

环状钢骨-钢管混凝土柱轴压性能试验研究

谢洪平¹, 贾振宏², 韩超¹, 朱姣¹, 罗柯榕³, 李布辉²

(1. 国网江苏省电力有限公司建设分公司, 江苏 南京 210011; 2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;
3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 为了研究环状钢骨-钢管混凝土柱轴压承载力以及相关设计参数对轴压性能的影响, 对 4 个普通钢管混凝土柱及 12 个环状钢骨-钢管混凝土柱进行了卧位加载试验, 并对破坏模式、轴向荷载-位移曲线、轴向荷载-侧向位移曲线及应变进行了分析, 试验结果表明: 与普通钢管混凝土柱相比, 环状钢骨-钢管混凝土柱承载力最大可提高 20.39%, 轴向刚度可提高约 82.27%; 整体环向板在试验间距范围内对试件承载力影响较小, 对轴向刚度提升幅度较大; 内配环状钢骨能够显著改变试件的破坏模式, 且内部环状钢片和整体环向板在整个加载过程中全程参与受力, 对试件整体的承载力和刚度都有着一定的贡献。

关键词: 钢管混凝土柱; 环状钢骨; 轴压承载力; 卧位试验

中图分类号: TU398.9; TU311.41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0524-09

Experimental study on the axial compressive bearing capacity of concrete-filled steel tubular stub column reinforced with annular steel

XIE Hongping¹, JIA Zhenhong², HAN Chao¹, ZHU Jiao¹, LUO Kerong³, LI Buhui²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Construction Branch, Nanjing 210011, China;

2. Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd. of CEEC, Nanjing 211102, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to study the axial compressive bearing capacity of the annular steel-reinforced concrete-filled steel tubular column and the influence of related design parameters on the axial compressive performance, horizontal loading tests are carried out on four ordinary concrete-filled steel tubular (CFST) columns and annular steel-reinforced CFST columns. The failure mode, axial load-displacement curves, axial load-lateral displacement curves and strain are analyzed. The test results show that the maximum bearing capacity of annular steel reinforced concrete-filled steel tubular columns can be increased by 18.67%, and the axial stiffness can be increased by about 82.27% compared with ordinary CFST columns. The integral annular plates within the range of the test distance has little effect on the bearing capacity of the specimen, and has a large increase in the axial stiffness. The failure mode of the specimen can be obviously changed after the annular steel is added. The inner annular steel sheet and the integral annular plate participate in the whole loading process, which makes a certain contribution to the overall bearing capacity and stiffness of the specimen.

Key words: concrete-filled steel tubular columns, annular steel, axial compressive bearing capacity, horizontal loading test

近年来, 随着国民经济的迅猛发展、国家电网不断升级、“新基建”的推进, 特高压输电线塔、大跨越输电工程等项目逐渐增加, 部分输电工程甚至要跨越山川河流。跨越塔作为输电工程的中心枢纽, 必将对其在结构性能上提出严峻挑战。因此, 钢骨-钢管混凝土柱作为一种高强、高性能

组合构件逐渐被广泛地应用在跨越塔主材中。钢骨-钢管混凝土柱是在普通钢管混凝土柱的基础之上内配钢骨而形成的一种新型组合构件^[1], 内配钢骨一方面可提高钢管混凝土柱的承载力、刚度和延性, 同时内部混凝土的约束作用也可防止钢骨局部发生屈曲^[2]。目前, 内配钢骨形式种类繁多,

收稿日期: 2022-03-01

修改稿日期: 2022-08-22

基金项目: 国家电网有限公司科技资助项目(SGJSJSOXXMJS2000259)

第一作者: 谢洪平(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事送变电土建设计研究。E-mail: 947820126@qq.com

常见的有内配钢筋、内配钢管(多重)、内配工字型钢、内配十字钢骨及内配角钢等,如图1所示。基于不同形式的内配钢骨钢管混凝土柱,国内外学者对其轴压性能展开了各自的研究,取得了一定的成果。

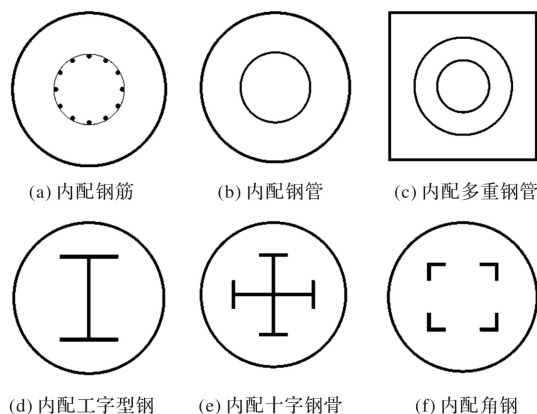


图1 内配钢骨形式

Fig. 1 Forms of internal reinforced steel

Kato^[3]对内配型钢的钢管混凝土柱进行了轴向加载试验研究,并得到了该类型组合柱的柱子曲线。Hamidian^[4]研究了内配螺旋钢筋钢管混凝土柱的轴压性能,并与普通钢管混凝土柱进行了比较,结果表明:内配螺旋钢筋钢管混凝土柱具有较高的承载和变形能力。Ebrahim^[5]提出了一种内配蜂窝十字型的钢管混凝土柱并开展了轴压试验和数值模拟分析,揭示了该柱子的破坏形态、应力分布和受力机理。Mizan^[6]基于纤维模型法对内配钢管的钢管混凝土柱进行了数值模拟分析,并与试验结果进行相互验证,提出了相关设计公式。

国内学者王清湘等^[7-9]较早地研究了钢骨-钢管混凝土柱的工作机理、延性和极限承载力,讨论了套箍指标、配骨指标及长细比等因素对其轴压性能的影响。丁发兴等^[10]采用有限元法和弹塑性法对钢骨-钢管混凝土轴压短柱的相互作用机理进行了分析并基于极限平衡理论建立了轴压短柱承载力计算公式。万城勇等^[11]对13根配筋钢管混凝土短柱进行了轴压试验,分析了试件的破坏特征、极限荷载和荷载-位移曲线,研究了纵筋强度、配箍率、配筋率等各参数对轴压性能的影响。查晓雄等^[12]根据统一理论提出了内配异心及多层钢管混凝土柱的承载力统一公式。王军^[13]基于浙江舟山500 kV联网输变电工程,系统研究了内配格构式角钢圆钢管混凝土构件的轴(偏)心受拉、轴(偏)心受压及受弯性能并提出了对应的承载力计算公式。

从上述研究可以发现,钢骨-钢管混凝土柱可充分发挥外包钢管和内填混凝土的组合作用,表现出了良好的承载能力和变形能力,但由于内配钢骨形式的不同,其力学性能各有差异,且内部钢骨往往缺少与外侧钢管的相互连接,存在定位安装困难等问题,难以应用在大管径的结构柱中。由此,本文结合江苏凤城至梅里385 m超大型跨江输电塔工程,综合设计和施工等方面因素提出了一种适用于大管径的新型环状钢骨-钢管混凝土柱,以期通过外钢管与内配钢骨对核心混凝土的双重约束作用提高组合柱整体受力性能,并通过轴压试验,对9根新型环状钢骨-钢管混凝土柱的力学性能和4根传统钢管混凝土柱开展了研究。

1 工程概况

本文背景工程为凤城至梅里长江大跨越工程,其中,跨越塔全高385 m,根部主材最大管径达到了 $\Phi 2100 \times 32$,建成后杆塔高度将位居世界第一,如图2所示。其中,塔身117 m以下主材采用本文所提出的新型环状钢骨-钢管混凝土柱形式,三维模型及实体图如图3所示。新型组合柱以环状钢片、整体环向板以及管内纵向加劲肋而组成的环状钢骨为内配加劲件;环状钢片以圆弧形的方式均匀布置在整体环向板的四周,共计4片,每个环状钢片圆心角为 45° ,管内壁设有8道通长的纵向加劲肋,其中4道通过连接板与环状钢片的外伸端板进行螺栓连接,可对环状钢片及整体环向板起到约束和支撑固定作用,同时也可提高钢管的侧向刚度,防止其过早地发生屈曲。

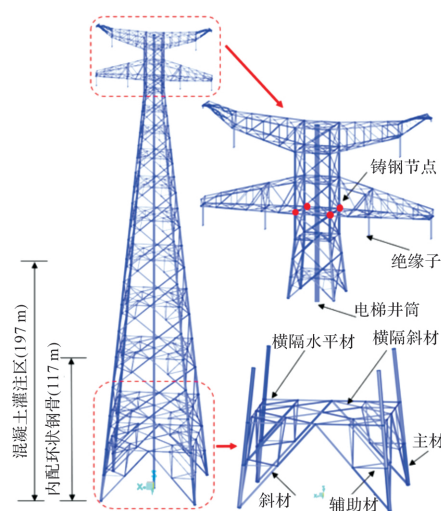


图2 跨越塔单塔模型

Fig. 2 Model of single transmission tower

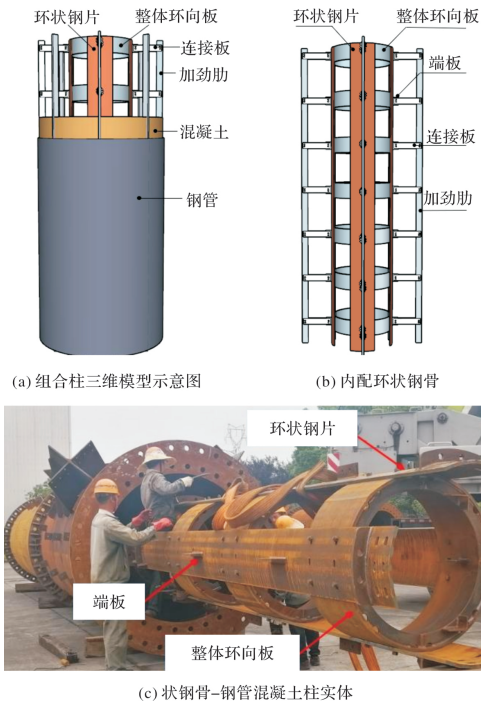


图 3 环状钢骨-钢管混凝土柱

Fig. 3 Concrete-filled steel tubular stub column reinforced with annular steel

为研究该环状钢骨-钢管混凝土柱的轴心受压性能,开展了对该类型试件的卧位轴压加载试验,通过与普通钢管混凝土柱进行比较并对长细比、整体环向板间距等参数对其承载能力的影响进行了

研究,以期为此类构件在实际工程中的运用提供一定的参考依据.

2 试验概况

2.1 试件设计及制作

共设计了 4 个纯钢管混凝土柱和 6 个环状钢骨-钢管混凝土柱试件进行轴向加载试验,试件设计含钢率(含环状钢骨)约 0.067,试件构造详图及有关设计参数见图 4 及表 1.

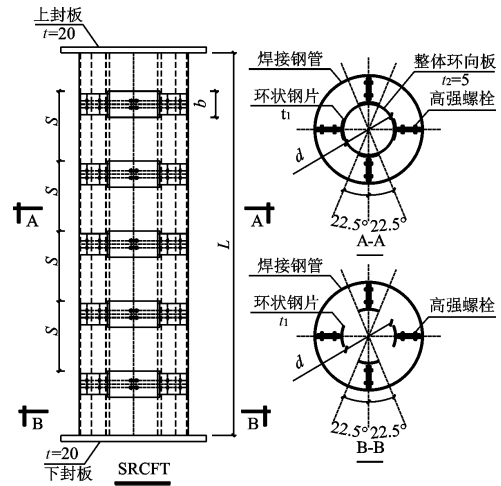


图 4 环状钢骨-钢管混凝土柱试件构造图

Fig. 4 Construction diagram of concrete-filled steel tubular stub column reinforced with annular steel

表 1 试验模型柱子设计参数表

Tab. 1 Design parameters of test models

试件编号	规格($D \times t \times L$)	λ	d	t_1	b	s
CFST1	$\text{Ø}375 \times 5 \times 3\ 925$	42		/		
CFST2	$\text{Ø}375 \times 5 \times 5\ 233$	56		/		
CFST3	$\text{Ø}450 \times 5 \times 4\ 720$	42				
CFST4	$\text{Ø}375 \times 5 \times 6\ 294$	56				
SRCFT1	$\text{Ø}375 \times 5 \times 2\ 617$	28	180	4	90	270
SRCFT2	$\text{Ø}375 \times 5 \times 3\ 925$	42	180	4	90	270
SRCFT3	$\text{Ø}375 \times 5 \times 3\ 925$	42	180	4	90	360
SRCFT4	$\text{Ø}375 \times 5 \times 3\ 925$	42	180	4	90	450
SRCFT5	$\text{Ø}375 \times 5 \times 5\ 233$	56	180	4	90	270
SRCFT6	$\text{Ø}375 \times 5 \times 6\ 541$	70	180	4	90	270
SRCFT7	$\text{Ø}450 \times 5 \times 3\ 925$	28	235	8	105	315
SRCFT8	$\text{Ø}450 \times 5 \times 4\ 720$	42	235	8	105	315
SRCFT9	$\text{Ø}450 \times 5 \times 6\ 294$	56	235	8	105	315

注: CFST 为纯钢管混凝土柱; SRCFT 为环状钢骨-钢管混凝土柱; D 为试件直径; t 为外钢管壁厚; L 为试件长度; λ 为长细比; d 为钢骨直径; t_1 为环状钢片厚度; t_2 为整体环向板厚度; b 为整体环向板宽度; s 为整体环向板间距; 未注明单位均为 mm.

2.2 材料性能

试件采用材料等级为 C50 的自密实混凝土,依据规范^[14]对混凝土试块进行养护和力学性能测试,最终测定混凝土立方体抗压强度标准值为 45 MPa.

试件所用钢材材料强度等级为 Q420,按照 GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》^[15]中规定方法进行拉伸试验,可测得钢材力学性能参数如表 2 所示.

表 2 钢材材性试验结果

Tab. 2 Test results of steel properties

类型	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	断后伸 长率/%
钢管	433.90	591.77	189 887.67	22.67
环状钢片	428.85	585.36	204 302.00	27.28
整体环向板	443.46	601.54	203 934.33	22.33
加劲肋	419.68	589.47	235 010.00	20.53

2.3 加载装置及方案

由于试件几何尺寸较大、加载吨位高, 为便于加载和测量, 设计了 1 500 t 卧式轴压试验加载装置, 其三维模型及实际加载装置如图 5 所示。

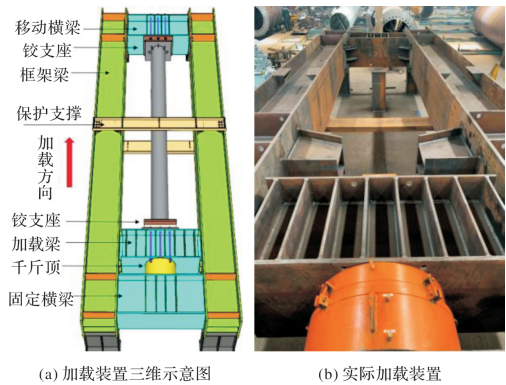


图 5 卧式加载试验装置图

Fig. 5 Horizontal loading test device

试验时分为预加载和正式加载两个阶段, 正式加载时在预估极限荷载的 80% 前采用力荷载, 而后转为位移加载, 当试件变形过大或承载力下降超过极限荷载的 80% 时, 停止加载, 随后缓慢匀速卸载。试验时支座采用双向铰支座, 试件可在平面内外自由旋转。

2.4 量测内容

试验量测内容主要包括: 试件轴向荷载、试件轴向位移、试件侧向位移以及外钢管和内部钢骨的纵向应变和横向应变。位移计布置点位如图 6 所示, W5~W6 监测轴向位移, W-4 监测反力架变形, W-1~W-3 监测竖直平面内位移, W-7~W-12 监测水平面内位移。

对于 CFST 试件, 在外钢管表面沿试件长度每间隔 $1/8L$ 、沿圆周每隔 90° 角均匀布置纵向应变片, 并在外钢管 $1/4L$ 、 $1/2L$ 、 $3/4L$ 与纵向应变片对应位置布置横向应变片。对于 SRCFT 试件, 外钢管与 CFST 同样位置布置应变片, 同时在内部环状钢骨中间位置沿四周布置纵横向应变片。应变测量布置点如图 7 所示, 图中 V 表示纵向应变片, T 为横向应变片。

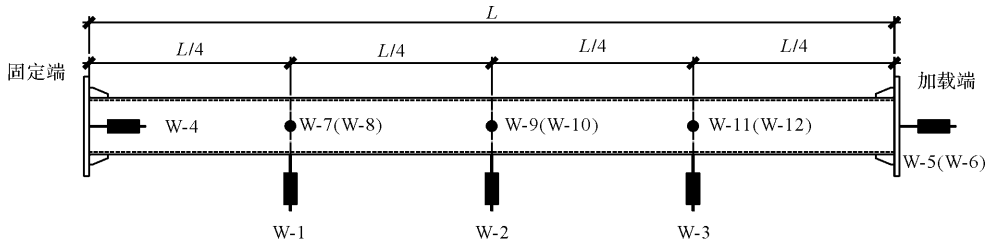


图 6 位移计测点布置图

Fig. 6 Displacement gauges layout for the coloum

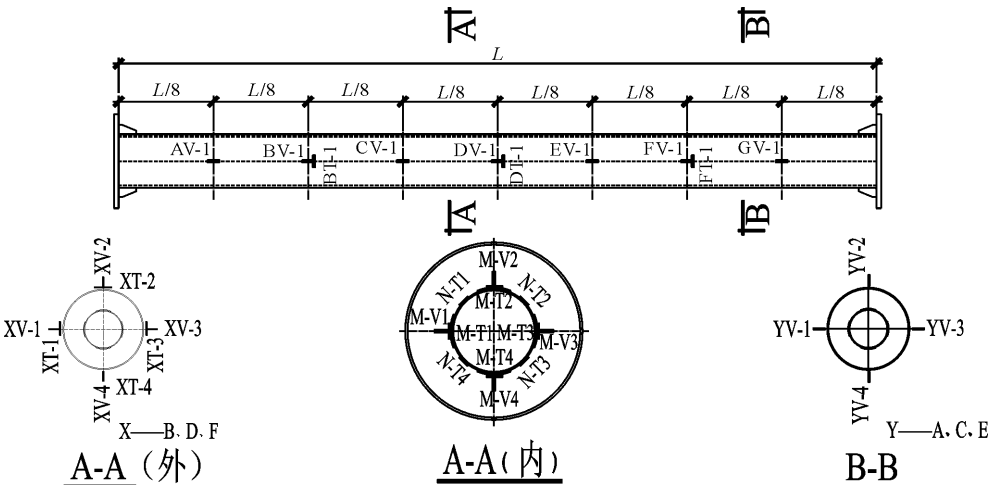


图 7 应变片测点布置图

Fig. 7 Strain gauges layout for the coloum

3 试验现象及破坏模式

环状钢骨-钢管混凝土柱及普通钢管混凝土柱在轴压荷载作用下基本呈现两种破坏模式. 第一种破坏模式为强度破坏, 第二种破坏模式为失稳破坏.

3.1 强度破坏

试件 SRCFT1、SRCFT7、SRCFT8 均属于强度破坏, 以试件 SRCFT1 为例阐述其破坏过程, 其余试件类似.

加载初期, 试件没有发生明显变化, 处于弹性范围内, 如图 8(a)所示; 当加载至约 6 900 kN 时, 试件内部发生一阵巨响, 疑似钢管内部混凝土发生压溃; 继续加载至约 8 000 kN 时, 距固定端约 20 cm 处底部靠近开孔位置 1 处率先产生鼓曲, 对面位置 2 处随之也产生微小变形, 而后继续加载, 相应鼓曲位置变形继续加大, 距加载端 30 cm 在位置 3 处钢管表面出现明显“褶皱”, 如图 8(b); 随后加载至 9 085 kN 时荷载基本保持不变, 轴向位移持续增加, 最终破坏如图 8(c)所示, 从图中可以发现, 试件整体未出现明显变形, 柱体由于钢材和混凝土达到极限强度而破坏.



图 8 试件 SRCFT1 破坏过程图

Fig. 8 The failure process diagram of the specimen SRCFT1

3.2 失稳破坏

除上述强度破坏试件外, 其余试件为失稳破坏, 以试件 SRCFT2 为例阐述其破坏过程.

在轴向荷载作用下, 当荷载等级达到 8 034 kN 时, 试件发生侧向微弯曲, 局部未有明显鼓曲. 继续加载至 8 262 kN, 试件持续发生侧弯, 且距固定端约 10 cm 位置处出现鼓曲, 鼓曲范围约 1/2 圆周, 同时距加载端约 10 cm 处同样出现鼓曲, 但鼓曲变形相比固定端位置处不明显. 当荷载加载至 8 353 kN 时, 试件进入极限状态, 随后承载力急速下降, 试件呈整体弯曲失稳破坏, 同时在构件受压区出现了明显的压屈现象, 最终破坏形态如图 9 所示.

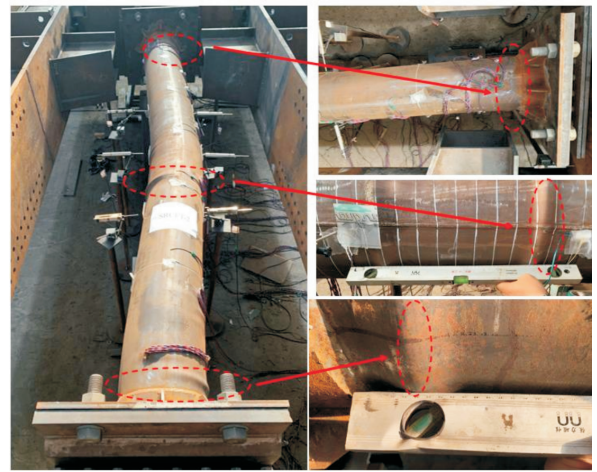


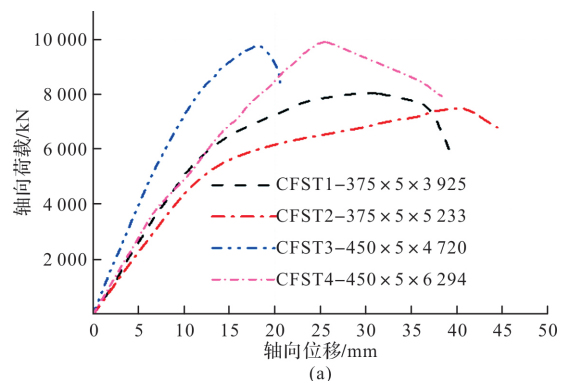
图 9 试件 SRCFT2 破坏形态图

Fig. 9 The failure mode diagram of the specimen SRCFT2

4 主要试验结果与数据分析

4.1 荷载-轴向位移曲线

图 10 给出了各试件的轴向荷载-位移曲线, 相应力学性能指标列于表 3 中. 可以发现, 由于试件型式、长细比、整体环向板间距不同, 13 根试件的力学性能参数各有差异, 下面就这些影响因素进行对比分析.



(a)

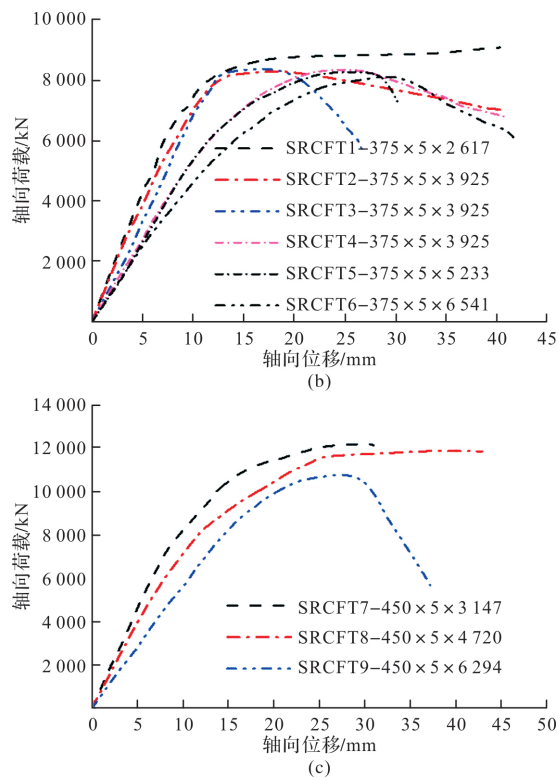


图 10 轴向荷载-位移曲线
Fig. 10 Axial load displacement curves

4.1.1 试件类型

分别对比 CFST1 与 SRCFT2(3、4)、CFST2 与 SRCFT5、CFST3 与 SRCFT8、CFST4 与 SRCFT9 来考察内配环状钢骨对试件力学性能的影响。

(1)对于极限承载力,可以发现同规格的环状钢骨-钢管混凝土柱较纯钢管混凝土柱均有不同程度的提升,提升幅度在 3.40%~20.39%不等,表明在内配钢骨后对试件承载力有一定的提升作用,同样地,在内配环状钢骨后,除个别试件 SRCFT8 外,轴向刚度提升较为明显,最小提升幅度为 15.57%,最大提升幅度为 82.27%。由此可见,内配环状钢骨后一方面提升了试件的含钢量,另一方面对混凝土也有一定的约束效应,可有效改善试件的承载力和轴向刚度。

(2)对于破坏模式,通过上述试验现象的描述,可以发现同规格的 SRCFT8 破坏模式相比 CFST3 由失稳变为了强度破坏,其破坏形态发生了根本改变,原因可能是在内配环状钢骨后,其截面抗弯刚度也有了一定的提升,则根据压杆稳定计算公式导致试件的破坏模式发生了改变。

表 3 主要试验结果

Tab. 3 Main test results

试件编号	规格($D\times t\times L$)	长细比	S /mm	N_u /kN	δ_u /mm	N_y /kN	δ_y /mm	轴向刚度 /kN \cdot mm $^{-1}$	破坏 模式	承载力 变化率/%	刚度变 化率/%
CFST1	$\varnothing 375\times 5\times 3\ 925$	42	/	8 079	31.12	7 296	20.20	361	失稳破坏		
CFST2	$\varnothing 375\times 5\times 5\ 233$	56	/	7 531	40.87	6 341	21.62	293	失稳破坏		
CFST3	$\varnothing 450\times 5\times 4\ 720$	42	/	9 862	18.70	9 018	14.33	629	失稳破坏		
CFST4	$\varnothing 450\times 5\times 6\ 294$	56	/	9 999	25.21	9 328	22.70	411	失稳破坏		
SRCFT1	$\varnothing 375\times 5\times 2\ 617$	28	270	9 085	40.31	8 146	12.22	667	强度破坏		
SRCFT2	$\varnothing 375\times 5\times 3\ 925$	42	270	8 354	19.42	7 842	11.92	658	失稳破坏	3.40	82.27
SRCFT3	$\varnothing 375\times 5\times 3\ 925$	42	360	8 445	19.83	8 284	13.60	609	失稳破坏	4.53	68.70
SRCFT4	$\varnothing 375\times 5\times 3\ 925$	42	450	8 399	26.61	7 735	17.83	434	失稳破坏	3.96	20.22
SRCFT5	$\varnothing 375\times 5\times 5\ 233$	56	270	8 308	28.07	7 796	19.07	409	失稳破坏	10.32	39.60
SRCFT6	$\varnothing 375\times 5\times 6\ 541$	70	270	8 171	30.11	7 419	20.32	365	失稳破坏		
SRCFT7	$\varnothing 450\times 5\times 3\ 147$	28	315	12 193	30.81	10 885	16.51	659	强度破坏		
SRCFT8	$\varnothing 450\times 5\times 4\ 720$	42	315	11 873	37.36	10 263	17.80	577	强度破坏	20.39	-8.27
SRCFT9	$\varnothing 450\times 5\times 6\ 294$	56	315	10 959	29.90	10 220	21.49	475	失稳破坏	9.60	15.57

注: N_u 为极限承载力; δ_u 为极限承载力对应位移; N_y 为屈服承载力; δ_y 为屈服位移; 承载力(刚度)变化率以同规格普通钢管混凝土柱为参考对象; 未注明单位均为 mm。

4.1.2 整体环向板间距

(1)试件 SRCFT2、SRCFT3 及 SRCFT4 极限承载力分别为 8 354 kN、8 445 kN 及 8 399 kN,三者之间十分接近,最大值与最小值仅相差 0.55%,且由于千斤顶试验数据读取等其他干扰

因素影响下,极限承载力最大值反而为 SRCFT3。故在试验尺寸规格范围内,环向板间距对试件极限承载力的影响不大,究其原因可能是试件自身材料强度等级较高,导致试件极限承载力较大,相对而言环向板间距所带来的影响显得较小;

(2)环向板间距最小的 SRCFT2 轴向刚度相比试件 SRCFT3 及 SRCFT4 分别增大了 30.87% 及 49.73%，影响显著，同时可以发现环向板间距越小，试件轴向-荷载位移曲线呈下降段越缓的趋势，表明环向板对构件延性也有一定的提高。

4.1.3 长细比

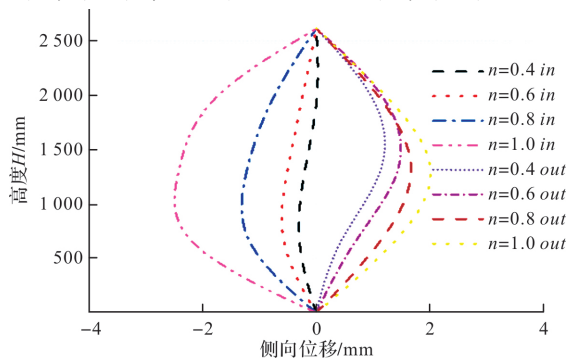
对比试件 SRCFT1、SRCFT2(3、4)、SRCFT5 和 SRCFT6，试件 SRCFT7、SRCFT8 和 SRCFT9 可以看出：

(1)随着长细比的增大，试件极限承载力呈依次降低的趋势，长细比最大的 SRCFT6 极限承载力相较 SRCFT1 减小了 10.07%，SRCFT9 极限承载力相较 SRCFT7 减小了 10.12%；试件轴向刚度随长细比的变化与极限承载力呈现相同的趋势，SRCFT6 较 SRCFT1 减小了 45.28%，SRCFT9 较 SRCFT7 减小了 27.92%；

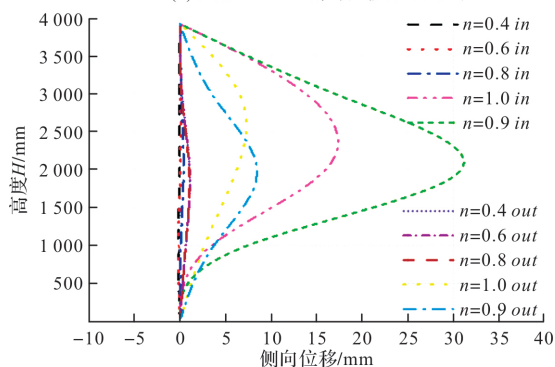
(2)对比试件荷载-位移曲线，可以发现随着长细比的增大，试件下降段呈现越来越陡的趋势，表明延性越来越差；同时长细比的增大导致试件的破坏模式也发生了改变，如 SRCFT1 为强度破坏模式，而同管径的其余试件为失稳破坏。

4.2 荷载-侧向位移曲线

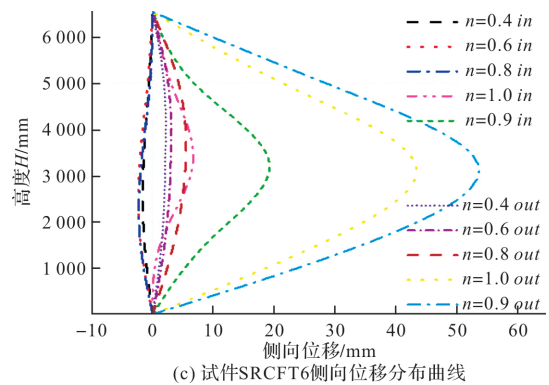
限于篇幅，图 11 给出了部分试件的侧向位移分布曲线，其中：高度 H 表示布置的位移计距离试件固定端的距离， n 表示试件此时的侧向位移值所对应的荷载与其极限荷载的比值； in 表示竖直面内侧向位移， out 表示水平面内侧向位移。



(a) 试件 SRCFT1 侧向位移分布曲线



(b) 试件 SRCFT3 侧向位移分布曲线



(c) 试件 SRCFT6 侧向位移分布曲线

图 11 轴向荷载-侧向位移曲线

Fig. 11 Axial load-lateral displacement curves

从图中可以看出，强度破坏试件其侧向位移值相较其他试件都较小，如 SRCFT1 试件在达到极限荷载所对应的最大侧向位移约为 2.44 mm，与试件长度的比值仅为 0.93‰，几乎可忽略不计。

失稳试件如 SRCFT3 虽然在达到极限荷载时所对应侧向位移数值仅为 17 mm 左右，但当试件的荷载下降到极限荷载的 90% 时，所对应的侧向位移急剧增大，平面内侧向位移达到了 31 mm，约为极限荷载对应侧向位移的 1.8 倍。侧向位移急剧增大，且侧向位移分布曲线近似服从半波正弦曲线，是典型的失稳破坏，其他试件类似。

4.3 应变分析

图 12、13 显示了部分试件的荷载-应变分布曲线。从图 12 可以看出，强度破坏试件主要有以下几个规律：

(1)在试验加载初期，试件处于弹性工作状态，钢管外壁荷载-纵向应变曲线 DV1~DV4 大致呈线性变化，试件的纵向应变随着荷载的增加而缓慢增长；随后试件进入弹塑性工作状态，应变率变化逐渐加大，应变在达到极限承载力后增长最快。同时，由于加载过程中未出现荷载下降的情况，整个试件荷载-应变曲线在达到极限承载力后保持承载力不变，而应变持续增加。钢管外壁环向应变 DT1~DT4 与纵向应变变化规律类似，加载初期发展较慢，后期因混凝土横向变形增大，对钢管的挤压作用增大，钢管对混凝土横向膨胀的约束作用变得明显导致应变率增大；

(2)钢管内部环状钢片纵向与环向应变变化规律与钢管上应变是类似的，同样是加载初期应变保持弹性，增长较慢，继而随着荷载的增加进入弹塑性，应变增长率加快，达到极限承载力后荷载保持不变，应变持续增加，环状钢片开始完全屈服，表明内部环状钢片在整个加载过程中全程参与受力，对试件整体的承载力和刚度都有着一定

的贡献。同一级荷载情况下,可以发现内部环状钢片纵向应变值大于外部钢管,原因可能是由于外钢管和内部钢骨的双重约束,导致核心区应力幅值较大,继而使得环状钢片应变较外钢管偏大;

(3)内部整体环向板的环向应变始终处于受拉状态,其变化趋势与环状钢片上环向应变是类似的,表明整体环向板在试件整体受力过程中也参与其中,与环状钢片组成一整体对核心区混凝土进行约束从而提高混凝土的承载力和延性,改善试件的力学性能。

从图13可以看出,试件发生失稳破坏与强度破坏应变变化规律在达到极限承载力之前是类似的,即表现为加载初期应变的线性增加和继续加载转变为应变率的增长,不同之处主要在以下两个方面:

(1)失稳试件在达到极限承载力后,没有延性段,应变持续增加的情况下,承载力发生陡降,表现为试件的突然破坏,这与强度破坏试件是截然不同的;

(2)失稳试件在达到极限承载力后,除去个别试件数据异常外,总有应变发生受力状态的改变,表现为受压应变的减小,继而甚至转变为受拉状态,如试件 SRCFT3 应变 DV4,这表明由于发生失稳,试件弯曲变形因而钢管一侧有受拉的趋势导致该侧受压应变减小,甚至可能转为受拉。

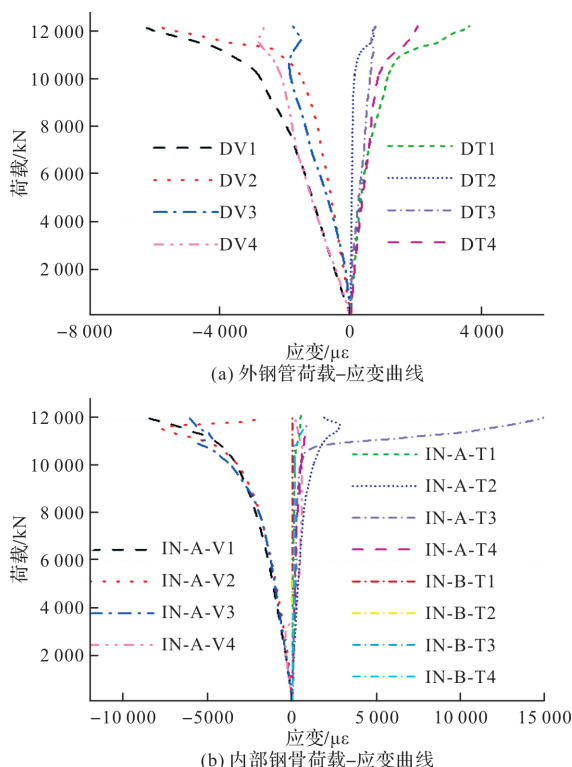


图12 STCFT7 轴向荷载-应变曲线

Fig. 12 Axial load-lateral displacement curves of SRCFT7

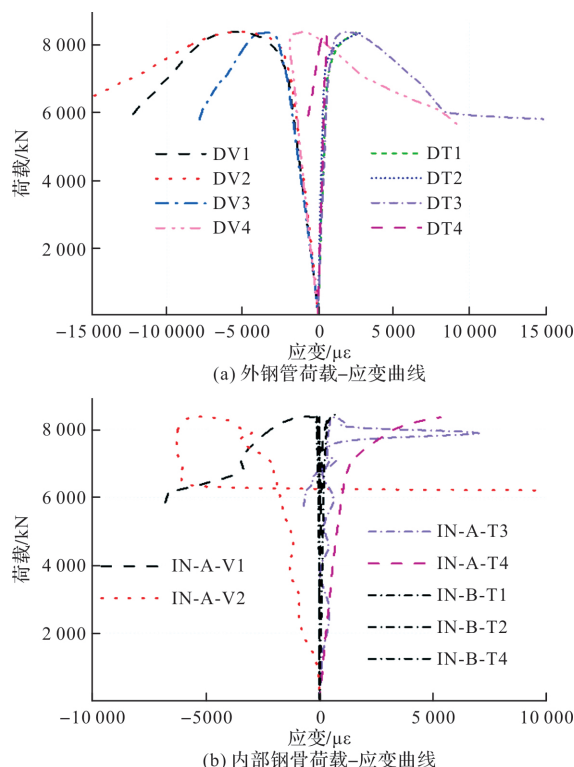


图13 SRCFT3 轴向荷载-应变曲线

Fig. 13 Axial load-lateral displacement curves of SRCFT3

5 结论

通过对4个普通钢管混凝土柱及8个新型环状钢骨-钢管混凝土柱的试验过程、试件的破坏形态及试验结果分析,可以得到以下结论:

(1)试验件普通钢管混凝土柱为失稳破坏,而环状钢骨-钢管混凝土柱破坏模式分为强度破坏和失稳破坏,强度破坏以试件局部发生鼓曲,材料达到极限强度为特征。失稳破坏以试件整体发生明显弯曲,承载力陡降为特征;

(2)环状钢骨-钢管混凝土柱较普通钢管柱在承载力、轴向刚度等方面均有不同程度的提高,承载力最大可提高约18.67%,轴向刚度可提高约82.27%。内配环状钢骨后能够显著改变试件的破坏模式;

(3)在试验尺寸规格范围内,整体环向板间距对试件承载力影响较小,对轴向刚度影响较大。随着环状钢骨-钢管混凝土柱长细比的增大,试件极限承载力、刚度和延性均有不同程度的降低,试件的破坏模式也由强度破坏逐渐转为失稳破坏。

参考文献 References

- [1] 王清湘,赵大洲,关萍. 轴心受压钢骨-钢管高强混凝土组合柱承载力的研究[J]. 工程力,2003(6):195-201.
WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, GUAN Ping. The

- load bearing capacity of axially loaded circular steel tubular columns filled with steel reinforced high-strength concrete[J]. Engineering Mechanics, 2003 (6): 195-201.
- [2] 史艳莉,王文达,王亚伟. 内配型钢方钢管混凝土轴压短柱力学性能及参数分析[J]. 工程力学, 2014, 31(S1): 201-206.
SHI Yanli, WANG Wenda, WANG Yawei. Behaviour and parametric study of concrete-filled steel tubular stub columns with internal profile steel under axial compression. [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S1): 201-206.
- [3] KATO Ben. Column curves of steel-concrete composite members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 39(2): 121-135.
- [4] HAMIDIAN M R, JUMAAT M Z, ALENGARAM U J, et al. Pitch spacing effect on the axial compressive behaviour of spirally reinforced concrete-filled steel tube (SRCFT) [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 100: 213-223.
- [5] EBRAHIM F. Development of a new steel section for reinforcing of steel reinforced concrete-filled steel tubular columns. 2019, 20(2): 689-706.
- [6] MIZAN A, QING Q L, PATEL V I, et al. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 138: 105-116.
- [7] 王清湘,赵大洲,关萍. 轴心受压钢管-钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002(5): 710-714.
WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, GUAN Ping. Research on the mechanical behavior of axially loaded circular steel tube columns filled with steel-reinforced high-strength concrete[J]. Journal of Southeast University, 2002(5): 710-714.
- [8] 王清湘,赵大洲,关萍. 钢管-钢管高强混凝土轴压组合柱受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 44-49.
WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, GUAN Ping. Study on the mechanical properties of axially loaded steel tubular columns filled with steel reinforced high-strength concrete[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 44-49.
- [9] 朱美春,王清湘,冯秀峰. 轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 35-39.
ZHU Meichun, WANG Qingxiang, FENG Xiufeng. Behavior of axially loaded square steel tube short columns filled with steelreinforced self consolidating high-strength concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 35-39.
- [10] 丁发兴,李刚,龚永智,等. 钢管-圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3625-3630.
DING Faxing, Ligang, GONG Yongzhi, et al. Behavior of tubular stub columns of axially loaded steel-reinforced concrete-filled circular steel[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(9): 3625-3630.
- [11] 万城勇,查晓雄. 配筋钢管混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1): 259-266.
WANG Chenyong, ZHA Xiaoxiong. Experiment study of reinforced concrete filled steel tubular columns subjected to axial compression[J]. Engineering Journal, 2013, 34(S1): 259-266.
- [12] 查晓雄,徐海俭. 内配异心及多层钢管混凝土柱承载力统一公式研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S1): 192-198.
ZHA Xiaoxiong, XU Haijian. Study on axial bearing capacity uniform formula of concrete filled offset or multilayer steel tubular column[J]. Engineering Journal, 2015, 36(S1): 192-198.
- [13] 王军. 内配格构式角钢圆钢管混凝土力学性能研究及应用[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
WANG Jun. Research and application on the mechanical properties of concrete-filled circular steel tubes with latticed steel angles inside. [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [14] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [15] 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/T 228. 1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature. GB/T 228. 1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

(编辑 沈 波)