

CFRP 条带加固圆端形铝管混凝土柱轴压力学性能

韦志成¹, 周世武¹, 黄子宁², 廖鹏程³

(1. 广西珠委南宁勘测设计院有限公司, 南宁 530007; 2. 广西华信工程设计股份有限公司, 南宁 530000;
3. 广西建工集团第三建筑工程有限公司, 柳州 545000)

摘要: 针对圆端铝合金管混凝土柱具有良好的耐久性和经济性, 但铝合金的强度和弹性模量较低, 导致对混凝土约束不足的问题。提出了碳纤维条带 (CFRP) 加固圆端铝合金管混凝土柱, 并对其在轴压荷载作用下的力学性能进行了研究。共测试了 8 个试件, 包括 7 个 CFRP 加固试件和 1 个对照试件。研究了在相同 CFRP 用量下, CFRP 条带的宽度、间距和层数对 CREAC 轴压性能的影响。试验结果表明: 试件主要发生圆端铝合金管屈曲和 CFRP 带断裂破坏; CFRP 带可以显著提高试件极限承载力, 在试验范围内最大提高 15.3%; 当 CFRP 用量相同时, 随着 CFRP 条数的减少, 承载力和延性都会下降; 增加 CFRP 带的宽度和厚度可显著提高延性。研究结果可为相关应用提供参考。

关键词: 圆端形铝管混凝土; CFRP 加固; 轴压试验; 力学性能

中图分类号: TU375.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0015-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.003

Axial Compressive Performance of Circular End Aluminum Tube Reinforced Concrete Columns with CFRP Strips

WEI Zhicheng¹, ZHOU Shiwu¹, HUANG Zining², LIAO Pengcheng³

(1. Guangxi Pearl River Commission Nanning Survey and Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China;
2. Guangxi Huaxin Engineering Design Co., Ltd., Nanning 530000, China; 3. Guangxi Construction Group Third Construction Engineering Co., Ltd., Liuzhou 545000, China)

Abstract: Circular end aluminum alloy tube concrete columns have good durability and economy, but the strength and elastic modulus of aluminum alloy are low, resulting in insufficient restraint on concrete. Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) was proposed to reinforce round end aluminum alloy tube concrete columns, and its mechanical properties under axial compressive load were studied. A total of 8 specimens were tested, including 7 CFRP reinforced specimens and 1 control specimen. We studied the effects of the width, spacing, and number of layers of CFRP strips on the axial compression performance of CREAC under the same amount of CFRP. The test results indicate that the specimens mainly experienced buckling of round end aluminum alloy tubes and fracture failure of CFRP strips; CFRP tape can significantly improve the ultimate bearing capacity of specimens, with a maximum increase of 15.3% within the test range; When the amount of CFRP is the same, as the number of CFRP strips decreases, both the bearing capacity and ductility will decrease; Increasing the width and thickness of CFRP strips

作者简介: 韦志成 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程设计。

通信作者: 黄子宁 (1995—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑结构设计。

收稿日期: 2024-07-03

材料科学

can significantly improve ductility. Research findings can provide references for related applications.

Key words: round end aluminum tube concrete; CFRP reinforcement; axial compression test; mechanical properties

0 引言

圆端形钢管混凝土柱 (CFRE) 以其承载力高、施工方便、外形美观、截面布置灵活而被广泛使用^[1]。考虑到 CFRE 在实际应用中的优势, 对其进行深入研究的趋势越来越普遍。Zhang 等^[2]提出了一种用于模拟 CFRE 非线性性能的纤维梁柱模型, 并通过大量实例进行了验证; Ding 等^[3]通过试验、有限元与理论分析, 对 CFRE 在静态和准静态下的力学性能进行了研究, 并提出了相关的计算和设计方法; Wang 等^[4]对 CFRE 偏心受压进行了数值分析, 分析了径厚比、荷载偏心率和截面长细比等参数的影响, 并提出了 CFRE 偏心承载力的简化经验公式。上述研究均指出, 圆形端部截面同时具有矩形和圆形截面的约束特性。然而, CFRE 在桥墩中的频繁使用使其暴露在恶劣的环境条件下, 从而对其耐久性提出了重大挑战。因此, 采用耐腐蚀的铝合金管代替钢管, 成为一种有效的解决途径。Bu 等^[5]对四根圆端铝合金管混凝土柱进行了轴压性能试验和数值研究。结果表明, 长宽比是影响柱轴压性能的关键因素, 适当纵横比的圆端铝合金管具有矩形和圆形端部截面的优点。在此基础上, 提出了利用圆端铝管对混凝土进行有效约束的简化模型和计算方法。

铝合金材料具有良好的耐腐蚀性、高强度重量比和易于加工的特点, 适用于腐蚀性环境或特殊结构部件^[6-7]。然而, 普通铝合金材料具有相对较低的弹性模量 (约为普通钢的三分之一), 导致铝合金结构的刚度较低, 约束效应较弱。为了提高铝合金结构构件的力学性能, 研究人员提出了多种形式的复合结构构件, 如铝合金管-混凝土复合材料、碳纤维增强塑料 (CFRP) 增强铝合金复合材料和碳纤维增强铝合金管混凝土复合材料, 并对其力学性能进行了基础研究^[8]。关于铝合金管混凝土复合材料, Zhou 等^[9-10]对铝合金钢筋混凝土柱进行了轴压性能试验, 并研究了不同截面面积 (方形、矩形和圆形) 和尺寸对其力学性能的影响。这些对 CFRP 增强铝合金复合材料构件的研究结果表明, 这些构件的主要

失效模式是失稳, CFRP 的作用相对有限^[11]。然而, CFRP 铝合金复合管-混凝土复合构件可以显著提高铝合金管的稳定性和承载力。Zhu 等^[12]对方形和矩形 CFRP 铝合金复合管混凝土构件进行了弯曲性能试验和数值模拟。研究表明, 四面包裹 CFRP 的构件表现出更高的抗弯刚度和承载力, CFRP 有效地延缓了铝合金管凸屈曲的发生。Chen 等^[13]提出用 CFRP 加固铝合金管海洋混凝土柱, 并通过轴压试验和有限元分析证明, 碳纤维布能有效缓解铝合金管的屈曲; Chen 等^[14-15]研究试件的制备过程将碳纤维布切成设计的宽度和长度。

上述研究表明, CFRP 铝合金复合管混凝土复合构件具有良好的承载力、刚度和稳定性。然而, 现有的研究主要集中在矩形和圆形截面上, 在圆形端部截面的约束特性和工作机制方面研究较少。因此, 本研究对 8 根圆端 CFRP 铝合金管混凝土柱进行了轴压试验, 分析了 CFRP 带间距、CFRP 带宽度和 CFRP 层数对其轴压性能的影响规律。

1 试验概况

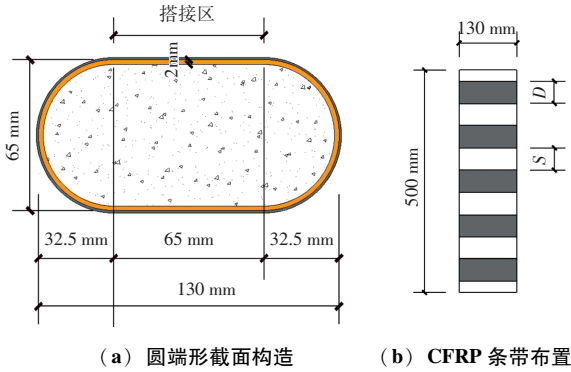
1.1 试件设计及制作

共设计了 7 根 CFRP 条带加固圆端铝合金管混凝土 (CREAC) 柱和 1 根不含 CFRP 条带的对比试件。重点分析了在保持 CFRP 用量不变的情况下, CFRP 带的间距 (S) 和宽度 (D) 的影响。此外, 还研究了 CFRP 带宽度和层数对 CREAC 柱力学性能的影响。所有试样的长度 (H) 为 500 mm, 横截面设计为长 130 mm、宽 65 mm 的圆形端部形状。圆形端部形状的横截面由两个半圆和一个正方形组成。图 1 为试件的界面形式, 表 1 为试件的设计参数。

参考 Chen 等^[14-15]的研究成果试件的制备过程如下: 将碳纤维布切成设计的宽度和长度。每个 CFRP 带都应该重叠, 选择 65 mm 的搭接长度, 如图 2 (a) 所示。

使用 CFRP 浸渍黏合剂的组合, 以设计间隔将 CFRP 带粘贴到铝合金管的表面上。浸渍的黏合剂的 A 和 B 黏合剂的比例为 1:2。

在混凝土浇筑过程中,使用振动棒来确保混凝土的密实度。加载前,将试样两端打磨平整,以避免加载过程中出现偏心,如图 2 所示。



(a) 圆端形截面构造 (b) CFRP 条带布置

图 1 试件构造

Fig. 1 Specimen construction

表 1 试件参数设计

Table 1 Specimen parameter design

试件编号	CFRP 层数	CFRP 条带宽度 D/mm	CFRP 条带间距 S/mm	CFRP 使用面积/ mm^2
CA25-25	1	25	25	83 525
CA50-50	1	50	50	83 525
CA100-100	1	100	100	83 525
CA125-125	1	125	125	83 525
CA100-50	1	100	50	100 230
CA150-50	1	150	50	100 230
CA100-100-2	2	100	100	167 050



(a) 试件浇筑 (b) 试件养护

图 2 试件制作过程

Fig. 2 Specimen preparation process

1.2 试验材料

试验采用 C35 混凝土,制作了 3 个立方体标准试块并与试件同条件养护,配合比见表 2。并在试件加载前一天进行测试,其立方体抗压强度 f_{cu} 为 36.8 MPa。铝合金管材性试样按 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验》进行拉伸试验,以残余应变为 0.2% 对应的强度 $f_{0.2}$ 作为条件屈服强度。铝合金力学性能见表 3。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportion

混凝土强度等级	水泥/kg	砂/kg	石/kg	水/kg	水灰比
C35	565	718	1 076	232	0.41

表 3 铝材性能

Table 3 Aluminum material properties

铝管类型	$f_{0.2}/\text{MPa}$	f_u/MPa	伸长率 $\delta/\%$	弹性模量 E/GPa
100 × 50 × 2.5	195.2	217.4	10.31	67.5
115 × 45 × 5.0	199.7	209.2	13.22	66.2
120 × 30 × 2.0	201.4	211.5	11.21	67.1
130 × 65 × 2.0	197.3	214.1	12.43	68.2

1.3 加载装置及测点布置

图 3 为试验的加载示意图。试验在电液伺服压力机上进行。加载制度采用 2 mm/min 的位移控制。当承载力降至峰值承载力的 50% 左右时,试验终止。为了监测试样的轻微变形并进一步分析,在试样的中点布置了横、纵两个电阻应变片。

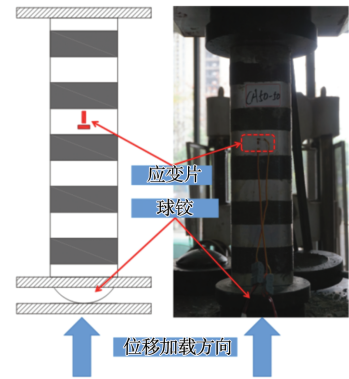


图 3 加载装置及测点布置

Fig. 3 Loading device and measurement point layout

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及破坏形态

图 4 为典型试样的破坏过程。在弹性阶段(点 1),圆端形铝合金管和混凝土共同承受轴向荷载,荷载-位移曲线呈线性。进入塑性阶段(点 1~点 2),铝合金管发生屈服,平面部分发生屈曲,此时 CFRP 开始发挥约束作用。随着 CFRP 达到极限强

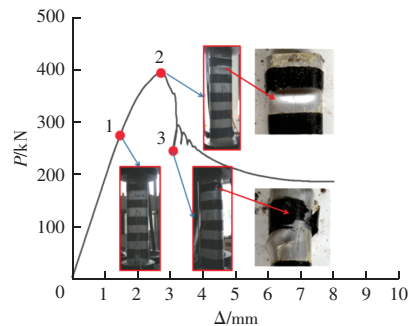


图 4 破坏过程

Fig. 4 Destruction process

材料科学

度并断裂, 荷载迅速减小(第3点), 随后铝合金管表现出塑性, 导致荷载逐渐减小。

图5为所有试样的最终破坏形态。无CFRP的试件在铝合金管表面发生屈曲, 屈曲高度接近试件中部。大多数用CFRP条带加固的试件在两端都出现了铝合金管的屈曲, 总体上表现出显著的强约束, 并且所有试件都因CFRP撕裂而损坏, 如图6所示。CA50-50和CA100-100中铝合金管的凸起位置与CA0-0试样相似, 而CA125-125与CA25-25相似。原因是CFRP的间距和宽度的增加, 导致不受CFRP约束区域的刚度变化不均匀。因此, 不均匀的约束会导致应力集中, 导致类似于CA0-0的屈曲。CA125-125试样尽管具有较大的CFRP带间距, 但也具有较大的宽度, 这防止了试件高度方向多次刚度变化, 因此保持了较强的约束。



图5 最终破坏形态
Fig. 5 Final destructive form

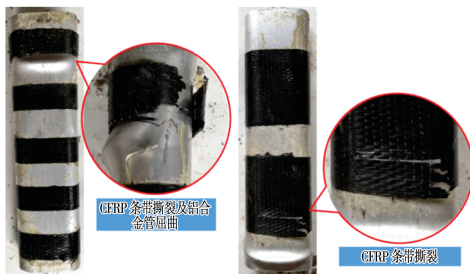
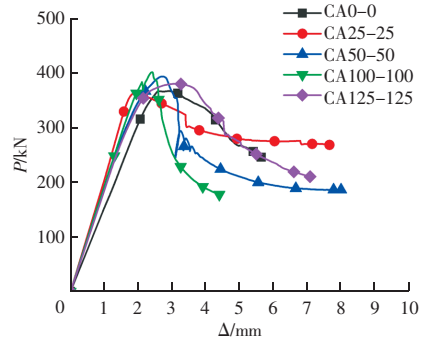


图6 细部破坏形态
Fig. 6 Detailed damage patterns

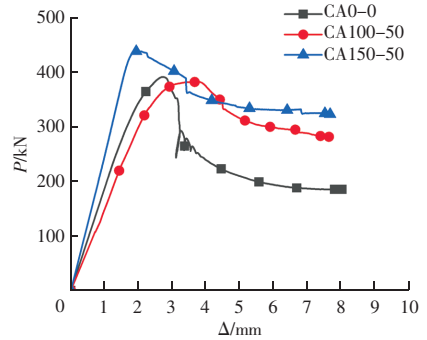
2.2 荷载-位移曲线

图7给出了所有试件的轴向荷载-位移曲线, 根据不同的变化参数分为三组。所有试件均经历了弹性阶段、塑性阶段和陡降阶段。荷载的骤降是因为铝合金管的屈曲和CFRP带的断裂。如图7(a)所示, 使用CFRP条带增强后, 曲线的初始斜率显著增加, 表明试样的轴向压缩刚度显著增强。图7(b)表明, 随着CFRP宽度的增加, 试样的峰值点增大, 变形能力增加。由图7(c)可知, CFRP条带层数的

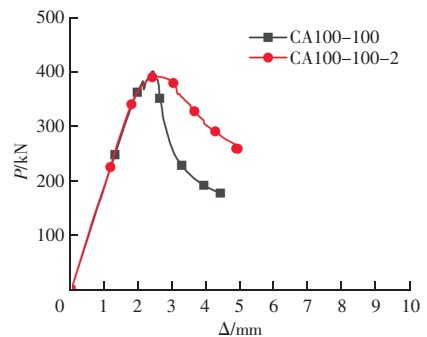
增加对轴压刚度和承载力影响最小, 但在达到峰值后的陡降速度减小。这是因为CFRP层限制了混凝土并提高了其延性。



(a) CFRP用量不变



(b) CFRP宽度变化



(c) CFRP层数变化

图7 荷载-轴向位移曲线

Fig. 7 Load-axial displacement curve

2.3 极限承载力及延性

表4给出了所有试件的峰值荷载 P_p 及延性系数 μ , μ 采用等能量法计算^[16], 计算方法如下:

$$\mu = \frac{\Delta_{85\%}}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: $\Delta_{85\%}$ 为当承载力降低至 P_p 的85%时的位移, Δ_y 为屈服位移。

由表4可知, 由于CFRP的约束作用, 所有试件的轴压承载力均大于对照试件CA0-0。其中CA150-

50 轴压承载力最高, 混凝土受约束最强。基于不同的变量, 得出以下结论:

(1) 在相同面积的 CFRP 的情况下, 随着 CFRP 条带宽度和间距的增加, CFRP 条的峰值承载力呈现先增大后减小的趋势。与 CA25-25 相比, 轴压承载力增加了 4.2%~10.0%, 其中 CA100-100 的承载力最高。延性出现降低, 与 CA25-25 相比, 延性降低了 26.5%~35.4%。原因为具有较大宽度和间距的 CFRP 条带数量较少, 这削弱了对混凝土环向约束, 因此降低了对混凝土的多轴约束。此外, 减少条带的数量会导致容易发生局部屈曲, 导致轴向抗压承载力和延性降低。只有 CA25-25 表现出大于 CA0-0 的延展性, 增加了 7.2%。这表明, 在试验范围内, CFRP 带的建议宽度和间距为 100 mm。

(2) 当 CFRP 带的间距保持不变, 其宽度对轴向抗压承载力的影响最小, 小于 3%。然而, 增加 CFRP 带的宽度显著提高了延性。与 CA50-50 相比, CFRP 带宽度为 100、150 mm 试件的延性分别提高了 26.9%、36.1%。因此, CA100-50 和 CA150-50 含有相同量的 CFRP, 表明加宽 CFRP 有利于提高延性。

(3) 增加 CFRP 层数对提高承载力的影响有限, 当 CFRP 带的层数由 1 层提高至 2 层时, 承载力仅增加了 2.6%。原因为 CFRP 条带之间的宽间距, 导致无 CFRP 的区域更容易受到损坏, 从而限制了承载力的提高。对于延性, CFRP 带的层数最初会降低延性, 但随后会增加。失效分析表明, 1 层 CFRP 通过条带断裂发生脆性失效, 而 2 层 CFRP 则通过铝合金管屈曲发生延性失效, 导致延性发生显著变化。

表 4 试验结果
Table 4 Test results

试件编号	P_p/kN	μ	$K/(kN \cdot mm^{-1})$
CA0-0	365.6	1.79	153.4
CA25-25	368.6	1.92	204.0
CA50-50	392.2	1.41	189.2
CA100-100	400.0	1.24	194.2
CA125-125	379.1	1.38	184.9
CA100-50	384.2	1.79	150.5
CA150-50	390.9	1.92	204.5
CA100-100-2	410.5	1.74	198.9

2.4 轴压刚度退化

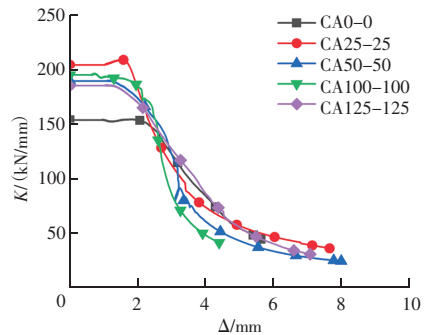
图 8 给出了所有试样的刚度退化曲线, 表 5 给出了每个试样的初始轴压刚度 (K)。 K 的计算方法为轴向荷载-位移曲线上 $0.4P_p$ 处的割线刚度。所有试

样的刚度退化曲线都呈现出相似的形状, 当轴向位移达到约 2 mm 时, 刚度显著降低。随着轴向位移增加到 4 mm, 退化速度逐渐减慢, 割线刚度的变化不明显。除了 CA100-50 中的试验误差外, 其余试件的轴压刚度都超过了 CA0-0。当 CFRP 的宽度为 150 mm, 间距为 50 mm 时, 柱的轴压刚度最大, 增加了 33.3%。因为 CFRP 的存在显著提高了铝合金的刚度。然而, CFRP 断裂后, 铝合金的塑性得到了充分利用, 导致刚度退化曲线重叠。根据不同的变化参数, 可以得出以下结论:

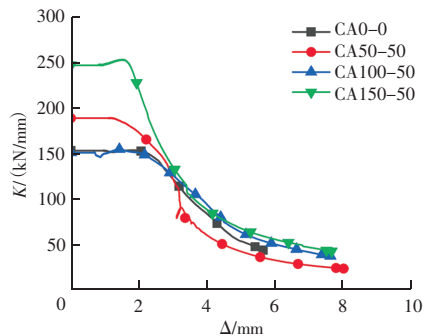
(1) 在相同的 CFRP 用量下, 减少 CFRP 条带的数量会使试件的轴压刚度波动减小, 最大减小 9.4%。减少 CFRP 条带的数量会降低铝合金管的完整性, 从而导致横截面刚度不均匀。

(2) 增加 CFRP 带的宽度对提高轴压刚度有显著影响。因为较宽的 CFRP 增加了加固面积, 从而增强了 CFRP 铝合金管的完整性。

(3) 增加 CFRP 的厚度并不能显著提高轴向压缩刚度, 仅增加 2.4%。CFRP 的主要功能是增强对混凝土的约束, 而轴压刚度主要由铝合金管提供。因此, 通过增加 CFRP 的厚度来提高轴压刚度是有限的。

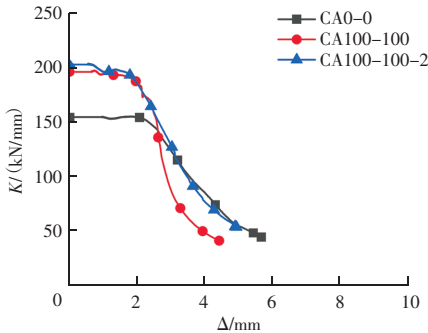


(a) CFRP 用量不变



(b) CFRP 宽度变化

材料科学



(c) CFRP 层数变化
图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curve

3 结论

提出使用 CFRP 条带加固圆端形铝合金管混凝土柱, 以解决铝合金强度低、模量低所带来的力学性能问题。通过单轴受压试验研究了组合柱的力学性能, 得到以下结论:

(1) CFRP 条带的存在延缓了试件的失效, 构件主要破坏形态为圆端形铝合金管的屈曲和 CFRP 的断裂。当 CFRP 的间距和宽度均为 125 mm 时, 约束效果较好。

(2) CFRP 的存在可以使圆端形铝合金管混凝土柱的轴压承载力最大提高 15.3%。当 CFRP 用量相同时, 随着 CFRP 条带数量减少, 整体轴向承载力和延性呈下降趋势。当 CFRP 条带间距不变时, CFRP 带宽度增加对轴向抗压承载力的影响小于 3%, 但会使延性增加 36.1%。增加 CFRP 层数只能使轴压承载力提高 2.6%, 但当增加两层 CFRP 带时, 会提高延性。

参 考 文 献

[1] ZHAO H, ZHANG W, WANG R, et al. Axial compression behaviour of round-ended recycled aggregate concrete-filled steel tube stub columns (RE-RACFST): Experiment, numerical modeling and design [J]. *Engineering Structures*, 2023, 276: 115376.

[2] ZHANG Q, FU L, XU L. An efficient approach for numerical simulation of concrete-filled round-ended steel tubes [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 170: 106086.

[3] DING F, ZHANG T, LIU X, et al. Behavior of steel reinforced concrete-filled square steel tubular stub columns under axial loading

[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 737-748.

[4] WANG J, SHEN Q, WANG W. Performance and design of essentially-loaded concrete-filled round-ended elliptical hollow section stub columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 150: 99-114.

[5] BU J, LIU Q, YU Y, et al. Axial compression performance and bearing capacity calculation of round-ended concrete-filled aluminum tube column [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13 (13): 7918.

[6] LUNDBERG S. Use of Aluminium structures in the offshore industry [J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 710: 22-31.

[7] YOU X, XING Z, JIANG S, et al. A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering [J]. *Developments in the Built Environment*, 2024, 17: 100319.

[8] DING F, LIAO C, WANG E, et al. Numerical investigation of the composite action of axially compressed concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns [J]. *Materials*, 2021, 14 (9): 2435.

[9] ZHOU F, YOUNG B. Concrete-filled aluminum circular hollow section column tests [J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, 47 (11): 1272-1280.

[10] ZHOU F, YOUNG B. Tests of concrete-filled aluminum stub columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46 (6): 573-83.

[11] FENG P, HU L, QIAN P, et al. Buckling behavior of cfrp aluminum alloy hybrid tubes in axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2017, 132: 624-636.

[12] ZHU Y, CHEN Y, HE K, et al. Flexural behavior of concrete filled shs and rhs aluminum alloy tubes strengthened with CFRP [J]. *Composite Structures*, 2020, 238: 111975.

[13] CHEN Z, XU W, ZHOU J. Mechanical performance of marine concrete filled cfrp-aluminum alloy tube columns under axial compression: experiment and finite element analysis [J]. *Engineering Structures*, 2022, 272: 114993.

[14] CHEN Z, PANG Y, XU R, et al. Mechanical performance of ocean concrete-filled circular CFRP-steel tube columns under axial compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 198: 107514.

[15] CHEN Z, QIN W, LIANG Y, et al. Axial compressive performance of seawater sea sand concrete-filled cfrp-stainless steel tube short columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130501.

[16] CHEN Z, XU R. Experimental and numerical investigation on self-compacting concrete column with cfrp-pvc spiral reinforcement [J]. *Earthquakes and Structures*, 2022, 22 (1): 39-51.