

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704073



钢板笼混凝土组合柱的 偏压性能试验

曾志兴, 刘祥, 侯鹏飞, 余文茂, 林强

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过对 9 根钢板笼混凝土组合柱和 1 根钢筋混凝土柱的偏压试验, 研究钢板笼混凝土组合柱偏压的基本力学性能, 并分析不同参数对钢板笼混凝土组合柱偏压力学性能的影响. 结果表明: 钢板笼混凝土组合柱的偏压破坏特征与钢筋混凝土柱基本相同, 试件中部符合平截面假定, 横向曲线近似正弦半波曲线; 钢板笼混凝土组合柱与钢筋混凝土柱相比, 耗能可提高 110%, 延性可提高 48%; 偏心距是影响钢板笼混凝土组合柱偏压承载力的主要因素, 长细比在 4~10 范围内对承载力影响不大; 随着含钢率增大, 试件的承载力增大, 但提高的幅度逐渐减小.

关键词: 钢板笼混凝土柱; 偏心受压; 力学性能; 偏心距; 长细比; 纵向配钢量

中图分类号: TU 370.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)05-0638-05

Experimental Research on PCS Reinforced Concrete Column Under Eccentric Compression

ZENG Zhixing, LIU Xiang, HOU Pengfei,
YU Wenmao, LIN Qiang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The mechanical properties of prefabricated cage system (PCS) composite column under eccentric compression were experimentally studied by 9 PCS composite columns and 1 ordinary reinforced concrete (RC) column, the influence of different parameters was also discussed. The result indicates that the form of destruction of PCS composite column is similar to RC column; the plane section assumption is valid in the middle part of the column; the deflection of column is close to half-wave sinusoid; PCS composite column has about 110% higher capacity of energy dissipation and 48% higher ductility than RC column. Eccentricity is the main factor of bearing capacity of PCS composite columns. Slenderness ratio in the range of 4-10 has little effect on the bearing capacity. The bearing capacity of the specimen increases with the increase of the steel ratio, but the increase ratio gradually reduces.

Keywords: prefabricated cage system reinforced concrete column; eccentric compression; mechanical property; eccentricity; slenderness ratio; longitudinal steel ratio

钢板笼混凝土结构是一种新型的混凝土结构体系^[1-2], 不仅继承了钢筋混凝土结构的许多优点, 还有其独特的优点, 如力学性能方面, 它对核心区混凝土约束能力强, 大大提高了构件的延性及耗能能力; 施工方面采用工厂预制, 比钢筋混凝土结构施工快, 而且整体性好, 保证了稳定优质的施工质量. 钢板笼 (prefabricated cage system, PCS) 结构最早由美国学者 Shamsai 等^[3-4] 在 2005 年首次提出的. 他们

收稿日期: 2017-04-22
通信作者: 曾志兴(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构的研究. E-mail: zhixing@hqu.edu.cn.
基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J01095); 福建省泉州市科技计划资助项目(2014Z116)

对 21 根高强 PCS 混凝土柱和 16 根普通 PCS 混凝土柱进行轴压试验,结果表明:在同等配筋率和混凝土强度下,PCS 组合柱对核心混凝土的约束能力比普通钢筋混凝土强,耗能比普通混凝土提高 80%。国内也有对钢板笼混凝土构件进行相关试验研究,文献[5-8]通过对 4 根不同配箍特征值的钢板笼混凝土短柱进行轴压试验,结果表明:PCS 组合柱的轴压破坏特征与普通钢筋混凝土柱相似,延性比普通钢筋混凝土提高 49%,耗能比普通钢筋混凝土提高 73.5%。本文对钢板笼混凝土组合柱的偏压性能进行试验,研究其在不同参数影响下的破坏形态、承载力、延性等力学性能。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

通过对纵筋的等强代换原则设计了 PCS-3 的对比件 RC。图 1 为试件 PCS-1 的截面;图 2 为加工好的钢板笼。试件具体参数如表 1 所示。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[9]中的方法,设计了 9 根钢板笼(PCS)混凝土组合柱(编号:PCS-1~PCS-9)和 1 根钢筋混凝土(reinforced concrete,RC)柱作对比。柱的截面尺寸均为 250 mm×250 mm,保护层均为 25 mm;混凝土强度等级均为 C30,钢板笼均采用 6 mm 厚的 Q235 级钢,钢筋纵筋采用 HRB 400 级,箍筋采用 HPB 300 级;RC 的箍筋间距为 80.5 mm,钢板笼箍筋宽度为 6 mm,间距均为 76.5 mm。表 1 中:钢板开孔尺寸 21-61-36-61-21 表示 21 为钢板尺寸,61 为开孔尺寸,36 为钢板尺寸,其他以此类推。

表 1 钢板笼混凝土柱试件参数表

Tab. 1 Parameter of PCS columns

编号	偏心距/mm	长细比	纵向含钢率/%	开孔尺寸/mm	配箍特征值
PCS-1	0	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-2	30	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-3	60	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-4	90	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-5	60	4	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-6	60	8	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-7	60	10	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-8	60	6	2.07	16-70-28-70-16	0.236
PCS-9	60	6	3.38	26-53-42-53-26	0.236
RC	60	6	1.97	—	0.236

对试件进行加载前,对混凝土、钢板、钢筋进行材料性能试验,设计强度等级为 C30 的混凝土立方体抗压强度实测值为 30.05 MPa。拉伸试验结果表明:Q235 钢板板厚为 6 mm,屈服强度和极限强度分别为 287,375 MPa;HRB 400 级钢筋直径为 14 mm,屈服强度和极限强度分别为 443,595 MPa。

1.2 加载及测量方案

试验采用 10 MN 电液伺服压剪试验机进行加载。为实现柱的偏压,在柱试件的两端分别安置刀铰模拟两端铰接的边界条件。为防止柱端局部破坏,在柱子的两端分别用碳纤维增强复合材料(CFRP)布进行加固处理。加载示意图和加载装置,分别如图 3(a),(b)所示。

试验严格遵循 GB 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》^[10],试验采用位移和荷载双参数控制,分级加载。在竖向钢板达到屈服 80%前采用荷载控制为主,每级加载 10 kN,之后采用位移控制,每级加载 1 mm,每次加载之前,进行预加载。

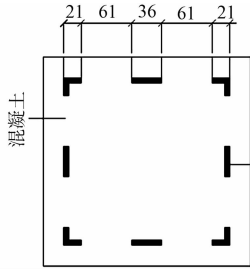
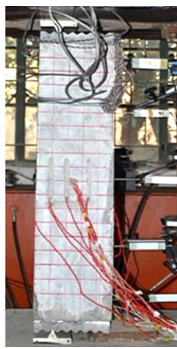
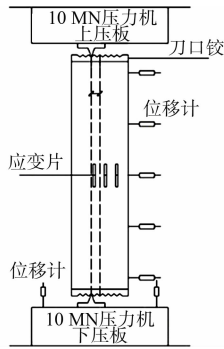


图 1 试件 PCS-1 截面简图(单位:mm)
Fig. 1 Section of specimen PCS-1 (unit: mm)



图 2 加工好的钢板笼
Fig. 2 Prefabricated steel cage



(a) 加载简图 (b) 加载实物图

图 3 加载装置

Fig. 3 Experiment set-up

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试验现象与钢筋混凝土柱偏压基本相同,主要分为轴心受压破坏、大偏心受压破坏、小偏心受压破坏 3 种情况.

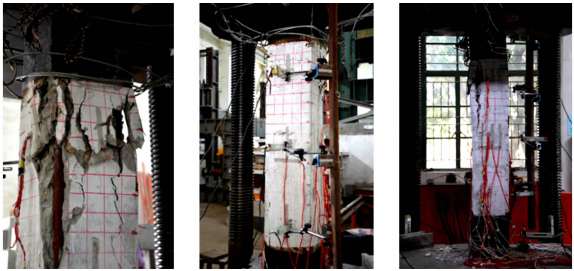
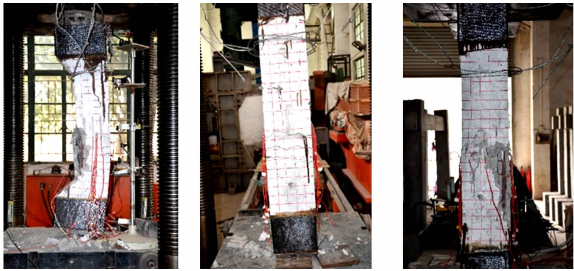
1) 轴心受压破坏. 试件 PCS-1 在加载初期试件没有明显的变形,加载至约 17%极限荷载时,试件中部出现 0.04 mm 宽的裂缝;此后一段试件内裂缝增加较少,裂缝宽度维持不变;加载至约 80%极限荷载时,试件夹角处开始起皮,随后各个夹角均有轻微压碎并少量剥落. 接近极限荷载时,柱子上部 CFRP 布加固区裂缝竖向扩展迅速,混凝土保护层压碎剥落,随后承载力迅速下降,露出的钢板笼纵向钢板弯曲,试件破坏. 试件轴心受压破坏,如图 4 所示.



图 4 轴心受压破坏图
Fig. 4 Damage under axis compression

2) 大偏心受压破坏. 试件 PCS-4 破坏过程与普通钢筋混凝土(试件 RC)过程相似. 加载初期,荷载较小,混凝土未开裂,钢板、混凝土应变呈线性增长状态;加载至约极限荷载的 10%时,受拉区(荷载远端)出现裂缝,随着荷载增长,裂缝数量及宽度增加,基本为水平裂缝且等间距出现. 随后出现 1~3 条主要裂缝,主要裂缝发展较快且向受压区延伸,加载至 50%极限荷载时,受拉区混凝土退出工作,纵向钢板应变突变,受压区混凝土竖向裂缝达 0.1 mm;加载至约 85%极限荷载时,受拉区钢板屈服;加载至 90%极限荷载时,侧面与受压面夹角竖向裂缝扩展明显;达到极限荷载后,承载力下降缓慢,随后受压面混凝土被压碎,受拉面裂缝开展明显;下降至 80%极限荷载时,受压面混凝土保护层部分掉落,至 70%时,全部掉落,停止加载. 试件大偏心受压破坏,如图 5 所示.

3) 小偏心受压破坏. PCS-1~PCS-3, PCS-5~PCS-9 在荷载较小(约 10%极限荷载)时,受拉面中部偏上出现水平裂缝,随着荷载增大,受拉面裂缝逐渐向两侧面扩展,试件变形不明显;加载至 85%极限荷载时,受压面出现竖向裂缝,受压面与侧面夹角的保护层开始剥落;达到极限荷载时,受压面中部偏上混凝土压碎,承载力下降;荷载下降至 70%极限荷载时,结束加载. 试件小偏心受压破坏,如图 6 所示.



(a) 侧面 (b) 受拉面 (c) 受压面 (a) 受压面 (b) 受拉面 (c) 侧面
图 5 大偏心受压破坏图 图 6 小偏心受压破坏图

Fig. 5 Damage under large eccentric compression Fig. 6 Damage under small eccentric compression

2.2 平截面假定验证

在各级荷载作用下,部分典型试件的柱中截面的纵向应变(ϵ)与界面高度(h)的关系,如图 7 所示. 由图 7 可知:PCS 偏压柱在加载初期能够保持较好的平截面变形,加载后期有测点偏离了平截面假定. 这可能与试验误差及混凝土开裂有关,但总体来看,加载过程基本符合平截面假定.

2.3 钢板应变

PCS 组合柱跨中钢板的荷载(F)-应变(ϵ)曲线,如图 8 所示. 图 8 中:受拉为正,受压为负;数字对应相关试件编号,如 1 代表 PCS-1 受拉钢板应变,1'代表 PCS-1 受压钢板应变. 由图 8 结合试验现象可知: PCS-1~PCS-3, PCS-5~PCS-9 达到极限承载力前,受拉应变随荷载增大而增大,达到极限强度后,应变的水平阶段不明显或无水平阶段,发生明显的脆性破坏;PCS-4 钢板的受拉、受压应变均呈现线性增长、非线性增长和水平发展 3 个阶段,受拉钢板强度得到充分利用,呈明显的延性破坏.

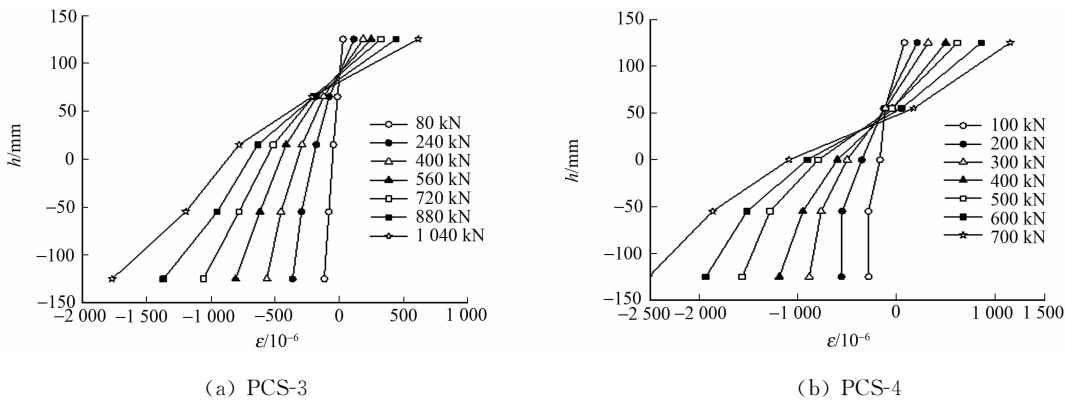


图 7 试件的平截面假定
Fig. 7 Plane section assumption of specimens

3 PCS 组合柱偏压力学性能分析

3.1 初始偏心距的影响

不同初始偏心距下, PCS 组合柱的荷载 (F)-挠度 (Y) 曲线, 如图 9(a) 所示. 由图 9(a) 可知: 初始偏心距是影响 PCS 组合柱极限承载力的主要因素, 初始偏心距越大, 其极限承载力越小, 相应的荷载-挠度曲线斜率也越小. 初始偏心距越大, 其弹塑性发展过程越长, 试件破坏后承载力下降也越平缓.

3.2 长细比的影响

不同长细比下, PCS 组合柱的荷载 (F)-挠度 (Y) 曲线, 如图 9(b) 所示. 由图 9(b) 可见: 长细比的变化与试件极限承载力的关系没有明显的规律, 可能在此范围内影响不大. 另外, 长细比越大的试件, 其荷载-挠度曲线斜率越小, 说明其刚度越小. 这可能是由于长细比增大使试件的 P - δ 效应更加明显.

3.3 纵向配钢量的影响

不同纵向配钢量下, PCS 组合柱的荷载 (F)-挠度 (Y) 曲线, 如图 9(c) 所示. 由图 9(c) 可见: 配钢量是影响 PCS 组合柱极限承载力的主要因素, 配钢量越大, 其极限承载力越

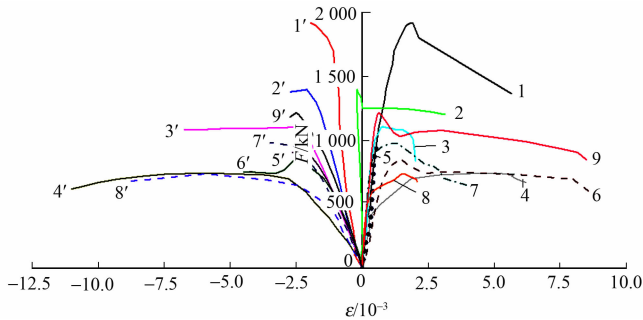
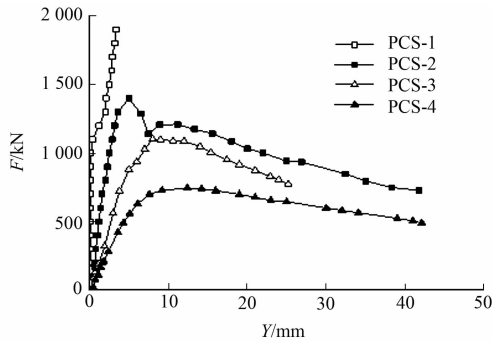
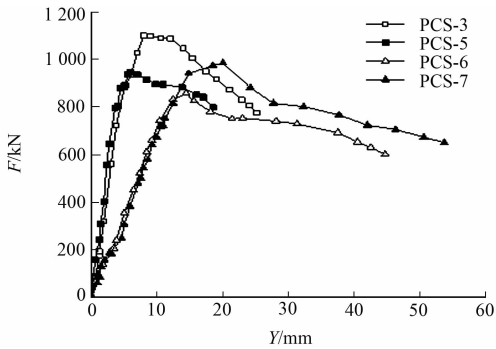


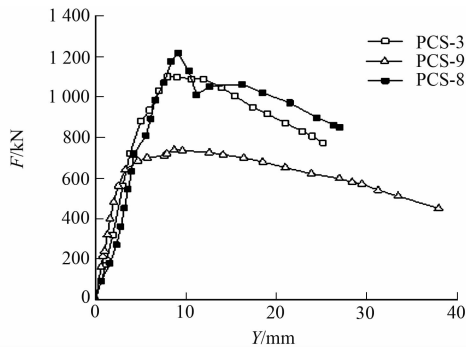
图 8 试件钢板荷载-应变曲线
Fig. 8 Load-strain curve of steel of specimens



(a) 初始偏心距



(b) 长细比



(c) 纵向配钢量

图 9 PCS 组合柱的的荷载-挠度曲线
Fig. 9 Load-deflection curve of PCS composite columns

大,但当配钢量大于一定值时,其承载力增大不明显;在加载初期,配钢量对试件荷载-挠度曲线的斜率影响不明显,接近极限承载力时,配钢量越小的试件,其斜率越小,变形能力越大.

3.4 PCS 组合柱与 RC 柱对比

PCS 组合柱与 RC 柱的荷载(F)-挠度(Y)曲线,如图 10 所示.由图 10 可知:PCS 组合柱的偏压极限承载力(1.100 MN)与 RC 柱(1.099 MN)相差不大;PCS 组合柱的荷载-挠度曲线的斜率比 RC 柱的小,说明其变形能力比 RC 柱好;PCS-3 组合柱耗能能力(20.868 kJ)明显大于 RC 柱(9.938 kJ),提高 110%;PCS-3 组合柱的延性(13.5)比 RC 柱的延性(9.1)好,提高 48%^[11].

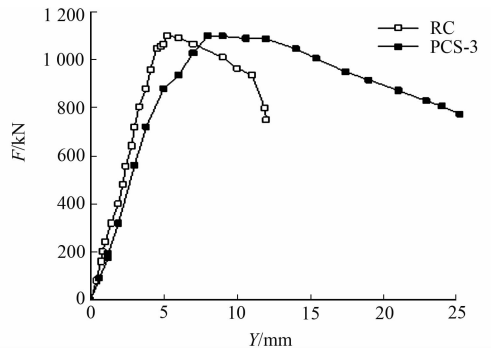


图 10 PCS 组合柱与 RC 柱的荷载-挠度曲线
Fig. 10 Load-deflection curve of PCS composite column and RC column

4 结论

- 通过对钢板笼混凝土组合柱(PCS 组合柱)的偏压性能进行试验,得到以下 3 点主要结论.
- 1) PCS 组合柱的偏压破坏特征与钢筋混凝土柱(RC 柱)基本相同,试件中部符合平截面假定,横向曲线近似正弦半波曲线.
 - 2) PCS 组合柱偏压承载力与钢筋混凝土柱(RC 柱)相差不大,但耗能及延性要优于钢筋混凝土柱(RC 柱),分别提高 110%和 48%.
 - 3) 偏心距是影响 PCS 组合柱偏压承载力的主要因素,长细比在 4~10 范围内对承载力影响不大.随着含钢率增大,试件的承载力增大,但提高的幅度逐渐减小.所得结论可为今后钢板笼混凝土的发展及应用提供参考.

参考文献:

[1] CHITHRA R, THENMOZHI R. Studies on prefabricated cage reinforced steel-concrete composite beams[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2011, 12(1): 27-31.

[2] SHAMSAI M, SEZEN H. Fast and easy concrete construction using innovative steel reinforcement[C]// Construction Research Congress. San Diego: ASCE, 2005: 1-10. DOI: 10.1061/40754(183)63.

[3] SHAMSAI M, SEZEN H. Prefabricated cage systems for reinforced concrete member[D]. Columbus: The Ohio State University, 2006: 36-44.

[4] SHAMSAI M, SEZEN H. Behavior of square concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 89-100. DOI: 10.1617/s11527-010-9611-y.

[5] 曾志兴, 李飞, 梁扬滨. 钢板笼混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(9): 51-55. DOI: 10.13204/j.gyjz201409013.

[6] 梁扬滨, 曾志兴, 陈荣淋, 等. 钢板笼混凝土短柱轴压性能的数值模拟[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 88-91. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2014.01.0088.

[7] 梁扬滨, 曾志兴, 苏江林, 等. 钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 576-580. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0576.

[8] 李飞. 钢板笼混凝土短柱的轴压性能试验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2012: 27-32.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 207-211.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 23-26.

[11] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 125-132.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)