

高轴压比下预制装配柱在水平周期荷载下的抗震性能

秦元¹ 刘喜² 吴涛² 张敏^{3*} 钱凯³

(1. 广西建工轨道装配式建筑产业有限公司 广西 柳州 545000;

2. 长安大学 建筑工程学院 陕西 西安 40023;

3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院 广西 桂林 541004)

[摘要]为研究装配混凝土柱抗震性能的影响,本文设计制作了3根(1根现浇,2根预制)具有相同混凝土强度、配筋率和配箍率的足尺钢筋混凝土柱,在0.6的高试验轴压比下,对其进行低周期往复荷载试验,研究其破坏形态、滞回特性。试验结果表明:装配柱套筒区会形成局部刚域,高轴压比下装配柱刚度略大于现浇柱,延性性能略低于现浇柱。随着纵筋直径的增加,钢筋与混凝土之间的所需的粘结应力增大,钢筋的粘结滑移现象明显,构件整体延性略有降低。建议加大套筒区上部箍筋加密区范围,同时配置复合箍筋以增大构件延性。

[关键词]高轴压比;不同纵筋直径;预制装配柱;抗震性能

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.03.1776

1 引言

装配式建筑在施工效率、节约资源、绿色环保以及应对劳动缺失方面具有巨大的优势,是建筑行业未来的发展趋势,在美国^[1-4]、欧洲^[5]以及在地震较为频发的中国^[6,7]、日本^[8]、新西兰^[9]等国家都有着较大比重的应用。

鉴于装配式结构的社会需求,以及对以上预制装配柱的抗震性能研究仍不完善的问题,本文设计制作了3根(1根现浇,2根预制)具有相同混凝土强度、配筋率和配箍率足尺钢筋混凝土柱,对其进行高轴压比下的低周往复荷载试验,研究破坏形态和滞回特性,对比分析不同施工方式的影响,为实际工程应用提供理论依据和指导。

2 试验概况

2.1 试验柱设计与材料力学性能

本次试验设计了2根由灌浆套筒连接的钢筋混凝土预制柱以及1根现浇柱,试件的主要参数见表1。试件的截面尺寸均为400mm×400mm,总高度均为1720mm(基础至加载点高度为1500),几何尺寸及配筋如图1所示(装配式构件立面配筋仅以PC-22构件为例)。试件所配的纵筋和箍筋均为HRB400级钢筋,其力学性能参数实测值见表2。灌浆套筒为深圳现代营造有限公司生产的“砼的”牌半灌浆套筒,型号为GTZB4。在预制柱安装的同时对预留套筒进行钢筋连接,待灌浆料达到设计强度后,进行拉拔试验,钢筋在套筒外部被拉断,且无拔出现象,2混凝土强度等级为C30,所有构件一次性全部浇筑,其力学性能见表2。

2.2 加载方案

采用悬臂式加载,如图2所示。首先采用液压伺服千斤顶对试件柱顶施加竖向预定轴力并保持恒定,然后采用作动器对试件施加水平低周反复荷载。水平加载采用位移控制,分为两个阶段,在最初的四个位移增量(位移角0.1%增加到0.33%)中,每级循环1次加载,之后的每个位移增量中,每级循环3次加载。直至试件的水平荷载下降至0.85 Pu(Pu为水平峰值荷载试验值)后,停止加载。

2.3 测量内容与测点布置

试件水平位移测点布置见图2。在柱顶加载合力点处与基础各布置一组位移计,用于测量柱顶加载合力点相对柱底面的水平位移。箍筋及纵筋应变片位置见图2,每根箍筋两个方向各布置1个应变片,纵筋应变布置对角的角部纵筋上。其中现浇柱箍筋应变布置在柱底部的两根箍筋上,分别位于距离柱底20mm和60mm处,预制装配柱箍筋应变布置在套筒上部的一根箍筋以及相邻向上的一根箍筋上,纵筋应变布置在柱底(即灌浆接缝处),以及套筒顶部20mm位置处。

表1 试件参数

| 表1 试件参数 | | | | | | |
|---------|-----------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|------|
| 编号 | 轴压比 <i>n</i> | 纵筋 | 配筋率 ρ (%) | 箍筋 | 配箍率 ρ_v (%) | 制作方式 |
| RC-22 | 0.6 | 8 Φ 22 | 2 | Φ 10@100/200 | 0.98/0.49 | 现浇 |
| PC-18 | 0.6 | 12 Φ 18 | 2 | Φ 10@100/200 | 0.98/0.49 | 预制 |
| PC-22 | 0.6 | 8 Φ 22 | 2 | Φ 10@100/200 | 0.98/0.49 | 预制 |

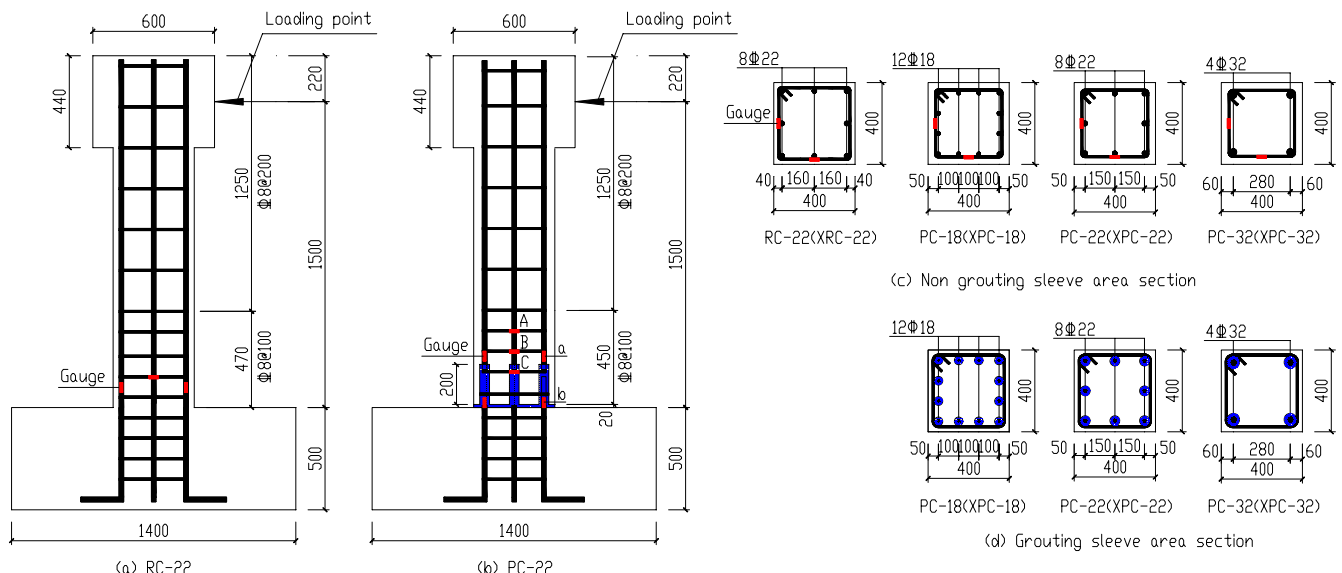


图1 试件配筋图

表2 钢材性能

| 直径 | 屈服强度 f_y (MPa) | 极限强度 f_{st} (MPa) | 弹性模量 E_s (GPa) | 伸长率 δ (%) |
|-----|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| Φ10 | 401.3 | 600.8 | 200 | 23 |
| Φ18 | 404.5 (417) | 605.5 (609) | 200 | 22 |
| Φ22 | 411.3 (429) | 600.3 (602) | 200 | 22 |
| Φ32 | 400.7 (423) | 603.9 (601) | 200 | 20 |

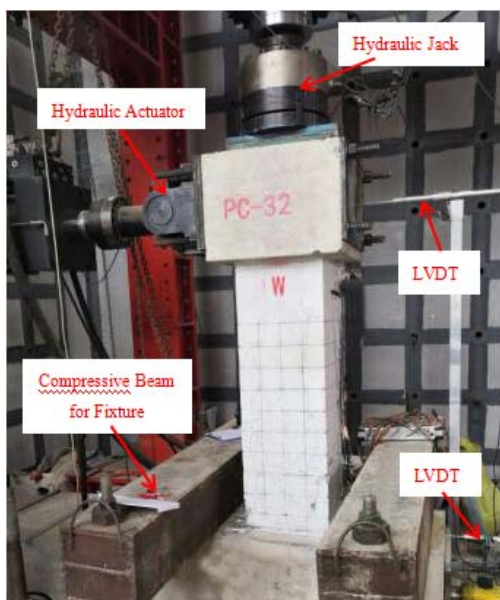


图2 加载装置

3 试验现象与破坏特征

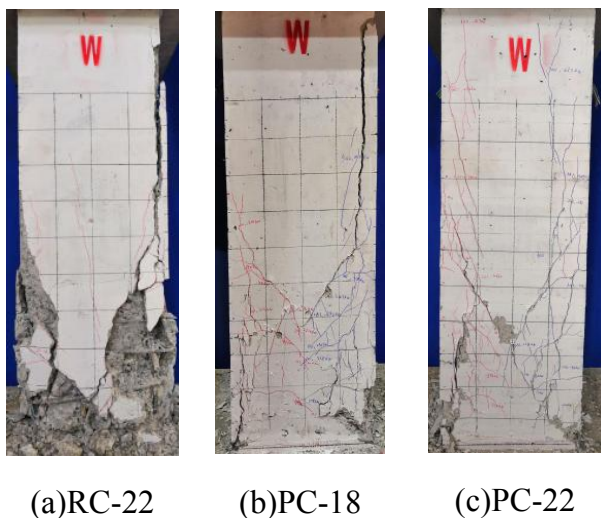


图3 破坏模式

各个试件其破坏前裂缝开展情况见图3所示。RC-22试验现象：当位移加载至3mm时，柱S面底部出现宽度为0.2mm的水平贯通裂缝；位移加载至10mm时，纵筋屈服，S和N面水平裂缝增多，宽度增大，并延伸到W面和E面形成X形裂缝；位移加载至17.5mm时，水平荷载达到峰值；位移加载至25mm时，构件水平承载力降至峰值荷载的85%，此时柱底钢筋保护层混凝土大面积被压碎并剥落，核心混凝土部分被压碎。

PC-18和PC-22构件的试验现象较为相近，同时其不同点

又有一定的规律可循。当位移加载至6mm时，柱底灌浆料接缝处首先出水平现裂缝，缝宽0.1mm，但此裂缝在整个加载过程中变化不明显。随后柱身出现裂缝，其变化发展规律与现浇构件（RC-22）相似，但同时又都有其自身特点。首先，灌浆套筒对核心混凝土起保护作用，形成柱身的局部刚域，套筒区混凝土裂缝开展只在其保护层处进行，构件破坏后套筒区核心混凝土基本完好，柱身斜裂缝主要出现在套筒区上部，构件破坏时，套筒区上部纵筋受压屈服但变形较小，箍筋形状保持较好，同时随着纵筋直径增大，钢筋与混凝土之间的所需的粘结应力增大，其裂缝发展规律由柱底套筒区上部“X向斜裂缝”转变为“沿纵筋周边的粘结锚固裂缝”。

4 荷载-位移滞回曲线

各构件达到其自身屈服荷载后，基本再进行2到3轮次位移加载即达到最大水平荷载，随后再进行2到3轮位移加载构件破坏。由图4可知：整浇试件的滞回曲线形状更为饱满，预制装配试件的滞回曲线的捏拢现象较明显，其耗能能力略差于整浇试件。其主要原因为预制装配构件的柱底套筒区的局部刚度较大，使得其受水平荷载时柱身的实际长度变短，构件延性降低。随着构件纵筋直径的增大构件滞回曲线的捏拢现象变得更为明显，粗钢筋与混凝土共同工作时所需的粘结应力较大，构件在承受水平往复荷载时容易产生相对滑移。

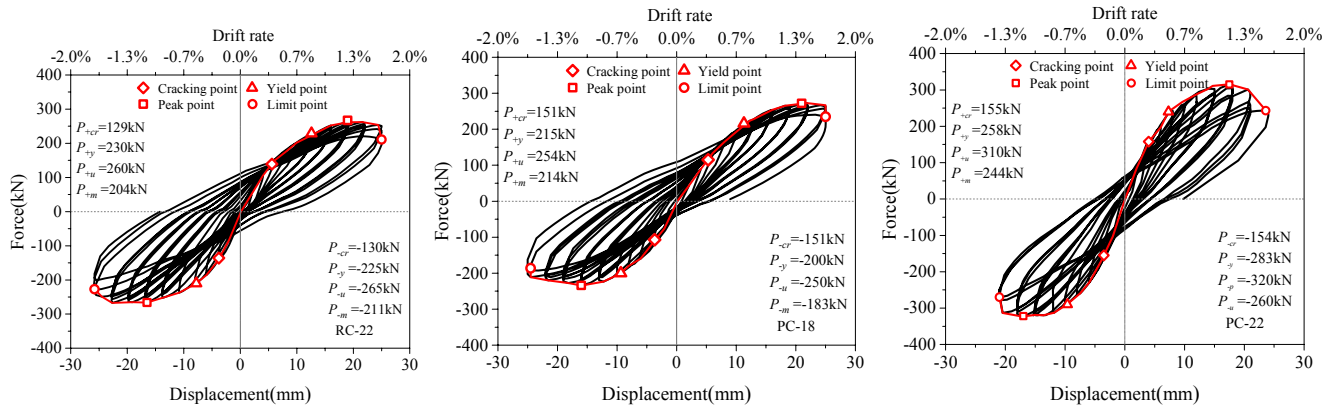
5 结论与建议

1、装配柱套筒区会形成局部刚域，使得其在承受水平荷载时构件长度变短，剪跨比增大，故高轴压比下，其整体刚度高于现浇柱，且在各个特征点的承载力均大于现浇柱，同时其延性性能也略低于现浇柱。

2、高轴压比下的装配柱在受到正向低周往复荷载时，随着纵筋直径的增加，钢筋与混凝土之间的所需的粘结应力增大，其裂缝发展规律由柱底套筒区上部“X向斜裂缝”转变为“沿纵筋周边的粘结锚固裂缝”，钢筋的粘结滑移现象明显，构件整体延性略有降低。

参考文献

- [1] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary (ACI 318R-11) [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2011.
- [2] American Concrete Institute. Guide to emulating cast-in-place detailing for seismic design of precast concrete structures: ACI-550.1R-09 [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2009.
- [3] American Concrete Institute. Special hybrid moment frames composed of discretely jointed precast and post-tensioned concrete members: ACI T1.2-03 [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2003.
- [4] Precast / Prestressed Concrete Institute. PCI design handbook [M]. 7th ed. Chicago: Precast / Prestressed Concrete Institute, 2010.
- [5] The International Federation for Structural Concrete (FIB). Model code 2010 [S]. Lausanne: The International Federation for Structural Concrete (FIB), 2012.
- [6] Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [7] Technical specification for framed structures comprised of precast prestressed concrete components: JGJ 224-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [8] Kato H, Ichisawa Y, Takamatsu K, and Okamoto N. Earthquake response of an eleven-story precast



(a) RC-22

(c) PC-18

(d) PC-22

图4 滞回曲线

prestressed concrete building by substructure pseudo dynamic test [C]. In 12th word Conference on Earthquake Engineering, Paper NO. 223, Upper Hurtt, New Zealand. New Zealand Society for Earthquake Engineering. 2000

[9] Park R.A perspective on the seismic design of precast concrete structures in New Zealand [J]. PCI J 1995: 40-60.

基金项目：国家自然科学基金优秀青年基金项目 (52022024)；国家自然科学基金面上项目 (51778153)

作者简介：

秦元，出生于1975年，男，本科，高级工程师，主要从事装配式建筑方面研究。

通讯作者简介：张敏，出生于1981年，男，工学博士，教授，主要从事装配式建筑方面研究。

(上接第1900页)

转身体对1点、仰拧动律成右手抱①左山膀手形成“桌+门”平面动作，双目对视中将“此时无声胜有声”之境显现出来。图9“结果”手语翻译为“右手拇指直立不动、左手食指从右手拇指划向小指”，手舞创作为②圆场步成右后点地、提沉动律成双摊掌做“结果”形成“轮+门+桌”平面动作亦是不舍，希望得到爱情；而③提沉动律成双摊掌做“结果”眼看①形成“桌+门”平面动作寓意受诱惑后复杂的内心与难以名状的无奈；同时①向左转身体对5点提沉动律成双手环抱并眼看③抬左旁腿形成“桌+轮+门”平面动作诠释着内心的依赖与盼君安好之愿，三人之间充斥着纠结与悲伤的氛围。人、狐情感纠葛在拉班三个面古典手语舞创作中展现得淋漓尽致，蕴含着空间和谐美，使外在的舞蹈形态与内在的情绪情感得到充分表现。

参考文献

[1] 庞佳. 多学科交叉融合观照下的手语舞蹈教学研究 [J]. 现代特殊教育, 2019, (9): 36.
 [2] 彭吉象. 中国艺术学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 337.

[3] 刘青弋. 现代舞蹈的身体语言教程 [M]. 上海: 上海音乐出版社, 2011: 71-72.

[4] Newlove J, Dalby J. Labanforall [M]. New York: Routledge, 2004: 51-52.

[5] [7] [8] 庞佳. 拉班手语舞蹈创编法 [H]. 南京: 南京特殊教育师范学院, 2019.

[6] 中国聋人协会. 中国手语 [M]. 北京: 华夏出版社, 2003.

作者简介

马浩瑞 (2000-), 女, 本科在读; 研究方向: 舞蹈教育。

蒋宇龙 (2000-), 男, 本科在读; 研究方向: 舞蹈教育。

章婉婷 (2000-), 女, 本科在读; 研究方向: 舞蹈教育。

【基金项目】本文系2020年国家级大学生重点创新创业训练项目“融合与创新: 中国古典手语舞拉班艺术风格研究” (项目编号: 202012048004Z) 的研究成果。