

持载对 FRP-混凝土-钢双壁空心柱轴压承载能力影响

陈光明¹, 赵程¹, 成彤², 李召兵², 谢攀³, 饶琛辉¹

(1. 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;

2. 广州市城建规划设计院有限公司, 广东 广州 510230; 3. 华南农业大学 水利与土木工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: FRP-混凝土-钢双壁空心柱(简称 DSTC)是由香港理工大学滕锦光教授提出一种新型组合构件, 具有受力性能良好、施工方便、耐腐蚀性能优越等系列优点。已近期成功将 DSTC 作为受力构件应用于桥墩。将 DSTC 应用于桥墩等结构主要受力构件时, 持载期间的长期变形性能及持载对 DSTC 承载能力的影响是一个亟待厘清的关键技术问题。以此为背景, 开展了持载对 FRP-混凝土-钢双壁空心柱轴压力学性能影响试验研究。主要的研究参数包括: 钢管的厚度、GFRP 管的纤维层数、是否带焊钉及轴压比。研究结果表明: 当 DSTC 轴压比为 0.3 及 0.4 时, 持载对 DSTC 轴压承载力的影响非常有限。

关键词: FRP-混凝土-钢双壁空心柱; 持载; 徐变; 轴压; 承载力

中图分类号: TU398⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0284-07

Effects of sustained load on the axial load-carrying capacity of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular column

CHEN Guangming¹, ZHAO Cheng¹, CHENG Tong², LI Zhaobing², XIE Pan³, RAO Chenhui¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

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

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular column (DSTC), with numerous advantages such as outstanding load-carrying capacity, ease in construction, excellent corrosion resistance etc., is a new hybrid composite member invented by Prof. Jin-Guang Teng of The Hong Kong Polytechnic University. Recently, the authors' research group has successfully implemented the application of the DSTC in bridge piers. When DSTCs are applied to the main load-carrying structural members such as piers, the long-term deformation performance under sustained load and the effect of the sustained load on the load-carrying capacity of the DSTC are key technical problems to be clarified. Against this background, the experimental study on the effects of sustained load on compressive behavior of the DSTC has been carried out. The main research parameters include: thickness of steel tube, thickness of GFRP tube, deployment of shear studs, and axial compression ratio of the sustained load. The test results show that: under the investigated axial compression ratios of 0.3 or 0.4, the effects of sustained load on the axial load-carrying capacity of DSTC are very limited.

Key words: FRP-steel-concrete double-skin tubular column; sustained load; creep; axial compression; load-carrying capacity

FRP (Fiber-reinforced polymer, 简称 FRP 或“复材”)是一种高性能树脂基复合材料, 根据纤维种类不同一般分为碳纤维 FRP(CFRP)、玻璃纤维 FRP (GFRP)、玄武岩纤维 FRP (BFRP)等^[1-2]。FRP-混凝土-钢双壁空心柱 (FRP-concrete-steel

double skin tubular column, 简称 DSTC 或“双壁空心柱”)是由香港理工大学滕锦光教授提出的一种新型组合结构, 由外 FRP 管、内钢管以及填充在两者之间的混凝土夹层组成^[3-4]。在 DSTC 内, 由于内侧钢管与外侧 FRP 管能对混凝土形成约束

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51978281, 51778246)、广东省现代土木工程技术重点实验室资助项目(2021B1212040003)

第一作者: 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

使混凝土处于三向受压状态, 其强度及变形能力能获得显著提升, 同时因钢管的向外变形被混凝土及 FRP 管约束, 其向外的局部屈曲被抑制, 钢材强度利用率可获得提升; 此外, FRP 管及钢管还可以作为施工时的模板, 能节省支模费用、缩短施工工期; 在外侧的 FRP 管还可以作为耐腐蚀保护壳保护内侧钢管免受环境腐蚀. 前期研究结果表明: 轴压时, 双壁空心柱具有良好的承载能力、变形能力及延性^[5-8]. 偏心距增大时, 承载力会有一定程度下降但变形能力会增加, 双壁空心柱仍具有较好的延性^[9-10]. FRP 管的存在能够使构件的延性及耗能能力得到提升^[11-12]. 综上所述, DSTC 结构短期力学性能及变形性能十分优异, 具有良好的工程应用前景.

徐变现象在混凝土结构中十分普遍. 过大的徐变变形会对混凝土结构造成诸多不利的影响^[13]. 如影响结构的正常使用等; 使偏心受压柱产生附加弯曲, 导致稳定问题; 使钢-混凝土组合结构截面发生应力重分布, 导致部分材料提前破坏. 目前, 学术界对于钢管混凝土柱徐变性能研究较多. 现有研究结果表明: 钢管混凝土柱与 FRP 约束混凝土柱在持载应力水平较低时, 徐变变形与轴压比呈线性关系, 而处于较大持载应力水平时, 徐变发展呈非线性关系^[14-16]. 相对于未约束试件, FRP 约束混凝土柱持载后的变形能力略有下降, 但是承载力无明显变化, 长期变形明显减小且徐变趋于稳定状态时间更短, 一般 60 d 持载变形量已达到总变形量的 70% 及以上^[17-20].

作者课题组在近期已成功将 DSTC 作为受力构件应用于桥墩^[21]. 将 DSTC 应用于桥墩等受力构件时, 持载期间的长期变形性能及持载对 DSTC 承载

能力的影响亟待厘清. 本文对 DSTC 柱经长期持载后的轴压力学性能进行了初步试验研究, 并与未持载试件进行了对比, 分析了持载对试件的承载力、变形能力、初始刚度的影响. 本文的研究成果对促进 DSTC 在工程中的应用有一定的参考价值.

1 试验概况

1.1 试件设计、制作及试验步骤

为研究经过长期持载后 DSTC 柱轴压力学性能的变化情况, 本研究共设计了 11 根较大尺寸组合短柱试件(包括持载组与对照组), 如表 1 所示. 试件编号含义如下: CFFT 与 DSTC 分别表示两种不同的结构截面形式, 其中 CFFT 为 FRP 管约束混凝土, DSTC 为双壁空心柱试件; 字母 N 表示此批次试件浇筑的均为普通 C30 混凝土; 字母 G 表示 GFRP 管, 其后数据表示 GFRP 管的层数; 0.3 与 0.4 表示该试件核心混凝土初始试验轴压比(定义为混凝土应力与 28 d 圆柱体抗压强度的比值); 第一个 S 表示钢管, 其后数据表示钢管的壁厚(单位: mm), 第二个 S 表示该试件设置了抗剪栓钉(环向 8 个, 轴向每 200mm 布置一排); 试件编号尾部带有 * 的试件表示该试件为不进行持载的对照试件. 所有试件钢管外径均为 219 mm, GFRP 管内径为 300 mm, 高度均为 900 mm, 主要变化参数为 GFRP 管层数、钢管厚度、试件持载轴压比及是否布置栓钉. 钢管使用的钢材设计强度等级为 Q355C(参考 DSTC 桥墩^[20]用钢等级), 混凝土设计强度等级为 C30. 试件主要如表 1 所示, 构件横截面如图 1 所示. 前期持载试验装置如图 2 所示, 持载试验步骤详见赵程^[21]. 轴压破坏试验在持载 250 d 后进行, 加载装置如图 3 所示.

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of test specimens

试件编号	混凝土类型	GFRP 管层数	钢管厚度/mm	轴压比	栓钉	加载龄期 t_0 /d
CFFT-N-G12-0.3	C30	12	—	0.3	无	28
DSTC-N-G12-0.3-S6	C30	12	6	0.3	无	28
DSTC-N-G6-0.3-S6	C30	6	6	0.3	无	28
DSTC-N-G12-0.3-S12	C30	12	12	0.3	无	28
DSTC-N-G12-0.4-S6	C30	12	6	0.4	无	28
DSTC-N-G12-0.3-S6-S	C30	12	6	0.3	有	28
CFFT-N-G12*	C30	12	—	—	无	—
DSTC-N-G12-S6*	C30	12	6	—	无	—
DSTC-N-G6-S6*	C30	6	6	—	无	—
DSTC-N-G12-S12*	C30	12	12	—	无	—
DSTC-N-G12-S6-S*	C30	12	6	—	有	—

注: 钢管外径为 219 mm, GFRP 管内径为 300 mm, 试件高度均为 900 mm, “*”表示不持载对比试件.

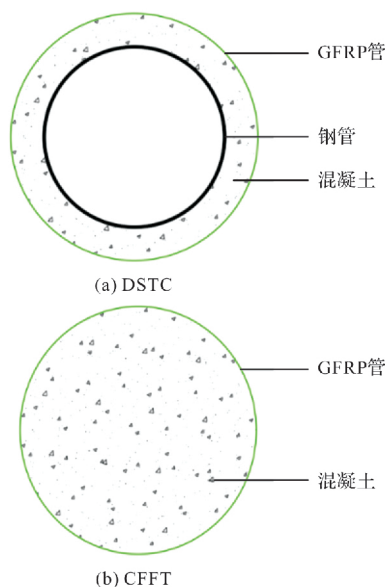


图1 试件截面示意图

Fig.1 Cross section of specimens



图2 持载及加载装置图.

Fig.2 Sustained loading device



图3 加载装置图

Fig.3 Loading device

1.2 试验材料力学性能

1.2.1 混凝土材料性能

混凝土的材料性能试验参考 ASTM-C469/C469M-14^[22] 规范, 具体试验操作过程见赵程^[21], 测得混凝土 28 d 圆柱体强度、弹性模量以及泊松比分别为 30.4 MPa、27.4 GPa、0.181.

1.2.2 钢管材料性能

本试验所用钢管为 Q355C 无缝钢管, 厚度有两种, 分别为 6 mm 和 12 mm. 参考 GB/T 228.1-2010 规范^[23], 每种厚度的钢管沿纵向各切割了 3 根狗骨形试样, 具体实验操作见赵程^[21], 测得钢材屈服强度分别为 402.5 MPa (6 mm 厚)、382.9 MPa (12 mm 厚); 弹性模量分别为 215.8 GPa (6 mm 厚)、212.8 GPa (12 mm 厚); 泊松比分别为 0.29 (6 mm 厚)、0.30 (12 mm 厚).

1.2.3 GFRP 管材料性能

本试验所采用的 GFRP 管为连云港中复连众公司制造, 主要有两种厚度, 分别为 12 层(名义厚度 6 mm)以及 6 层(名义厚度 3 mm), 纤维缠绕角度均为 80°. 参考柳钦试验结果^[24], 6 层及 12 层 GFRP 管轴向强度分别为 66.7 MPa、94.4 MPa; 6 层及 12 层 GFRP 管轴向弹模分别为 12.8 GPa、15.1 GPa; 6 层及 12 层 GFRP 管环向弹模分别为 41.7 GPa、41.5 GPa.

1.3 测量方案

本研究试件轴压加载在华南理工大学结构实验室 1 000 t 压力机上进行, 加载装置如图 3 所示. 为测量试件的变形及应变, 在 CFFT 及 DSTC 外 GFRP 管中部布置 4 对纵、横应变片(沿周长均布), 并且在 DSTC 试件内钢管外壁中部布置 4 对纵、横应变片(沿周长均布), 同时在 GFRP 管中部 300 mm 标距内每隔 90°安装量程 50 mm 量程位移计共四个以测量中部轴向变形, 此外还安装了两个位移计和用以测量试件全高轴向总变形. 加载方式全程采用位移控制, 参考柳钦^[24]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, 需对试件进行预压. 施加 10% 的预估极限荷载, 观察轴向应变片读数, 若试件上对称位置 2 个轴向应变片数据之差 10% 以内则证明试件对中. 然后按照预先定好的加载速率进行正式加载, 直到荷载下降至 50% 峰值荷载时停止加载.

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如图 4 所示.



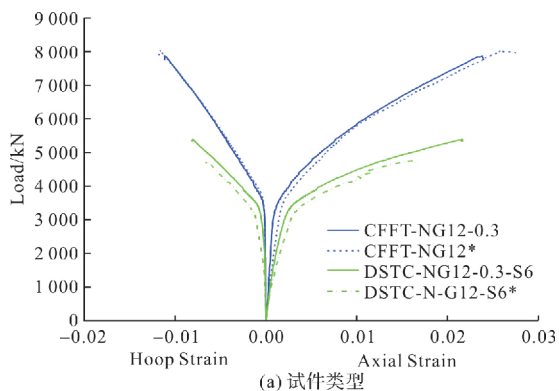
图4 典型破坏模式

Fig. 4 Typical failure mode

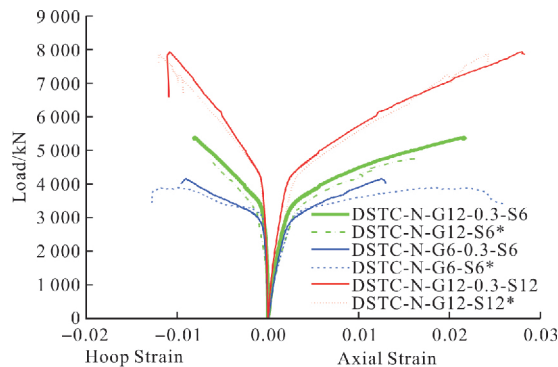
试验中观察到的破坏过程为:柱身中部区域最先出现 GFRP 管泛白,接着会出现树脂拉裂的声音;由于持载阶段对 GFRP 管进行了开孔处理用以监测混凝土徐变^[21],使其有了一定初始缺陷,故在进行轴压试验之前对开孔区用水泥砂浆进行了填补,并缠绕与 GFRP 管相等刚度的 CFRP 布。此外,为防止端部效应导致 GFRP 管提前破坏,对 GFRP 管端部也进行了 CFRP 条带加固。在加载的过程中最先出现 GFRP 管纤维断裂的位置为上述开孔部位所包 CFRP 布的上下两端,随着加载的进行,试件中部开始出现 GFRP 管纤维拉断,核心混凝土受到挤压呈现鼓出的趋势,两端 GFRP 也有拉断现象。对比持载及未持载试件的破坏模式(图4)发现,二者基本无差别。

3 荷载-位移曲线

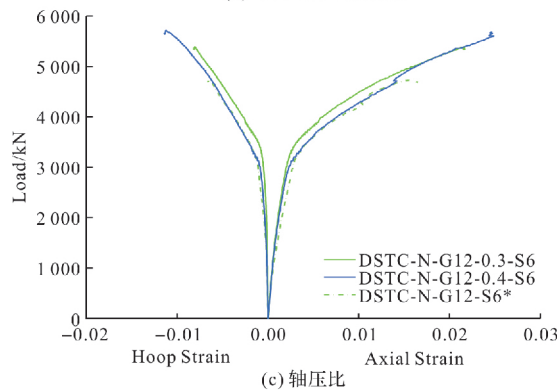
主要参数对试件的荷载-轴向应变曲线如图5所示。图中轴向应变由中部位移计测得位移转换而来。



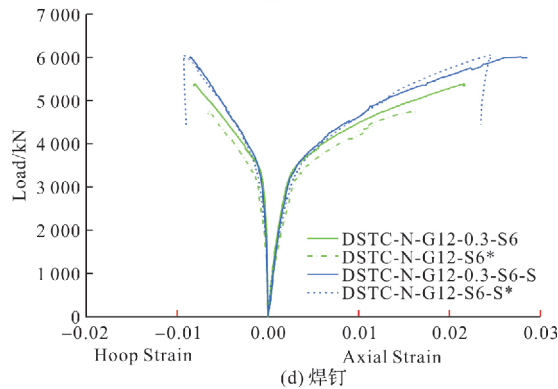
(a) 试件类型



(b) 钢管与FRP管层数



(c) 轴压比



(d) 焊钉

图5 荷载-应变曲线(标“*”对比试件)

Fig. 5 Load-strain curves (* refers to the reference specimen)

由图5中可知:(1)持载对荷载-轴向应变曲线的趋势的影响非常有限。(2)持载仅对同类试件极限状态(最大荷载及对应轴向应变)有轻微的影响,但是规律不明显,如:对CFFT试件,持载一般会小幅降低最大荷载及对应应变,见图5(a);对DSTC试件,持载一般会小幅增加承载力。具体而言,对GFRP层数较薄的DSTC试件(DSTC-N-G6-0.3-S6),持载后,其最大荷载有一定的提高,但是对应轴向应变却明显降低,见图5(b);当GFRP层数较多(DSTC-N-G12-0.3-S6)及钢管厚度较大时(DSTC-N-G12-0.3-S12),持载一般使试件最大荷载及对应轴向应变均有小幅度增加,且仅GFRP厚度增加(钢管厚度不增加),上述效应更加明显;增加轴压比能增加最大荷载及对应应变,而布置抗剪焊钉能增加最大荷载对应应变。持载对关键试验结果的影响见下一节(第4节)讨论。

4 关键试验结果分析及讨论

本研究的关键试验结果如表 2 所示。图 6~8 分别为最大荷载、最大荷载对应轴向应变、初始轴向刚度。需要说明的是,表 2 所示轴向刚度是通

过荷载-轴向应变曲线初始上升段两点($100\ \mu\epsilon$ 与 $0.4P_i$ 对应应变, P_i 为初始线性段与后期线性段之间的转折点,详见赵程^[21])之间的斜率近似估算确定。

表 2 关键试验结果
Tab. 2 Key test results

试件编号	P/kN		ϵ_a		$K_i/(10^6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1})$
	P_{cr}	P_k	$\epsilon_{a,cr}$	$\epsilon_{a,k}$	
CFFT-N-G12-0.3	6 330.0	7 873.0	12 242	23 817	4.49
CFFT-N-G12 *	6 300.0	8 040.6	13 233	26 050	3.12
DSTC-N-G12-0.3-S6	4 660.0	5 390.5	11 767	21 556	2.31
DSTC-N-G12-S6 *	4 035.0	4 747.3	8 250	16 033	1.79
DSTC-N-G6-0.3-S6	3 858.0	4 157.7	9 511	12 533	1.83
DSTC-N-G6-S6 *	3 300.0	3 892.6	4 450	9 275	1.88
DSTC-N-G12-0.3-S12	6 200.0	7 932.2	12 889	27 978	2.89
DSTC-N-G12-S12 *	5 500.0	7 868.1	9 554	24 246	2.40
DSTC-N-G12-0.4-S6	4 185.0	5 713.5	9 208	24 683	2.17
DSTC-N-G12-0.3-S6-S	4 900.0	6 012.2	11 900	27 833	1.92
DSTC-N-G12-S6-S *	4 860.0	6 054.4	11 667	24 445	1.99

注: P 为荷载, ϵ_a 为轴向应变(由中部轴向位移计测得),下标 cr 代表 GFRP 管初次开裂, k 代表峰值荷载, * 代表为对比试件。

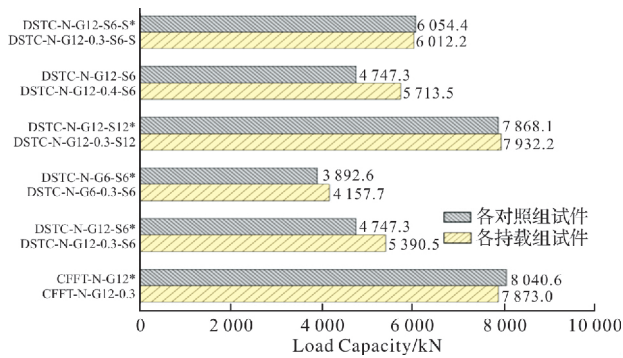


图 6 最大荷载柱状图对比

Fig. 6 Bar chart of maximum loads

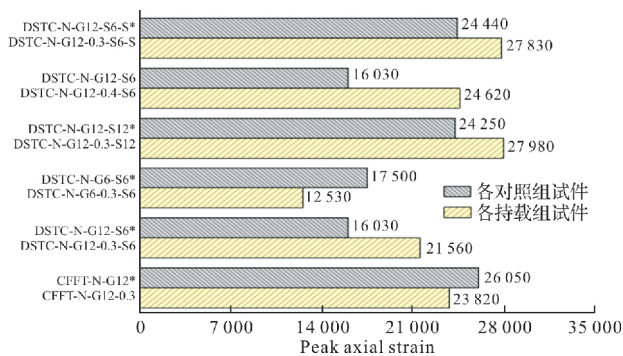


图 7 最大荷载对应应变柱状图对比

Fig. 7 Bar chart of axial strain at maximum load

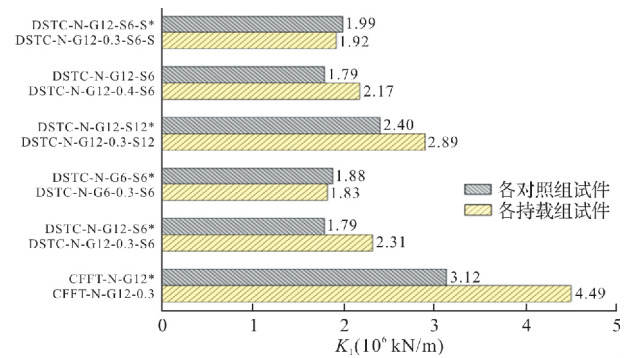


图 8 初始轴向刚度

Fig. 8 Bar chart of initial axial stiffness

由图 6 可知,持载使 CFFT 试件承载力有微弱减小趋势,但是使 DSTC 试件承载力有增加的趋势(增加最大为轴压比为 0.4 试件,增加 20.4%)。图 7 显示,持载使 CFFT 试件最大荷载对应应变有微小减小,而使 DSTC 试件最大荷载对应位移有微小增加的趋势(GFRP 层数为 6 层的试件除外)。由图 8 可知,持载后 CFFT 试件的初始刚度有明显增加的趋势(最大增加比例为 43.9%),而使 DSTC 试件的初始刚度有小幅增加趋势(最大增加比例为 29.1%)或基本不变(如带焊钉的试件及轴 GFRP 管层数 6 的试件)。从表 2 可

知,持载使GFRP管的开裂荷载及对应的应变有增加的趋势(后者更加明显),对CFFT试件此规律不明显,可能原因在于持载阶段,在GFRP管上开洞监测混凝土徐变导致轴压试验中开裂应变增加。

5 结论

本文对6个较大尺寸持载试件(其中5个试件为DSTC,1个为CFFT试件)进行长期持载后的轴压力学性能试验,并将其与5个不持载的试件(其中4个试件为DSTC,1个为CFFT试件)进行了对比研究。从本文的试验结果及其分析,可以得到如下结论:

(1)持载对DSTC及CFFT破坏模态几乎没有影响,两种构件在持载及未持载情况下,极限状态均由GFRP管中部的纤维拉断控制;

(2)持载对DSTC及CFFT荷载-轴向应变曲线的影响非常有限,基本不改变曲线的形状及趋势;

(3)持载使DSTC试件的承载力及变形能力均有较小幅度增加趋势,且后者增加的幅度更加明显;持载使CFFT的承载力及变形能力有微小的降低;持载使CFFT及DSTC的初始刚度均有增加的趋势,但是存在试验数据离散现象。

上述初步实验结果表明:DSTC长期持载对其承载力及变形能力的影响非常有限,因此,在轴压比为0.4及以内时将其用于受力结构长期持载时安全及可靠的。后期需要加强对大轴压比持载后构件力学性能的研究。

参考文献 References

- [1] 叶列平,冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006(3): 24-36.
- [2] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 1-11.
- [3] TENG J G, YU T, WONG Y L. Behavior of hybrid frp-concrete-steel double-skin tubular columns[C] // Proceedings of the 2nd international conference on FRP composites in civil engineering. International Institute for FRP in Construction(IIFC), Adelaide: IIFC 2004.
- [4] TENG J G, YU T, WONG Y L, et al. Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: Concept and behavior [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(4): 846-854.
- [5] WONG Y L, YU T, TENG J G, et al. Behavior of FRP confined concrete in annular section columns[J]. Composites Part B: Engineering, 2008(39): 451-466.
- [6] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管长柱轴心受压试验[J]. 混凝土, 2006(9): 31-34.
- [7] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 104-113.
- [8] FANGGI B A L, OZBAKKALOGLU T. Compressive behavior of aramid FRP-HSC-steel double-skin tubular columns [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 554-565.
- [9] YU T, WONG Y L, TENG J G. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to eccentric compression[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(5), 961-974.
- [10] XIE P. Behavior of large-scale hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to concentric and eccentric compression[D]. Hong Kong: The Polytechnic University, 2018.
- [11] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管柱抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2008(3): 29-36.
- [12] 张冰,黄涛. FRP管-混凝土-钢管组合双壁空心柱抗震性能的研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 140-145.
- [13] 韩林海,陶忠,刘威,陈宝春. 长期荷载作用下钢管混凝土轴心受压柱的变形特性[J]. 中国公路学报, 2001(2): 54-59.
- [14] KWON S H, KIM Y Y, KIM J K. Long-term behavior under axial service loads of circular columns made from concrete filled steel tubes[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(2): 87-99.
- [15] 付学宝. 高应力状态下钢管混凝土短柱轴压长期性能

- 研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- FU Xuebao, Study on long-term performance of CFST short column under high stress state under axial compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [16] 于清,韩林海,张铮.长期荷载作用对 FRP 约束混凝土轴心受压构件力学性能的影响[J]. 中国公路学报, 2003,16(3):58-63.
- YU Qing, HAN Linhai, ZHANG Zheng. Effects of long-term loading on mechanical properties of FRP confined concrete axial compression members[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 58-63.
- [17] WANG Y F, ZHANG D J. Creep-effect on mechanical behavior of concrete confined by frp under axial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009 (11), 1315-1322.
- [18] 万里.长期荷载作用下 CFRP 约束混凝土的力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- WAN Li, Mechanical properties of CFRP-confined concrete under long-term loading [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [19] ZHANG D J, WANG Y F, MA Y S. Compressive behaviour of FRP-confined square concrete columns after creep[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 1957-1963.
- [20] 陈光明,陆奕辰,谢攀,等. FRP-混凝土-钢双壁空心桥墩分析及设计方法研究[J]. 中国公路学报,2022,35 (2):12-38.
- CHEN Guangming, LU Yichen, XIE Pan, et al. Analysis and Design Method of FRP- Concrete-Steel Double skin tubular Piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 12-38.
- [21] 赵程. FRP-混凝土-钢双壁空心柱轴压徐变性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- ZHAO Cheng, Experimental study on creep performance of FRP-concrete-steel double skin tubular column under axial compression[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [22] 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
- [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. Tensile testing of metallic materials (Part1: Test methods 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 256 页)

- [13] 北京市规划委员会. 装配式剪力墙结构设计规程: DB11/1003—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2014.
- Beijing Planning Commission. Design specification for precast concrete shear wall structure: DB11/1003—2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [14] 黑龙江省住房和城乡建设厅. 预制装配整体式房屋混凝土剪力墙结构技术规范: DB23/T1813—2016[S]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2016.
- Heilongjiang Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical specification for concrete shear wall structure assembled with precast components: DB23/T1813—2016[S]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2016.
- [15] SAGAN V, GERGELYE P, WHITE R N. Behavior and design of noncontact lap splices subjected to repeated inelastic tensile loading[R]. Report No. 858-5. Ithaca : Department of Structural Engineering Research, Cornell University, 1988.
- [16] 徐有邻,沈文都. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-37.
- XU Youlin, SHEN Wendu. Experimental study on bond anchorage performance of reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26-37.
- [17] 高丹盈,陈刚, Hadi Muhammad Najib Sadraddin,等. 钢筋与钢纤维混凝土的黏结-滑移性能及其关系模型[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7):132-139.
- GAO Danying, CHEN Gang, Hadi Muhammad Najib Sadraddin, et al. Bond-slip behavior and constitutive model between rebar and steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7):132-139.

(编辑 沈 波)