢管变形情况要比无外包层试件(纯 CFST 试件)的变形轻微。具体而言,对于钢管厚度为 4 mm 的试件,外包层的存在对于钢管的变形起到了一定的延缓作用。对于钢管厚度为 8 mm 的试件,外包层的存在对于钢管的变形起到了非常明显的抑制作用(屈曲变形不明显)。对比外包 ECC 层及 TR-ECC 层的试件,发现仅有 ECC 层的试件局部屈曲变形较为明显,而有纤维编织网(TR-ECC 层)的试件屈曲变形不明显或仍处于发展阶段(上述 S4E50G25 除外)。



图5 破坏模式图

Fig. 5 Photos of failure modes

### 3 荷载-位移曲线

所有试件的荷载-位移曲线如图 6 所示。图 6 中, 为了更加清晰显示曲线规律, 采用了全局图(图 6(a))及局部放大图(图 6(b))结合来展示。根据曲线的特点, 所示的荷载-位移曲线可以分类如下: 第一类呈现“n”型, 特征为曲线上升至顶点后平稳下降, 表现为良好的延性, 为典型的钢管混凝土荷载-位移曲线(试件 S4, S8)。第二类为“m”型, 特征为曲线上升至第一个峰值后迅速下降, 然后缓慢上升至第二个峰值点, 最后平稳下降, 在平稳下降阶段与“n”型曲线类似; 所有的带 ECC 与 TR-ECC 加固层的试件曲线属于“m”型。对“m”型曲线进行详细比较可知: (1) 当 ECC 或 TRECC 层的厚度较大时(50 mm), 曲线的第一个峰值荷载会明显大于第二个峰值荷载, 因此最大荷载出现在第一个峰值点; 同时, 第一个低谷点一般都小于最大荷载 0.85 倍( $0.85P_k$ ), 因此, 可以认为极限状态出现在第一个下降段。(2) 当 ECC 或 TR-ECC 层的厚度较小时(25 mm), 第一个峰值荷载会略小于第二个峰值荷载, 因此最大荷载一般出现在第二个峰值点, 而极限状态一般出现在第二个下降段, 一般为第二个低谷点(试件 S4E25 或下降至 0.85 倍最大荷载对应点(试件 S4E25G25, S4E25G50))。(3) 网格的网眼尺寸大小对第一个峰值点后曲线的下降趋势有一定的影响: 一般纤维编织网网眼尺寸越小, 下降段刚度绝对较小(坡度较为平缓), 同时第一个低谷对应荷载较高, 此现象与纤维编织网对 ECC 层内裂缝开展的抑制作用相关; 但是图 6 结果同时表明, 纤维编织网网眼尺寸对最大荷载的影响规律不明显, 有待继续深入研究。此外, 需要指出的是, 钢管的屈服点(考虑轴向与环向应力并由于 von Mises 确定)一般会发生上述第一个峰值点之前(个别“m”型曲线会在第一个峰值后的下降段, 如 S4E50G50)并与该峰值点比较接近, 而 ECC 层开裂(见表 5)发生在所述屈服点之后并与上述峰值点接近, 说明钢管屈服导致较大塑性变形可能是出现 ECC 层开裂及荷载达到峰值的诱因。根据上述试验现象, 可以得出如下结论: (1) 较厚 ECC 层能明显提升钢管混凝土的承载力, 但是会导致出现两次峰值, 可能导致试件延性下降(即出现“m”型荷载-位移曲线, 原因详见第 4 节“关键结果分析及讨论”); (2) 纤维编织网网眼尺寸对承载力影响规律不明显, 仅仅影响第一个下降段刚度, 理论上可能影响延性,

但是规律比较离散, 有待继续深入研究。

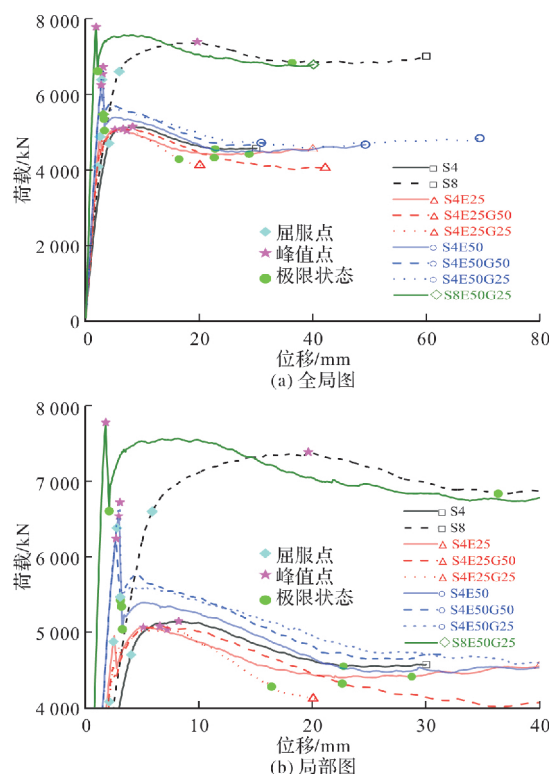


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

### 4 关键结果分析及讨论

本研究的关键结果表 5 所示。图 7~9 为最大荷载、最大荷载对应位移、延性系数的柱状图。需要说明的是, 表 5 所示轴向刚度是通过荷载-轴向位移曲线初始上升段两点(荷载为 500 kN 与 3 500 kN)之间的斜率近似估算确定。由表 5 可知, ECC 层及 TR-ECC 层加固明显增强了钢管混凝土的轴向刚度, 其中厚度为 50 mm 厚的 ECC 层对轴向刚度的增强较为显著, 而纤维网格尺寸对试件轴向刚度影响不大。

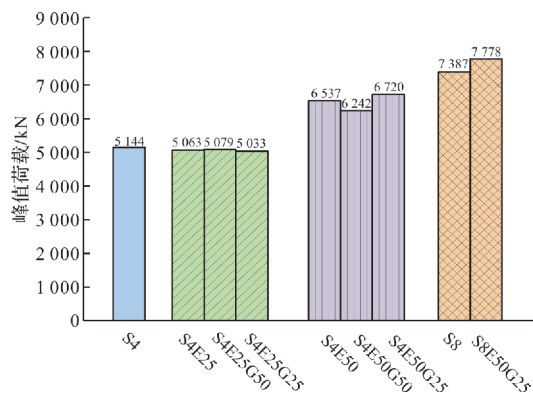


图 7 最大荷载柱状图

Fig. 7 Bar chart of maximum loads

由图 7 可知, 25 mm 厚 ECC 层对试件承载力(最

大荷载)影响不大,而 50 mm 厚 ECC 层能明显增加试件承载力,但是纤维网格尺寸对试件承载力影响不大。

图 8 显示,ECC 加固层可能大幅减少最大荷载对应的位移,其中厚度为 50 mm 的 ECC 层对上述位移的减小非常明显。造成上述现象的主要原因为钢管开始屈服后,ECC 层的裂缝迅速开展,随后不能再与钢管混凝土部分协同工作(详见第 3 节论述)而导致试件荷载整体降低出现第一个峰值点,后续加载过程中,由于钢管材料进入强化段及对混凝土约束效应的增加,可能导致出现第二个峰值点。

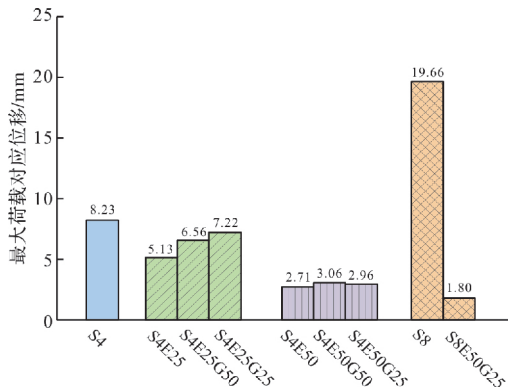


图 8 最大荷载对应位移柱状图

Fig. 8 Bar chart of displacements corresponding to maximum load

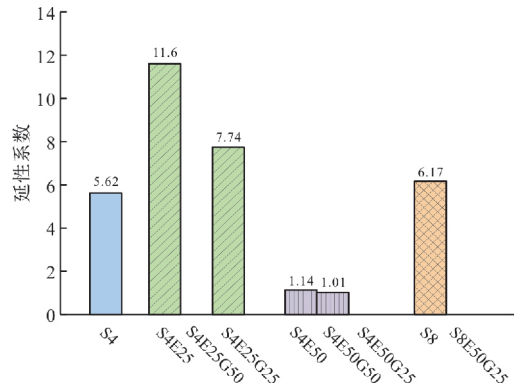


图 9 延性系数柱状图

Fig. 9 Bar chart of ductility coefficients

图 9 表明:虽然 25 mm 厚的 ECC 层能导致加固试件延性系数有一定的增加,但是 50 mm 厚 ECC 层将导致加固试件延性系数明显降低,这个是由相关试件的荷载到达最大值后快速降低并达到极限状态直接相关[如图 6(b)]所示。另外,从图 7~9 可知,纤维编织网的网眼尺寸除了对 ECC 层厚度为 25 mm 最大荷载对应的位移有一定的影响外(网眼尺寸减小导致最大荷载对应的位移增加),对其他主要结果的影响不大。

表 5 关键试验结果

Tab. 5 Key test results

试件编号	P/kN					d/mm					$\mu$	$S_a /$ ( $\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
	$P_{cr}$	$P_y$	$P_k$	$P_b$	$P_u$	$d_{cr}$	$d_y$	$d_k$	$d_b$	$d_u$		
S4	-	4 700	5 144	4 652	4 548	-	4.05	8.23	18.93	22.76	5.62	1.33
S8	-	6 598	7 387	6 883	6 834	-	5.89	19.66	34.74	36.37	6.17	1.56
S4E25	4 950	4 873	5 063	-	4 410	2.58	2.48	5.13	-	28.77	11.60	2.04
S4E25G25	4 805	4 080	5 033	-	4 278*	2.95	2.12	7.22	-	16.41*	7.74	1.92
S4E25G50	4 542	-	5 079	-	4 317*	2.43	-	6.56	-	22.66*	-	1.87
S4E50	6 537	6 381	6 537	-	5 556*	2.96	2.78	2.96	-	3.17*	1.14	2.40
S4E50G25	6 720	-	6 720	-	5 712*	3.06	-	3.06	-	3.15*	-	2.44
S4E50G50	6 242	5 465	6 242	-	5 422	2.71	3.08	2.71	-	3.10	1.01	2.45
S8E50G25	7 778	-	7 778	-	6 611*	1.80	-	1.80	-	2.11*	-	4.85

注:  $P$  为荷载,  $d$  为位移,  $\mu$  代表延性系数,  $S_a$  是轴向刚度。下标 cr 代表 ECC 初次开裂, y、k、b、u 分别代表钢管屈服、峰值荷载、钢管屈服和极限状态。\* 代表  $0.85P_k$ , 其余为最低谷荷载。

## 5 结论

根据试验结果及其分析,可以得到如下结论:

(1)ECC 层能有效增加钢管混凝土试件的初期轴压刚度及承载力,但是对变形能力(极限位移)及延性可能有不利的影响;主要原因在于 ECC 层虽然有较好的受拉延性及变形能力,但受压时候的抗裂能力、变形能力及延性一般,导致在受压构件中,在加载后期 ECC 层不能与钢管混凝土协同工作,增加 ECC 层厚度可明显提升钢管

混凝土的承载力及初始轴向刚度,但是可能导致试件延性下降,出现两次峰值(即荷载-位移曲线呈现“m”型);

(2)纤维编织网能在一定程度上延缓或抑制 ECC 开裂后的裂缝发展,但是对初始开裂荷载影响不大;ECC 加固层的开裂紧随钢管屈服之后,说明钢管的向外变形及屈服是导致 ECC 加固层开裂的主要原因。纤维编织网的网眼尺寸除了对 ECC 层厚度为 25 mm 最大荷载对应的位移有一定的影响外(网眼尺寸减小导致最大荷载对应的位移



增加),对其他主要试验结果的影响不大。后续研究中需要针对纤维编织网的影响开展进一步的深入研究(含纤维编织网的层数)以厘清其潜在影响。

研究结果还表明,需要在后续研究中优化纤维编织网的用量及布置,使之与ECC层厚度匹配,以能更好地起到限制ECC加固层裂缝开展作用,在增强ECC层对强度及刚度增强的同时,避免上述对变形能力(极限位移)及延性的不利影响。

## 参考文献 References

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构的特点及发展[J]. 工业建筑, 1998(10):1-5, 29.  
HAN Linhai, Characteristics and development of concrete-filled steel tube structures[J]. Industrial Construction, 1998(10):1-5, 29.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [3] 李国强, 韩林海, 楼国彪. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
LI Guoqiang, HAN Linhai, LOU Guobiao, Fire resistance design of steel structure and steel-concrete composite structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [4] 李晓东, 靳乐, 孙慧, 等. 钢管混凝土柱抗火性能的试验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(3): 376-380.  
LI Xiaodong, JIN Dong, SUN Hui, et al, Experimental study on fire resistance of concrete-filled steel tube column[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3): 376-380.
- [5] SAKUMOTO Y, OKADA T, YOSHIDA M, et al. Fire resistance of concrete-filled, fire-resistant steel-tube column[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1994, 6(2): 169-184.
- [6] 傅翼飞. 内置高强角钢的方钢管再生块体混凝土柱的轴压及耐火性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
FU Yifei. Study on axial compressive behavior and fire performance of square steel tubular columns filled with recycled lump concrete and high-strength steel angles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [7] 徐世烺, 蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1055-1063.  
XU Shilang, CAI Xiangrong. Basic mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cement matrix composites[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1055-1063.
- [8] FISCHER G. Deformation behavior of reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [D]. Michigan: University of Michigan, 2002.
- [9] 李红兵. 超高韧性水泥基复合材料高温性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
LI Hongbing, Experimental research on high temperature properties of engineered cementitious composites [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [10] SAHMARAN M, OZBAY E, YUCEL H E, et al. Effect of fly ash and PVA fiber on microstructural damage and residual properties of engineered cementitious composites exposed to high temperatures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(12): 1735-1745.
- [11] 田露丹, 张径伟, 董帅, 等. PVA纤维增强水泥基复合材料高温后力学性能研究[J]. 混凝土, 2011, (12): 31-33, 48.  
TIAN Ludan, ZHANG Jingwei, DONG Shuai, et al. Study on mechanical properties of cementitious composites reinforced with PVA fibers after high temperatures [J]. Concrete, 2011, (12): 31-33, 48.
- [12] 李传秀, 尹世平, 赵俊伶. 纤维编织网增强ECC的拉伸和弯曲力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 736-741.  
LI Chuanxiu, YIN Shiping, ZHAO Junling. Tensile and bending mechanical performance of textile reinforced ECC[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 736-741.
- [13] LI B B, XIONG H B, JIANG J F. Tensile behavior of basalt textile grid reinforced engineering cementitious composite[J]. Composites Part B Engineering, 2019, 156: 185-200.
- [14] Al-Gemeel A N, ZHU G Y. Using textile reinforced engineered cementitious composite for concrete columns confinement[J]. Composite Structures, 2019, 210, 695-706.
- [15] 胡克旭, 高皖扬, 戴建国, 等. 玄武岩纤维编织网增强水泥基复合材料加固火灾后混凝土板的抗弯性能试验研究[C]//. 第九届全国建设工程FRP应用学术交流会议论文集. 重庆: 中国土木工程协会, 2015: 60-65.  
HU Kexu, GAO Wanyang, DAI Jianguo, et al. Experimental study on the flexural performance of fire-damaged RC slabs strengthened with basalt textile-reinforced cementitious composites [C]//. Proceedings of the 9th National Academic Exchange conference on FRP Application in Construction Engineering. China: Chongqing: China Civil Engineering Society, 2015: 60-65.
- [16] CAI J M, PAN J L, SU H, et al. Experimental study on the hysteretic behavior of ECC-encased CFST columns [J]. Engineering Structures, 2018, 173: 107-121.
- [17] CAI J M, PAN J L, LI X P. Behavior of ECC-encased CFST columns under axial compression[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 1-9.



- [18] YAN Y H, LIANG H J, LU Y Y, et al. Behaviour of concrete-filled steel-tube columns strengthened with high-strength CFRP textile grid-reinforced high-ductility engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2020.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 建筑构件耐火试验方法第1部分: 通用要求: GB/T 9978.1-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
China Association for Standardization. Fire-resistance tests: Elements of building construction—Part 1: General requirements: GB/T 9978.1-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] 陈宗平, 陈俊睿, 薛建阳, 等. 高温后钢材及再生混凝土的力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(11): 1-4.  
CHEN Zongping, CHEN Junrui, XUE Jianyang, et al. Experimental study of mechanical behavior of steel and recycled aggregate concrete after high temperature[J]. Industrial Construction, 2014, 44(11): 1-4.
- [21] American Society for Testing and Materials. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete: ASTM C469/C469M-14 [S]. Pennsylvania, USA: ASTM international, 2014.
- [22] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC) [S]. Tokyo: JSCE, 2008.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验(第1部分: 室温试验方法): GB/T228.1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
China Association for Standardization. Metallic materials: Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature: GB/T228.1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [24] 柳钦. FRP-高性能混凝土-钢双壁空心管短柱轴压性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
LIU Qing, Study on axial compression performance of FRP-high performance concrete-steel double skin tubular stub column[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

(编辑 沈 波)

(上接第163页)

- [3] 严侃, 黄朋. 复合材料在海洋工程中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(12): 99-104.  
YAN K, HUANG P. Application of composite materials in ocean engineering[J]. FRP/Composites, 2017(12): 99-104.
- [4] 崔宁, 谢铜辉, 张西伟, 等. 水下生产系统后保护方案研究[J]. 中国新技术新产品, 2019(7): 106-108.  
CUI N, XIE J H, ZHANG X W, et al. Study on post protection scheme of underwater production system[J]. New Technology & New Products of China, 2019(7): 106-108.
- [5] 白冰, 罗超, 亢冬春, 等. 新型水下结构保护罩在南海典型油气开发区域应用的可行性研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(3): 190-194.  
BAI B, LUO C, KANG D C, et al. Feasibility study on the application of new subsea structure protection cap in typical oil & gas development area of South China Sea[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(3): 190-194.
- [6] JOSÉ-TRUJILLO E, RUBIO-GONZÁLEZ C, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ J A. Seawater ageing effect on the mechanical properties of composites with different fiber and matrix types[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(23): 3229-3241.
- [7] GU H. Behaviours of glass fibre/unsaturated polyester composites under seawater environment[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1337-1340.
- [8] 谢晶, 李地红, 于漠南, 等. SW901 环氧乙烯基复合材料的耐海水腐蚀性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(4): 41-46.  
XIE J, LI D H, YU M N, et al. Performance of resistance to sea water of sw901 EPOXY vinyl ester composite[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(4): 41-46.
- [9] 王莉莉. 碳纤维/乙烯基酯树脂拉挤复合材料的环境老化行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.  
WANG L L. Effects of environments on pultruded carbon fiber/vinyl ester resin composite[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004.
- [10] GARCIA-ESPINEL J D, CASTRO-FRESNO D, PARBOLE GAYO P, et al. Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions[J]. Materials & Design, 2015, 66: 46-50.
- [11] BENMOKRANE B, ALI A H, MOHAMED H M, et al. Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 114: 163-174.
- [12] YANG L, YAN Y, MA J, et al. Effects of inter-fiber spacing and thermal residual stress on transverse failure of fiber-reinforced polymer-matrix composites[J]. Computational Materials Science, 2013, 68: 255-262.

(编辑 沈 波)