

文章编号: 1001-4888(2023)05-0585-10

GFRP 管约束钢管混凝土加劲混合柱 偏压力学性能试验研究*

曾钧柯¹, 梁睿^{1,2}, 苏全福¹, 李双蓓^{1,3}

(1. 广西大学 土木工程学院, 广西南宁 530004; 2. 广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029;

3. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: 为改善钢管混凝土加劲混合构件因钢管内外混凝土存在力学差异, 组合效应较低的不足, 采用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)管对其进行约束, 研究了 GFRP 管约束钢管混凝土加劲混合柱(FCECFST)的偏压力学性能, 将 FCECFST 与普通钢管混凝土加劲混合柱、GFRP 管约束钢筋混凝土柱和钢管混凝土柱进行偏压试验对比, 通过荷载-变形曲线、侧向挠度分布曲线和荷载-应变曲线剖析了试件破坏机理。研究表明: FCECFST 偏压破坏以环向纤维断裂为标志; 相比其他 3 种组合构件, FCECFST 荷载-变形曲线峰值更高且下降段更平缓, 表现出良好的极限承载力、抗弯刚度、延性性能和耗能能力; GFRP 管对外围混凝土约束作用明显, 对试件偏压力学性能影响显著。

关键词: 钢管混凝土加劲混合构件; 组合柱; GFRP 管; 静力试验; 偏压性能

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-194

0 引言

钢管混凝土加劲混合构件(CECFST)由内置的钢管混凝土和钢管外围的钢筋混凝土 2 个部件组合而成^[1], 承载过程中, 核心混凝土在钢管提供的环向约束作用下处于三向受压状态, 构件抗压强度得以提高; 而外围钢筋混凝土的存在使得钢管屈曲形态得到改善, 并提高了构件的抗弯性能和抗震性能。鉴于 CECFST 优异的力学性能, 使其在高层建筑和大跨桥梁中被广泛运用^[2], 但相关研究表明^[3-4], 由于钢管内外混凝土的力学性能存在较大差异, 构件破坏时, 外部混凝土较早开裂剥落, 而内部钢管混凝土工作性能尚未充分发挥。为解决上述问题, 一些学者对此展开研究。Cai 等^[5-6]将钢管外围的混凝土材料替换为高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC), 从试验、理论与数值模拟 3 方面对构件进行研究, 发现偏压荷载下构件承载力、延性提高, 且具有较好的协同变形能力和组合作用。代岩等^[7]采用碳纤维增强复合材料(CFRP)与角钢复合加固 CECFST, 通过理论分析和数值研究, 发现在两者的约束下构件轴压承载力有较大提升。文献[8-9]采用有限元分析也证明了 CFRP 能有效提高构件的轴压和纯弯力学性能。

目前相关研究多集中于数值分析, 试验研究相对较少, 鉴于纤维增强复合材料(FRP)具有较为优越的高比强度、耐腐蚀性和易于施工等特性, 同时考虑工程经济性^[10], 李双蓓等^[11]提出的新型构件采用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)管约束钢管混凝土加劲混合柱(FCECFST), 与 CECFST 等其他类别组合柱进行轴压对比试验, 结果发现 FCECFST 轴压性能提升明显, GFRP 管可以较好地解决钢管内外混

* 收稿日期: 2022-08-12; 修回日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878186, 51738004); 广西重点研发计划(桂科 AB22036007)

通信作者: 李双蓓(1963-), 女, 博士, 教授。主要从事钢与混凝土组合结构及智能材料结构研究。Email: lsbwh90@163.com

土破坏不同步的问题。

实际工程中,由于存在设计缺陷与施工误差等因素,构件多受偏压荷载^[12]。为此本文在文献[11]的基础上,对 GFRP 管约束钢管混凝土加劲混合柱展开进一步研究,深入探究其在偏压荷载作用下的受力性能,并与 CECFST、GFRP 管约束钢筋混凝土柱(RCFST)以及钢管混凝土柱(CFST)进行对比试验,详细考察不同类别组合柱的破坏模式,以及荷载-位移、荷载-挠度和荷载-应变曲线的发展趋势,同时对分析偏压荷载下各组合构件的主要力学性能指标。本文研究结论可为 GFRP 管约束钢管混凝土加劲混合柱的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

本文试验共设计 4 种偏压短柱试件,分别是 FCECFST、CECFST、RCFST 与 CFST,每种柱考虑 45mm、90mm 不同的偏心距 e ,共计 8 个试件。除 CFST 外其余试件均是宽度为 300mm 的方形截面,并在柱端设置箍筋加密区,加密区箍筋间距为 50mm,详细参数见表 1。

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of specimens

试件编号	L/mm	L_0/mm	d_s/mm	t_s/mm	t_g/mm	纵筋配置	箍筋配置	e/mm
FCECFST-I	900	1000	159	5	3	4 Φ 12	Φ 8@150	45
FCECFST-II	900	1000	159	5	3	4 Φ 12	Φ 8@150	90
CECFST-I	900	1000	159	5	—	4 Φ 12	Φ 8@150	45
CECFST-II	900	1000	159	5	—	4 Φ 12	Φ 8@150	90
RCFST-I	900	1000	—	—	3	4 Φ 12	Φ 8@150	45
RCFST-II	900	1000	—	—	3	4 Φ 12	Φ 8@150	90
CFST-I	900	960	159	5	—	—	—	45
CFST-II	900	960	159	5	—	—	—	90

注:罗马字母 I、II 为同种试件不同偏心距,其中 I 表示 $e=45\text{mm}$, II 表示 $e=90\text{mm}$; L 为试件高度; L_0 为试件计算高度(即较支座间距); d_s 和 t_s 为钢管外径与厚度; t_g 为 GFRP 管厚度。

试件在广西建工轨道装配式建筑产业有限公司 PC 基地制作。浇筑时 GFRP 管亦做浇筑模板使用,采用立式浇筑法分层浇筑并振捣密实,先浇筑钢管内混凝土,待其强度达到 75% 设计强度后再浇筑钢管外混凝土,并预留 1 组标准立方体试块与试件同条件养护。实测钢管内混凝土立方体抗压强度为 63.91MPa,钢管外及试件 RCFST 混凝土立方体抗压强度为 42.94MPa。钢筋采用 HRB400 级螺纹钢,钢管采用 Q355 级无缝钢管,按标准^[13]进行钢材材性试验,结果见表 2。GFRP 管缠绕角度为 80°,倒角半径为 30mm,依据相关标准^[14]测定的结果见表 3。

表 2 钢材的力学性能指标

Tab. 2 Mechanical property index of steel

材料类型		屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/MPa
钢管	厚度 5mm	386.05	538.67	1.98×10^5
	直径 8mm	380.98	536.44	2.00×10^5
钢筋	直径 12mm	404.55	569.63	2.03×10^5

表 3 GFRP 的力学性能指标

Tab. 3 Mechanical property index of GFRP

取样方向	抗拉强度 f_g/MPa	弹性模量 E_g/GPa	断裂应变 $\epsilon_g/\mu\epsilon$
环向	379.15	38.2	9925
轴向	19.35	9.1	2180

1.2 加载及测量方案

试件加载装置采用广西大学 12000kN 微机控制电液伺服大型多功能结构试验系统(WAW-J12000J)。柱端偏压装置则由高强钢端帽与三角斜边铰支座组合而成,以保证加载偏心率准确的同时又能实现试件端部的加固作用。试验采用位移控制加载方式,加载速度为 0.5mm/min。

试件 GFRP 管、钢管、纵筋和箍筋的应变值通过在柱中截面粘贴的应变片测取,试件柱中截面形式与拉压两侧的应变测点布置如图 1 所示。试件的轴向位移和侧向挠度采用位移计测量,加载装置及位移计布置如图 2 所示。

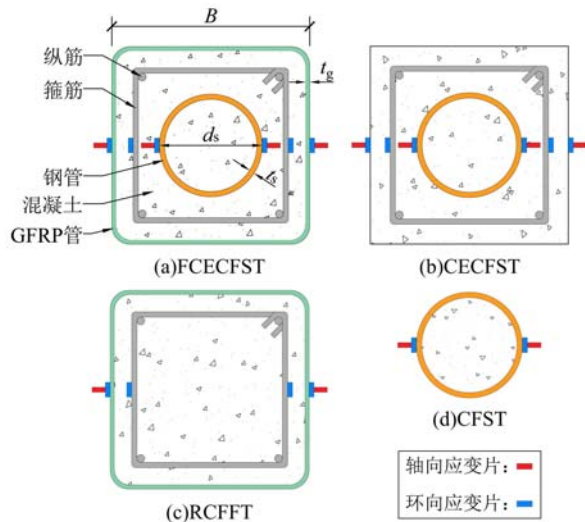


图 1 试件截面形式与应变测点布置

Fig.1 Sectional form of specimens and arrangement of strain measuring points

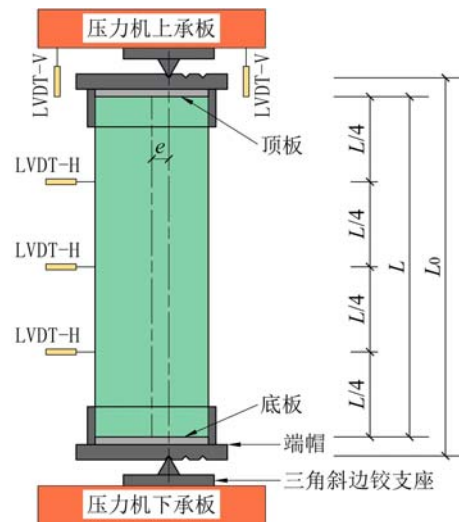


图 2 试验加载装置与位移计布置

Fig.2 Test loading device and arrangements of displacement meters

2 试验结果

2.1 试件破坏形态

图 3 所示为所有试件最终破坏形态。FCECFST-I 在加载初期侧向挠度增长缓慢,试件无明显变化;当荷载达到峰值荷载 N_u 的 85% 左右时,侧向挠度略微增长,试件中部逐渐产生环向白纹,并伴随轻微的纤维断裂声;随后环向白纹向试件两侧发展,纤维断裂声逐渐增大且愈发频繁,受压侧中部可见明显断裂纤维束,荷载随即达到峰值;之后,试件侧向挠度增长迅速,挠曲变形明显加快,试件中部受拉区纤维开裂,裂口数量沿轴向不断增加;最终试件中部受压区裂口处 GFRP 纤维大幅外翘,内部混凝土剥落,结束加载。试件 FCECFST-II 破坏现象与试件 FCECFST-I 相似,峰值荷载前,试件侧向挠度增长速度比 FCECFST-I 快,峰值荷载后,试件挠曲变形幅度更大,破坏也更为严重。

2 种偏心距下 CECFST 的破坏形态较为接近,荷载加载至峰值前,试件中部受拉侧出现细小裂缝,小偏心试件裂缝出现较晚,挠曲变形均增长缓慢;荷载接近峰值时,柱中侧向挠度逐渐增大,裂缝增多并不断延伸扩大,受压侧瞬间压溃并伴随巨响,荷载达到峰值;随后混凝土大面积压碎脱落,钢筋外露,纵筋压曲,试件承载力急剧下降。RCFFT 破坏形态与 FCECFST 相似,但 RCFFT 破坏更快,峰值荷载前已有明显的挠曲变形,大偏心试件受拉侧破坏严重。CFST-I 与 CFST-II 当加载至峰值荷载后,侧向挠曲变化明显且迅速,CFST-II 柱中挠度更大。

2.2 荷载-轴向位移曲线

试件的荷载-轴向位移($N-\Delta$)曲线如图 4 所示。试件 FCECFST 的曲线可分为 4 个阶段,即弹性上升段、弹塑性发展段、塑性缓慢下降段和失效段。在弹性上升阶段(OA),FCECFST 轴向位移增加缓慢且曲线均呈线性关系;随着试件持续加载,曲线进入弹塑性发展阶段(AB),此阶段 FCECFST 轴向位移增长逐渐变快,而荷载的增长速度开始减慢直至荷载达到峰值点;峰值点之后,曲线进入塑性缓慢下降

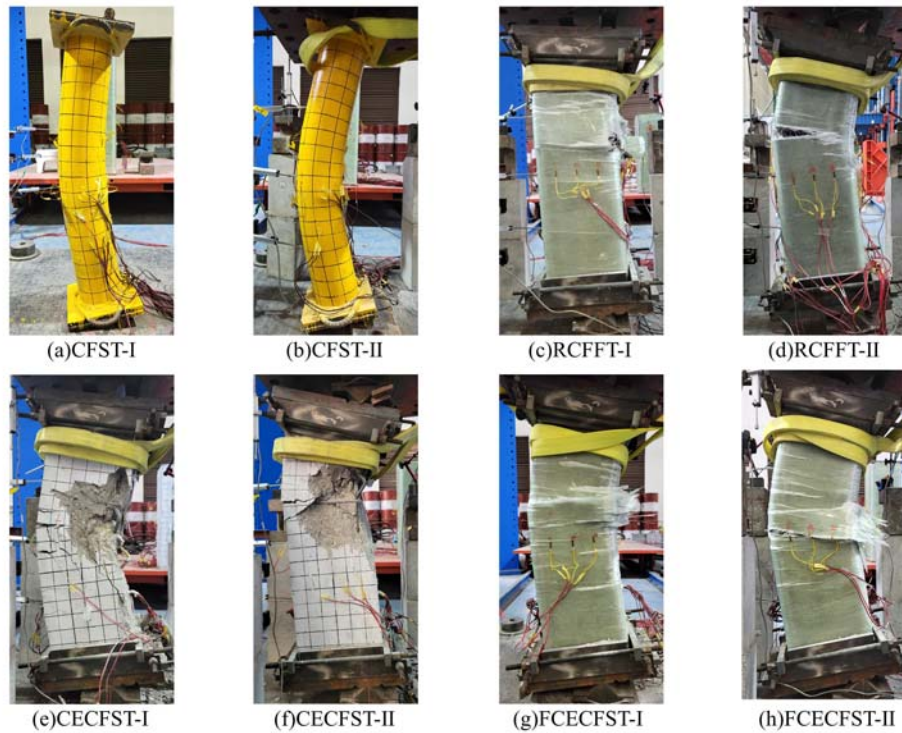


图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure mode of specimens

段(BC), FCECFST 的位移迅速增长, 试件承载力缓慢降低, FCECFST-I 曲线下降尤为平缓, 表明试件延性较好; 随后, 曲线进入失效段(CD), 荷载下降速度变快, 试件逐渐失效。

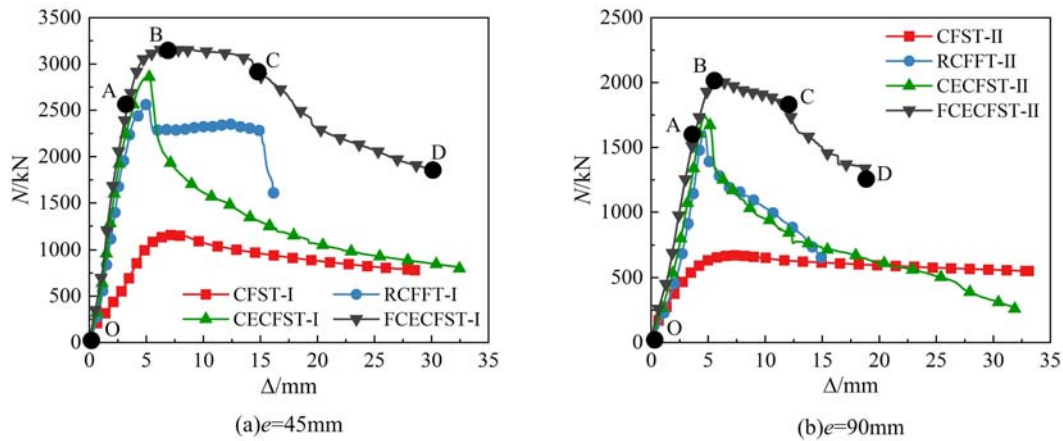


图 4 荷载-轴向位移曲线

Fig. 4 Load-axial displacement curves

CECFST 曲线峰值仅次于 FCECFST, 过峰值荷载后 CECFST 曲线下降迅速; RCFFT-I 在峰值点后曲线出现小幅度下降, 随后在 GFRP 管的约束作用下逐渐平稳发展, 试件承载力退化得到抑制, 甚至曲线略有回升, 这是由于当偏心距较小时, 峰值点过后混凝土被压碎, 但在 GFRP 管的约束下仍能承担部分荷载所致; 而 RCFFT-II 在峰值荷载后曲线呈现迅速下降趋势, 这是因为对于大偏心试件, GFRP 管提供的有效约束作用较弱所致; CFST 弹性阶段曲线斜率与曲线峰值均较低, 但曲线下降段最为平缓。

2.3 荷载-跨中挠度曲线

试件的荷载-跨中挠度($N-f$)曲线如图 5 所示。FCECFST 从加载开始至荷载为 $0.8N_u$ 左右, 曲线近似于直线发展, 构件处于弹性阶段且无明显挠曲变形, 结合图 4 分析可知, FCECFST 在弹性阶段的

变形以轴向位移为主；当荷载达到 $0.8N_u$ 左右，柱中挠度逐渐增长，荷载与挠度呈非线性关系，外部 GFRP 管出现皱褶与白纹，构件进入弹塑性阶段；随着荷载的增大，柱中 GFRP 管产生环向裂纹，受压侧夹层混凝土压碎，荷载达到峰值；峰值荷载后试件挠曲变形加快，曲线缓慢下降，此时在 GFRP 管的约束作用下，受压侧夹层混凝土被挤压至破碎，逐渐被压密并开始侧向膨胀，GFRP 管环向裂缝增多；继续加载，柱中 GFRP 管环向纤维断裂外翘，夹层混凝土受损剥落，承载力迅速下降，构件组合性能失效。

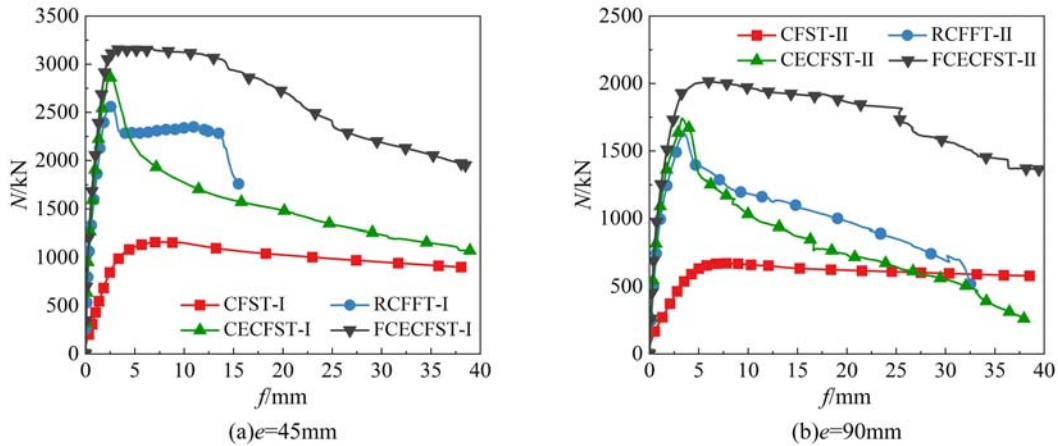


图 5 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Load-midspan deflection curves

对图 5 中其余 3 种构件的荷载-跨中挠度曲线进行分析，发现 CECFST 由于缺乏 GFRP 管的约束，其极限承载能力有所下降，且荷载峰值过后，CECFST 外围混凝土破碎脱落，荷载下降过快，核心钢管混凝土未充分发挥性能；RCFST 由于无核心钢管混凝土，内部混凝土一旦碎裂，就会加快试件横向膨胀速度，导致 GFRP 管过早断裂。与 CFST 相比，FCECFST 在极限承载力上有极其显著的提升。

2.4 侧向挠度及分布

不同荷载水平下试件侧向挠度曲线如图 6 所示，图中 z 为测点距试件下端三角斜边铰的高度， z/L_0 为试件相对高度。

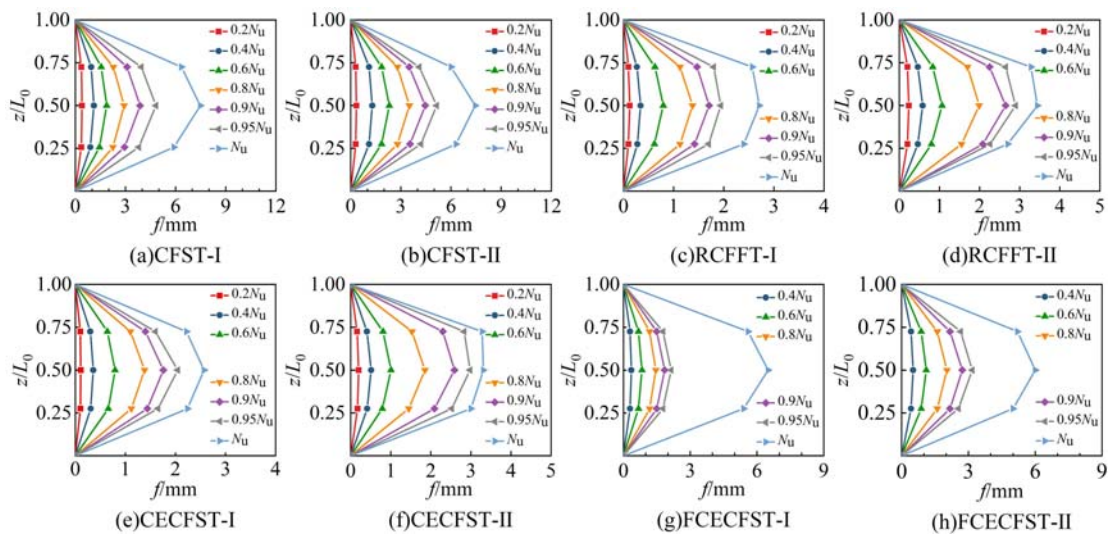


图 6 侧向挠度沿着试件高度的分布

Fig. 6 Deflection distribution of specimen along the height of specimens

对比 CFST、RCFST、CECFST 可发现，FCECFST 在加载初期，试件的侧向挠度发展较为缓慢，至峰值荷载 N_u 时试件侧向挠度变形陡增；而 CFST、RCFST、CECFST 在加载全过程中，侧向挠度发展平稳增长，无挠度突增现象，说明 FCECFST 在弹塑性阶段后期荷载达到 $0.95N_u$ 后，由于钢管外围受压侧混凝土压碎，试件侧向挠度发展速度有所加快，在 GFRP 管的约束作用下，钢管外围碎裂混凝土逐

渐压密,外围混凝土再次获得承载能力,使得试件的延性和可承受的荷载得以提升。整个加载过程中, FCECFST 柱中侧向挠度变化曲线上下接近于对称,与正弦半波曲线较吻合;但 CECFST-II 试件最大侧向挠度集中在试件中上部,这可能是由于振捣不充分,上部骨料沉积削弱了试件中上部的力学性能所致。

2.5 荷载-应变曲线

图 7 为不同偏心距下各试件不同部件中部的荷载-应变曲线,图中 C 与 T 分别表示试件受压侧与受拉侧,V 与 H 则分别表示试件轴向与环向应变。

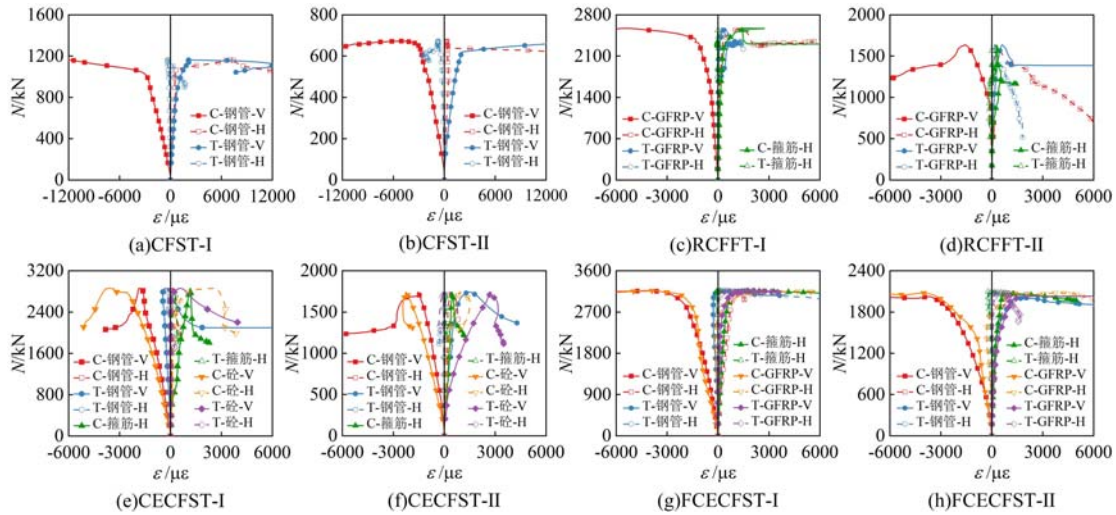


图 7 荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves

由图 7 可见,CFST 的荷载-应变曲线在荷载峰值后趋于平稳;RCFFT 的荷载-应变曲线则是在峰值荷载后出现小幅度下降,随后小偏心试件各应变随荷载增大保持不变,大偏心试件荷载-应变曲线缓慢降低,说明大偏心荷载下 RCFFT 外部的 GFRP 管尚未充分发挥其性能便过早破坏;CECFST 在峰值荷载后钢管外部混凝土破碎,各部件荷载-应变曲线出现较陡下降,表明试件延性较差,是明显的脆性破坏;所测 2 种偏心距下 CECFST 峰值荷载对应的钢管纵向应变值最大仅为 $1827\mu\epsilon$,小于钢管的屈服应变 $1950\mu\epsilon$,说明此时钢管仍处于弹塑性阶段,内部钢管混凝土工作性能未充分发挥;RCFFT 与 CECFST 箍筋应变较小,这是由于两类试件混凝土膨胀开裂速度过快,箍筋无法提供有效的约束作用造成的。

FCECFST 各部件的应变发展充分,且加载初期应变均与荷载呈线性关系,为典型的弹性特征;峰值荷载前试件内部钢管的纵向应变稳定增长至钢管屈服,之后钢管纵向应变仍均匀增长,钢管强度得到充分利用,表明 GFRP 管有效地解决了钢管内外混凝土难以协同工作至破坏的缺点;峰值荷载后,箍筋应变逐渐开始增加直至箍筋屈服,这是因为 GFRP 管与钢管为混凝土提供的约束作用,有效延迟了混凝土裂缝开裂,使箍筋充分发挥作用,从而表现出试件良好的组合效应,同时也使受压区混凝土处于三向受压状态,导致试件各测点受压侧环向应变均大于受拉侧,试件抗压能力提高;当受拉侧箍筋退出工作后,GFRP 管受拉侧轴向应变在达到极限断裂应变后逐渐失效,结合试验现象可知其原因是由于 GFRP 管受拉侧纤维率先沿环向开裂所致。

3 力学性能分析

衡量偏压荷载下组合柱试件的主要力学性能指标有:极限承载力 N_u 、抗弯刚度 EI 、延性及耗能,其中延性和耗能分别采用延性系数 μ 和耗能系数 ω 来反映,各试件力学性能对比分析如图 8 所示。

3.1 极限承载力

不同形式组合柱的极限承载力对比如图 8(a)所示。从偏心距上看,不同形式构件大偏心下的极限

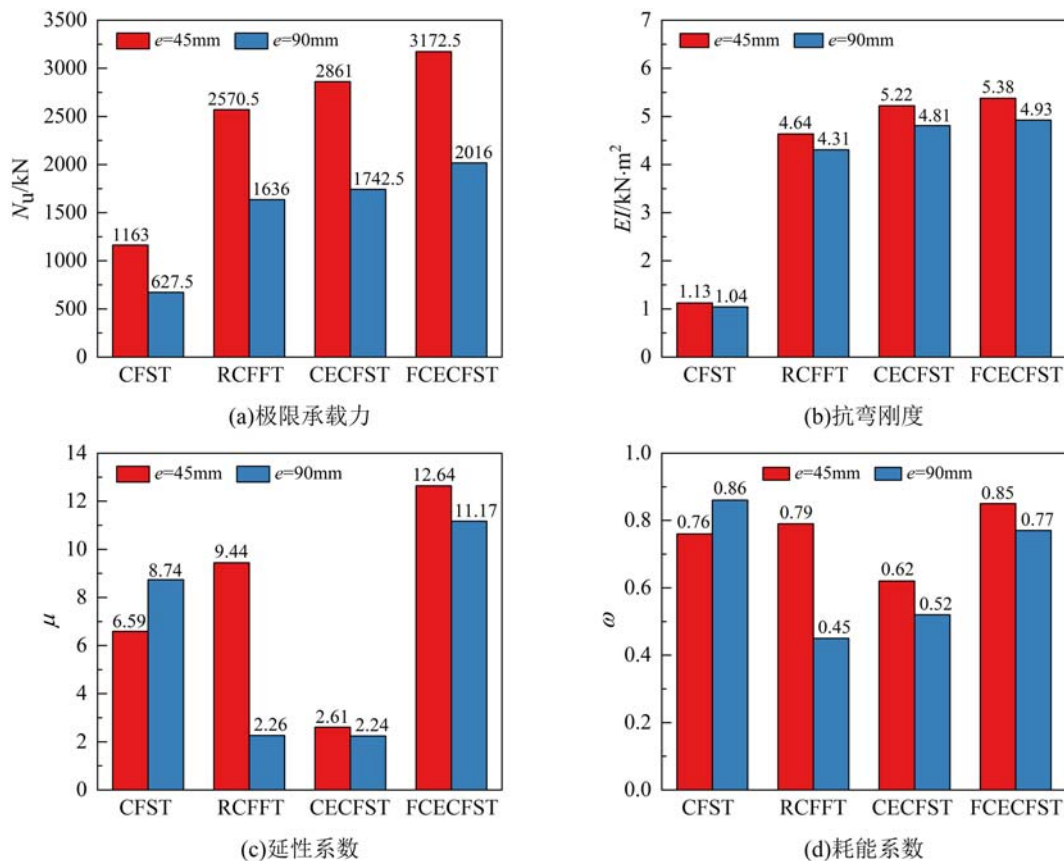


图 8 力学性能指标

Fig. 8 Mechanical performance indicators

承载力均明显小于小偏心。从组合形式上看,与 CFST 相比,FCECFST 核心处的 CFST 受到箍筋与 GFRP 管的双重约束作用,而外围混凝土的存在也极大程度地提升了 FCECFST 的轴向强度,大偏心与小偏心受压下 FCECFST 极限承载力比 CFST 分别提高 199.78%、172.79%;与 RCFFT 相比,由于 FCECFST 核心处设置有钢管混凝土,当加载到外围混凝土部分破碎时,其内部的钢管混凝土仍能继续承受荷载,故 FCECFST 大偏心荷载与小偏心荷载下比 RCFFT 分别提高 23.23%、23.42%;而与 CECFST 相比,由于 FCECFST 中 GFRP 管的存在,限制了混凝土破碎剥落,并使受压侧混凝土处于三向受压应力状态,因此 FCECFST 大偏心与小偏心荷载下的极限承载力相比 CECFST 分别提高了 15.7%、10.89%,可见 FCECFST 具有更好的组合效应。

3.2 抗弯刚度分析

抗弯刚度反映了构件抵抗变形的能力,本文采用文献[15]的方法计算抗弯刚度。考虑到 FCECFST 加载初期挠度变化极小,为有效与其他组合构件进行抗弯刚度对比,取 N-f 曲线(图 5)荷载由 0.4N_u至 0.8N_u对应的割线斜率计算柱中截面的抗弯刚度 EI:

$$EI = \frac{\Delta N(e + \Delta f)L_0^2}{\pi^2 \Delta f} \quad (1)$$

式中:ΔN 与 Δf 分别为荷载于 0.4N_u至 0.8N_u时构件对应的荷载增长值与跨中挠度增长值。

由式(1)计算得到各试件抗弯刚度如图 8(b)所示。由图 8(b)可知,各类别试件大偏心荷载作用下的抗弯刚度均略小于小偏心荷载,这是由于偏心率越大,试件受二阶效应越明显,因此试件抵抗变形的能力越小;FCECFST 抗弯刚度相较 CFST 有极大提升;与 RCFFT 相比,FCECFST 小偏心与大偏心荷载作用下抗弯刚度分别提升 14.3%、16.03%,核心钢管混凝土对试件抗弯刚度提升明显;与 CECFST 相比,FCECFST 柱中截面的抗弯刚度无显著提升,结合试验现象和荷载柱中挠度曲线分析可知,弹性阶段 2 种试件均无明显挠曲变形且挠度曲线也较为贴近,GFRP 管对试件使用阶段的抗弯刚度影响不

大。

3.3 延性分析

延性体现了构件从屈服到破坏的变形能力,延性系数 μ 定义为名义极限荷载下柱中侧向挠度 f_u 与屈服挠度 f_y 之比^[15]:

$$\mu = \frac{f_u}{f_y} \quad (2)$$

式中:名义极限荷载取峰值荷载下降至 85% 时所对应的荷载,屈服挠度 f_y 则由图 9 所示的 R. Park 模型^[16] 确定。

由图 8(c) 可知,与其他类别试件相比,FCECFST 延性系数最大,说明 FCECFST 延性更高,屈服后变形能力更好;RCFFT 在大偏心荷载作用下延性系数相比小偏心大幅降低,降幅达 76.06%,说明相比 FCECFST,由于 RCFFT 无核心钢管混凝土,随着偏心距的增大,试件受拉区面积增大,混凝土受拉破坏早,导致试件延性陡降,可见核心钢管混凝土对组合构件的延性影响突出;CECFST 的延性系数最小,试件屈服到破坏的变形能力较差,小偏心与大偏心对应的延性系数相对 FCECFST 分别下降 79.95%、79.35%,可见设置 GFRP 管能有效改善试件的延性性能,并使试件屈曲后仍能充分发挥核心钢管混凝土优势;CFST 大偏心下的延性系数优于小偏心,由于外围无钢筋混凝土与 GFRP 管约束,大偏心与小偏心的延性系数相较 FCECFST 分别降低了 21.75% 和 47.86%。

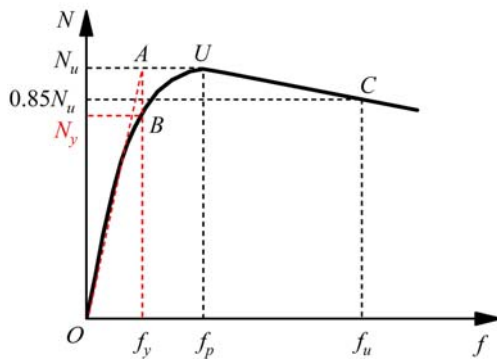


图 9 R. Park 模型

Fig. 9 R. Park method

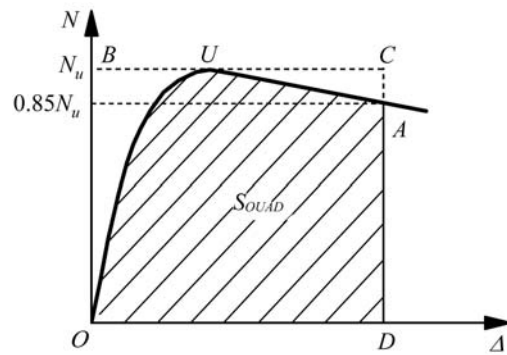


图 10 耗能计算模型

Fig. 10 Calculation model of energy dissipation coefficient

3.4 耗能分析

耗能能力反映构件吸收能量和耗散能量的大小。本文采用文献[17]中的方法,如图 10 所示,通过荷载-轴向位移曲线(图 4)对表征耗能能力的耗能系数 ω 进行计算,公式如下:

$$\omega = \frac{S_{OUAD}}{S_{OBCD}} \quad (3)$$

式中: S_{OUAD} 为荷载下降至 $0.85N_u$ 时荷载-轴向位移曲线与坐标轴所围的面积; S_{OBCD} 为经过曲线峰值点的平直线 BC 和荷载下降至 $0.85N_u$ 时所对应的竖直线 CD 与坐标轴所围的面积。

由图 8(d) 可知,CFST 与 FCECFST 相比虽有着较好的耗能性能,但结合图 8(a) 分析可得 CFST 极限承载力过低;RCFFT 与 FCECFST 相比,小偏心与大偏心荷载下耗能系数分别降低 7.06%、41.56%,且 RCFFT 的耗能能力受偏心距影响较大,可见随偏心距增大,核心钢管混凝土对耗能能力有更为显著的影响;CECFST 与 FCECFST 相比,小偏心与大偏心荷载作用下耗能系数分别降低 27.06% 和 32.47%,这是由于 GFRP 管的约束作用,使得外围混凝土碎裂后未剥离而是受荷使裂缝闭合以吸收能量,以及 GFRP 管本身达到破坏形态时吸收部分的能量,故 GFRP 管对试件耗能能力的影响较大;而 FCECFST 由于同时存在核心钢管混凝土与 GFRP 管,使得该构件在偏心荷载作用下有着优异的耗能能力。

4 结论

本文基于 4 种不同类别的组合构件 FCECFST、CECFST、RCFFT 与 CFST,并考虑 2 种偏心距

45mm 和 90mm,共进行了 8 根组合试件的偏心受压试验,通过研究分析试验结果,并讨论各构件的偏压力学性能,主要得出以下结论:

(1) 偏压荷载作用下,FCECFST 的破坏以 GFRP 管中的纤维沿环向断裂为标志,柱中 GFRP 管由局部白纹发展成裂口并直至纤维断裂,破坏征兆明显,但 FCECFST 保持了相对较好的完整性。

(2) FCECFST 偏压试件的荷载-轴向位移曲线大致划分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性下降段和失效阶段 4 个阶段;FCECFST 弹性阶段以轴向变形为主,塑性下降段承载力下降缓慢、跨中挠度增长较快;FCECFST 侧向挠度曲线与理想正弦半波曲线较为吻合。

(3) FCECFST 各材料的应变发展更为充分且逐层传递;核心钢管于 FCECFST 达到峰值荷载之前屈服,内部钢管混凝土力学性能得以充分发挥,钢管内外混凝土具有较好的协同变形能力;FCECFST 箍筋于峰值荷载后屈服,有效发挥了箍筋的约束作用。

(4) 在核心钢管混凝土的骨架作用和 GFRP 管的有效约束作用下,FCECFST 表现出比另 3 种组合柱更为优异的极限承载力、抗弯刚度、延性与耗能能力等偏压力学性能以及组合效应。

参考文献:

- [1] 韩林海,陶忠,王文达. 现代组合结构和混合结构: 试验、理论和方法(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2017 (HAN Linhai, TAO Zhong, WANG Wenda, et al. Advanced composite and mixed structures: testing, theory and design approach(2nd ed)[M]. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese))
- [2] Zheng J L, Wang J J. Concrete-filled steel tube arch bridges in China[J]. Engineering, 2018, 4(1):143-155.
- [3] 韩林海,牟廷敏,王法承,等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5):1-24 (HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5):1-24 (in Chinese))
- [4] 王致成,杨果岳,费强. 圆钢管粗钢渣混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 实验力学, 2022, 37(2):253-262 (WANG Zhicheng, YANG Guoyue, FEI Qiang. Uni-axial behavior of CFST columns containing steel slag coarse aggregate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(2):253-262 (in Chinese))
- [5] Cai J M, Pan J L, Lu C. Mechanical behavior of ECC-encased CFST columns subjected to eccentric loading[J]. Engineering Structures, 2018, 162:22-28.
- [6] Cai J M, Pan J L, Tan J L, et al. Behavior of ECC-encased CFST columns under eccentric loading[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30:101188.
- [7] 代岩,赵均海,张常光. CFRP 和角钢复合加固钢管混凝土叠合柱轴心受压承载力分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(17):96-103 (DAI Yan, ZHAO Junhai, ZHANG Changguang. Analysis of axial compression bearing capacity of CFRP and angle steel composite reinforced concrete-filled steel tubular columns[J]. Building Structure, 2018, 48(17):96-103 (in Chinese))
- [8] 杨茜. 碳纤维布加固火灾后钢管混凝土叠合短柱轴压分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020 (YANG Qian. Axial compression analysis of burned CFST reinforced concrete short columns strengthened with CFRP[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020 (in Chinese))
- [9] 王溥麟. 碳纤维布加固钢管混凝土叠合构件纯弯性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020 (WANG Pulin. Pure bending behavior of CFRP reinforced concrete filled steel tubular composite members after fire[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020 (in Chinese))
- [10] 马辉,张鹏,厉嘉鑫,等. GFRP 管型钢再生混凝土组合柱轴压性能及承载力计算[J]. 实验力学, 2019, 34(3): 467-477 (MA Hui, ZHANG Peng, LI Jiaxin, et al. Axial compression performance and bearing capacity calculation of GFRP tube filled with steel-reinforced recycled concrete composite column [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(3):467-477 (in Chinese))
- [11] 李双蓓,潘星年,陈宇良,等. GFRP 管约束钢管混凝土加劲混合柱轴压力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2022(5):31-36 (LI Shuangbei, PAN Xingnian, CHEN Yuliang, et al. Experimental study on mechanical properties of axially loaded GFRP tubed confined concrete-encased CFST columns[J]. Concrete, 2022(5):31-36 (in Chinese))

- [12] 马辉, 陈云冲, 赵艳丽, 等. 偏压荷载下圆钢管型钢再生混凝土组合柱非线性行为研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1081—1091 (MA Hui, CHEN Yunchong, ZHAO Yanli, et al. Study on nonlinear behavior of composite columns of RAC-filled circular steel tube and profile steel under eccentric compression loads[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1081—1091 (in Chinese))
- [13] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010 (GB/T 228.1—2010, Metallic materials-tensile testing—part 1: method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010 (in Chinese))
- [14] GB/T 3354—2014, 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014 (GB/T 3354—2014, Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014 (in Chinese))
- [15] 陈宗平, 黄乐彰, 谭秋虹. 方钢管螺旋筋混凝土柱偏压性能试验及参数分析[J]. 工程力学, 2021, 38(1):205—219 (CHEN Zongping, HUANG Lezhang, TAN Qiuhong. Experimental study and analysis of concrete filled square steel tube columns with spiral reinforcement under eccentric compression[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(1):205—219 (in Chinese))
- [16] Park R, Paulay T. Reinforced concrete structures[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1991.
- [17] 陈宇良, 李浩, 吴辉琴, 等. 三向受压状态下轻骨料混凝土的变形性能及损伤分析[J]. 实验力学, 2021, 36(5):668—676 (CHEN Yuliang, LI Hao, WU Huiqin, et al. Deformation performance and damage analysis of lightweight aggregate concrete under three-dimensional compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(5):668—676 (in Chinese))

Experimental study on mechanical properties of GFRP tubed confined concrete-encased concrete filled steel tubular columns under eccentric compression

ZENG Junke¹, LIANG Rui^{1,2}, SU Quanfu¹, LI Shuangbei^{1,3}

(1. College of Civil and Engineering and Architectural, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: In order to improve the mechanical difference between the inner and outer concrete of the steel tube and the low combination effect of the concrete-encased concrete filled steel tubular (CFST) members, glass-fiber reinforced polymer (GFRP) tube was used to constrain them. This paper studied the mechanical properties of GFRP tubed confined concrete-encased CFST member (FCECFST) under eccentric pressure and compared it with ordinary concrete-filled steel tube reinforced composite column, GFRP tube restrained reinforced concrete column, and concrete-filled steel tube column through the test of eccentric pressure. The load-deformation curves, lateral deflection distribution curves, and load-strain curves were used to analyze the failure mechanism of the specimens. The results show that the damage of FCECFST under bias is marked by the fracture of circumferential fibers. Compared with the other three composite members, FCECFST has a higher peak value of load deformation curve and a smoother falling section, showing good ultimate bearing capacity, flexural rigidity, ductility, and energy dissipation capacity. The GFRP tube has an obvious restraint effect on the peripheral concrete and has a significant influence on the mechanical properties of the specimens under eccentric pressure.

Keywords: concrete-encased concrete-filled steel tubular columns; composite columns; GFRP tube; static test; eccentric compression performance