

含 FRP 约束环钢筋连接装配柱的抗震性能分析

金 峤,张永良,孙 丽

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 为了提高装配式混凝土柱节点的连接性能,探索预制装配式构件的数值建模方法。**方法** 采用 OpenSees 有限元分析软件建立了采用新型连接方式的宏观单元模型,结合精细化纤维截面分区技术和基于零长度截面单元的应变渗透效应模拟技术,分析应变渗透效应、连接接缝位置以及轴压比等因素对柱抗震性能的影响。**结果** 连接接缝位置靠近柱根部时,装配柱的滞回性能降低;装配柱的累计耗能稍大于现浇柱;装配柱的延性系数在 4.66~5.63 内,极限位移角在 1/51~1/71,均略小于现浇柱;不同轴压比条件下,装配柱的承载力和延性的变化规律与现浇柱相同。**结论** 连接接缝位置位于塑性铰区域外时,装配柱的承载力、刚度退化、耗能与现浇柱更为接近,在结构设计时应考虑预制柱连接接缝位置的影响。

关键词 装配式混凝土柱;纤维增强聚合物;OpenSees;抗震性能;应变渗透效应

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Seismic Performance Analysis of Assembled Columns with FRP-confined Reinforcement Lap Joint

JIN Qiao, ZHANG Yongliang, SUN Li

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the connection performance of prefabricated concrete columns with FRP-confined reinforcement lap joint. Based on the test results of the anchorage performance test and the lap performance test of this connection mode, the macroscopic element model of prefabricated column with this connection mode is established by using OpenSees software, combined with the refined fiber section zoning technology and the simulation technology of the strain penetration effects based on the zero length section, to analyze the effect of strain penetration, connection joint positions and axial compression ratio on the overall seismic performance of columns. When the connection joint position is close to the column root, the hysteretic performance of the prefabricated column decreases. The energy dissipation of the prefabricated column are slightly greater than the cast-in-place column. The ductility coefficient of the prefabricated column is between 4.66~5.63, and the drift ratio of assembled columns at ultimate is between 1/51~1/71, both of which are slightly less than the cast-in-place column.

收稿日期:2022-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(52078310)

作者简介:金峤(1975—),男,副教授,博士,主要从事装配式建筑等方面研究。

Under the condition of different axial compression ratios, the roles of the bearing capacity and ductility of the prefabricated columns are the same as those of the cast-in-place columns. The position of the connection joint is located outside the plastic hinge area of the assembled column, and its bearing capacity, stiffness degradation, and energy consumption are closer to those of the cast-in-place column. The influence of the joint position of prefabricated column connections should be considered in structural design.

Key words: prefabricated concrete column; fiber reinforced polymer (FRP); OpenSees; seismic performance; strain penetration effect

节点在装配式建筑中占有非常重要的地位,常用的装配式梁柱节点连接形式有灌浆套筒连接、约束浆锚钢筋搭接连接等。针对灌浆套筒连接式预制柱的研究很多^[1-3],研究结果证明了灌浆套筒连接可以有效地传递钢筋应力,使得预制装配砼柱具有等同现浇砼柱的抗震性能,但灌浆套筒连接方式在施工方面存在对中困难、施工精度要求高等问题,限制其在工程中的应用。M. Z. Yang 等^[4]对两个柱中连接的灌浆套筒装配式柱进行了振动台试验研究,结果表明灌浆套管连接的预制柱塑性铰上移明显。顾箭峰等^[5]采用拟静力试验和数值模拟的方法对不同套筒埋置位置 and 不同接缝位置的预拼桥墩进行了抗震性能分析,结果表明,接缝位于中部的预拼桥墩结构承载力高于现浇桥墩。J. Zhao 等^[6]通过采用零长度截面单元来模拟基础和构件接口处的构件端旋转,建立了由应变渗透效应引起的纵筋滑移本构模型,结果表明了这种基于零长度截面单元的滑移本构模型能够准确地模拟应变渗透效应,从而可以获得较为真实的构件反应。S. C. Girgin 等^[7]采用基于力的梁柱单元和纤维截面模型相关联的方法来反映几何非线性对柱响应的影响,并探究了纵筋屈曲和应变渗透对分析结果的影响。L. Zhao 等^[8]利用零长度单元配合 Pinching4 折线形单轴材料来反映往复荷载下的强度退化、卸载及加载刚度退化特性,此方法模拟精确度较高,但需要通过试验来获得 Pinching4 材料的相关参数。

综上所述,笔者提出一种“含 FRP 约束

环的钢筋搭接连接”装配式混凝土柱竖向钢筋新型连接方式,以此种新型连接节点内纵筋锚固、搭接性能试验^[9-10]为基础,利用 OpenSees 软件建立有限元模型,对比分析了装配式柱和现浇柱的抗震性能差异,并进一步探讨了应变渗透效应对装配柱滞回曲线的影响,不同连接接缝位置对装配柱承载力、刚度退化、延性和耗能能力等抗震性能指标的影响以及轴压比等因素对预制柱抗震性能的影响。该连接方式能够为钢筋提供宽松的搭接空间,可以有效降低施工精度和装配难度,合理地平衡装配式结构连接安全性与现场施工便宜性之间的矛盾。

1 装配式柱模型

1.1 数值模拟试验设计

图 1 为 FRP 约束环的钢筋搭接连接构造示意图。

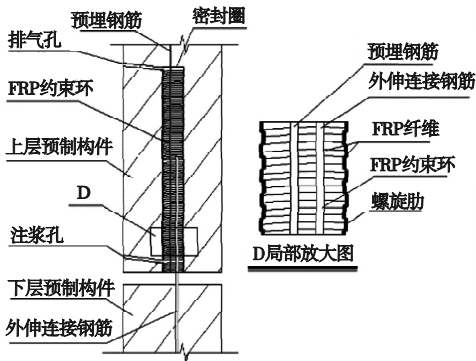


图 1 FRP 约束环的钢筋搭接连接示意图

Fig.1 Schematic diagram of bond connection of reinforcing bars with FRP restraint ring

整体分为上下两个子结构,在上柱下端

内部预埋有 FRP 约束环,FRP 约束环下部设有注浆孔,上部设有排气孔,顶端有带孔的封口弹性橡胶密封圈,上部预制构件纵筋穿过密封圈伸入 FRP 约束环内部与下部预制构件外伸钢筋搭接连接,装配后在 FRP 约束环内部注入微膨胀高强度灌浆料完成节点的连接。

预制柱、加载梁及地梁的混凝土强度为 C40,钢筋牌号为 HRB400;FRP 约束环高度为 600 mm、肋条间距为 20 mm,弹性模量为 70 000 MPa,极限强度为 1 400 MPa;灌浆料强度为 50 MPa。

基于 5 个不同连接接缝高度和 3 个轴压比的参数组合,设计了 7 个装配式柱试件及 3 个现浇试件,连接接缝高度 l_c 是指连接接缝距地梁顶面的垂直距离。数值模拟方案如表 1 所示。试件尺寸及配筋如图 2 所示。

表 1 数值模拟方案

Table 1 Numerical simulation scheme		
试件编号	轴压比	l_c/mm
XJ	0.2	—
PC1	0.2	100
PC2	0.2	200
PC3	0.2	300
PC4	0.2	400
PC5	0.2	500
PC2-0.4	0.4	200
PC2-0.6	0.6	200
XJ-0.4	0.4	—
XJ-0.6	0.6	—

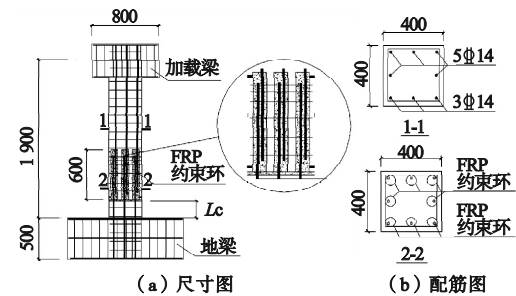


Fig. 2 Section size and reinforcements of specimens

加载方法采用位移控制加载,初级加载位移 $\Delta = 10\text{ mm}$,最大位移控制为 6Δ ,步长为 0.5 mm ,每级加载循环 3 次。

1.2 宏观分析模型

利用 OpenSees 分析平台建立装配式柱宏观分析模型,如图 3 所示。该模型采用纤维梁柱单元体系。柱截面为非线性纤维截面,用以模拟装配式柱连接节点区段内应力应变的真实复杂状态;在柱构件与地梁相接的固支端采用零长度截面单元,通过钢筋应力-滑移本构模型来模拟柱脚区域锚固钢筋的应变渗透效应。

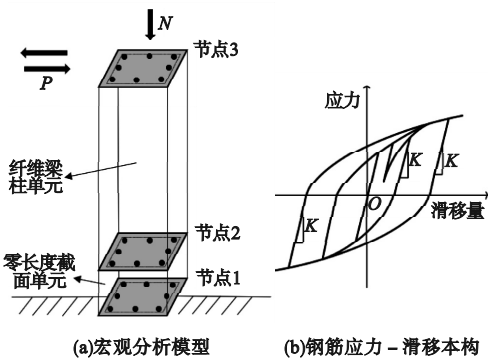


图 3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model

根据文献[9-11]的试验结果,若纵向受力筋的搭接长度 $l_l \geq 1.04l_a$ (l_a 为规范要求的搭接长度),就能够较好地实现钢筋应力传递,因此在模拟中可以不考虑搭接区域内竖向受力钢筋与灌浆料的黏结滑移效应。

文献[12]指出,剪跨比较大、以弯曲变形为主的柱子根部的弯曲刚度贡献率较大。笔者所设计的连接区域恰好位于柱根部的塑性铰区附近,由于高强灌浆料填充的 FRP 约束环本身具有较好的抗弯刚度,故在有限元分析中对 FRP 约束环的约束作用和抗弯作用均给予了考虑。

1.3 纤维截面各构成部分本构关系

在所建立的装配式柱宏观分析模型中,以材料类型和约束条件最复杂的连接区域为例来分析纤维截面的构成(见图 4)。

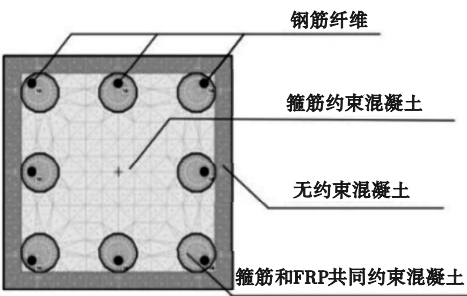


图4 柱连接区域纤维截面图

Fig.4 Precast concrete column fiber section

将该区域的纤维截面划分为四类:①无约束混凝土纤维截面(保护层),采用忽略混凝土受拉特性的单轴混凝土材料 Concrete01 模型(即改进的 Kent-Scott-Park 本构模型);②箍筋约束混凝土纤维截面(核心混凝土),采用能够考虑箍筋对核心区环箍作用的 Concrete04 模型(即 Mander 约束混凝土本构

模型);③箍筋和 FRP 共同约束混凝土纤维截面(灌浆料),采用 FRPConfinedConcrete 模型(即单轴 Megalooikonomou-Monti-Santini 混凝土本构模型);④钢筋纤维截面(纵向受力筋),采用考虑包兴格效应和钢筋强化影响的 Steel02 本构模型。上述部分关键材料本构关系如图 5 所示。此外,对于柱脚区域的零长度单元截面上的钢筋纤维,则采用 Bond_SP01 单轴材料本构模型来考虑锚固钢筋的应变渗透效应,其中,锚固钢筋滑移量 S_y 可以通过 J. Zhao 等^[6]提出的公式来获得:

$$S_y=2.54\left(\frac{d_b}{8\,437}\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}}(2\alpha+1)\right)^{\frac{1}{\alpha}}\quad(1)$$

式中: d_b 为锚固钢筋直径,mm; f_y 为锚固钢筋屈服强度,MPa; f_c' 为柱脚区域混凝土轴心抗压强度,MPa; α 为钢筋黏结滑移系数,取 0.4。

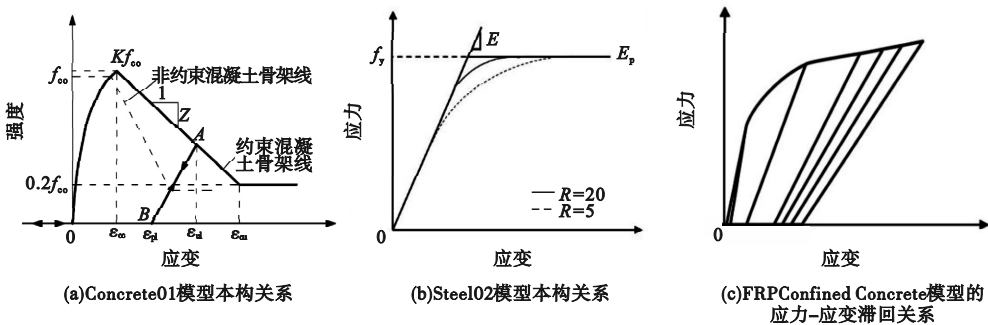


图5 材料本构关系

Fig.5 Constitutive relations

1.4 宏观分析模型验证

利用所建装配式柱宏观分析模型对文献[13-14]中的装配式柱 PRCC-03 试件和 PC3 试件进行数值模拟,并与其试验结果进行了比较,验证模型的有效性。试件的具体参数见表 2。图 6 为滞回曲线和骨架曲线的对比情

况。不难发现,考虑了应变渗透效应的模拟结果与试验结果相符性更好,而不考虑应变渗透效应的模拟结果则因为忽略了柱构件的初始弹性刚度、卸载刚度以及各次加载荷载极值的影响。基于应变渗透效应对结果的影响较大,因此,在柱构件的数值模拟分析中应予以考虑。

表2 模型验证试件参数表

Table 2 Sample parameters table for model validations

编号	截面长× 宽/mm	高度/ mm	混凝土强度/MPa	纵筋			箍筋			轴压比	
				配筋	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	配筋	体积配 箍率/ %	屈服强度/MPa		极限强度/ MPa
PRCC-03	400×400	1 800	38.23	8 Φ22	490	663	φ ^{HP} 5@50	0.8	1 052	1177	0.2
PC3	390×390	2 000	41.5	12 Φ16	528	626	φ8@150	0.71	550	647	0.32

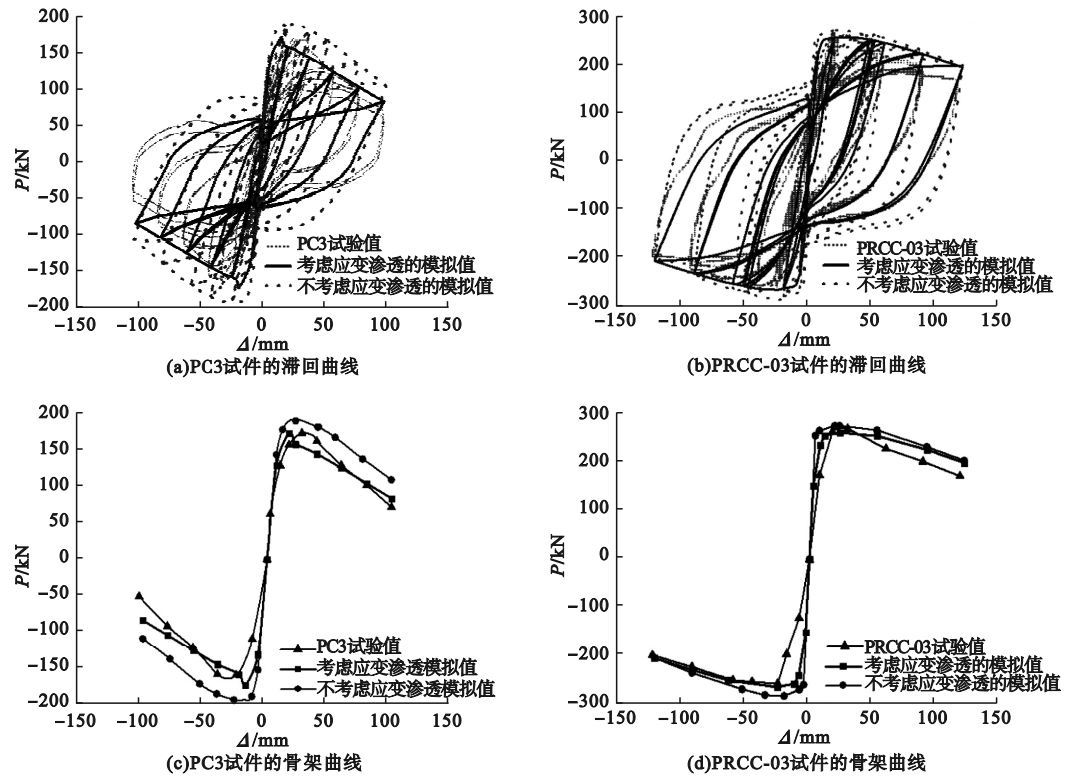


图6 滞回曲线和骨架曲线图
Fig. 6 Hysteretic curves and outlining curves

2 模拟结果及分析

2.1 滞回曲线分析

文献[15]指出,套筒连接区域柱截面刚度及承载力较大,柱的塑性铰区可能会上移到套筒连接区域以上。FRP 约束环构造与套筒类似,虽其刚度不及套筒,但仍需要进一步探究该连接方式的不同连接位置对柱整体性能的影响。因此,根据不同连接接缝高度,设计了5个装配柱试件(PC1~PC5)进行研究。

塑性铰高度计算采用 Paulay 等^[16]提出的公式:

$$l_p = 0.08L + 0.022 f_y d_b \quad (2)$$

式中: l_p 为柱塑性铰区高度,mm; L 为柱的高度,mm; f_y 为纵筋屈服强度,MPa; d_b 为纵筋直径,mm。

根据式(2)可得出试件塑性铰区高度为275 mm,图7为不同接缝位置与塑性铰区高度之间的对应关系。

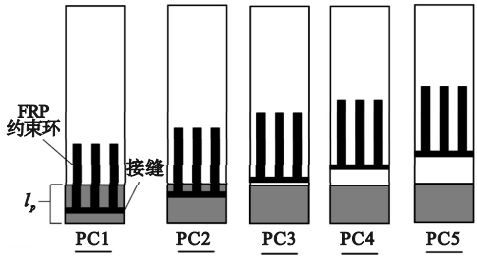


图7 试件连接位置与塑性铰区对应图
Fig. 7 Comparison diagram between the connection position of the specimen and the plastic hinge area

图8(a)、(b)分别为装配柱与现浇柱的滞回曲线情况。与现浇柱相比较,在循环荷载加载前期,所有装配柱的滞回环形状走势相同,而滞回环面积略小;在循环荷载加载后期,PC1 装配柱的滞回环形状塌缩较大,而且滞回环面积也显著减小,主要原因为接缝设置在柱脚,连接接缝高度较小。装配连接区域的薄弱环节容易被柱塑性铰区所放大,在循环加载后期会造成装配柱整体刚度和耗能能力的降低。

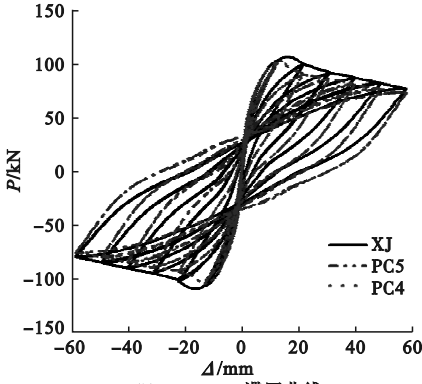
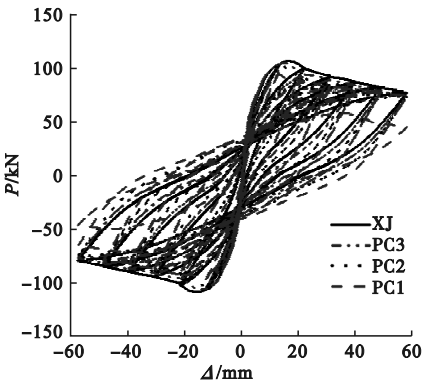


图 8 不同连接位置试件的滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of specimens with different connection positions

2.2 骨架曲线分析

图 9 为装配柱与现浇柱的骨架曲线对比情况。从图 9 中可以看出,装配柱的连接接缝位置无论是在柱塑性铰区内部,还是在外部,对骨架曲线的形状和走势影响都不显著。值得注意的是,当连接接缝位置在塑性铰区

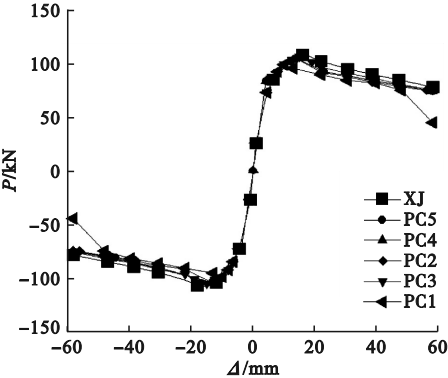


图 9 不同连接位置试件的骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens with different connection positions

外部时,装配柱的骨架曲线与现浇柱的骨架曲线更接近;而当连接位置在塑性铰区内部且靠近柱根部时,装配柱的骨架曲线末端会内收,反映了多次循环加载后柱整体强度、刚度均有降低。

2.3 耗能性能分析

图 10 为装配柱与现浇柱的累计耗能曲线。

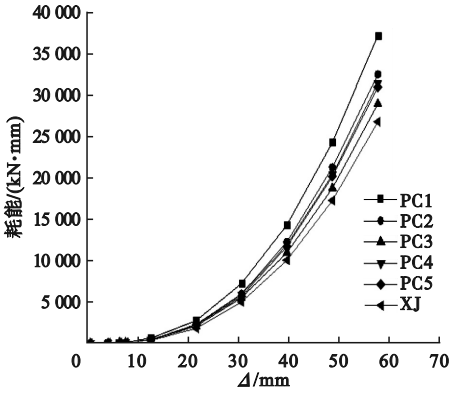


图 10 不同连接位置试件的累计耗能

Fig. 10 Energy dissipation curves of specimens with different connection positions

由图 10 中可以看出,装配柱与现浇柱的耗能随加载位移的增加而增加,前期加载阶段,耗能增加较缓,后期随着位移的持续增加,耗能增加速率加快;相同加载位移下,装配柱的耗能略大于现浇柱,而连接接缝位置在塑性铰区内部的装配柱,其耗能大于在塑性铰区外部的装配柱。在装配柱中,单轴 FRP Confined Concrete 约束混凝土本构模型可以较为真实地反映箍筋和 FRP 约束环对内部混凝土的横向约束作用,使得 FRP 约束环内的高强灌浆料连同内部连接钢筋会在柱子内部形成若干“小柱”,这些“柱中柱”的存在会增加弹塑性变形下的能量耗散;若连接接缝位置被置于塑性铰区内部,这些“柱中柱”会成为沟通塑性铰区和非塑性铰区的“纽带”,从而促使装配柱的塑性铰区上移^[12],扩大实际塑性铰区域的面积,带动更多的混凝土参与能量消耗。因此,从试件累计耗能角度考虑,采用该种连接方式的装配柱要比现浇柱更有些。

2.4 刚度退化分析

图 11 为装配柱与现浇柱的刚度退化曲线。由图 11 可知,不同连接位置的装配柱与现浇柱的刚度退化规律相似,即在加载前期刚度退化速度较快,待达到屈服荷载后,曲线的斜率减小并逐渐趋近于零。主要原因是 steel02 钢筋本构模型能够通过输入应变硬化比控制钢筋屈服后斜率与初始弹性模量的比值,使试件的变形与试验结果更相符。

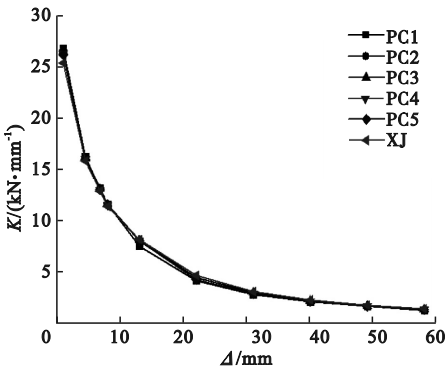


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 The curves of stiffness degradation

2.5 延性分析

表 3 为装配柱与现浇柱的延性系数和极限位移角的对比。5 个装配柱的延性系数为 4.66~5.63,与现浇柱的延性系数较为接近;而 5 个装配柱的极限位移角在 1/51~1/71

表 3 试件的延性系数和极限位移角

Table 3 Ductility coefficients and ultimate displacement angles of the specimen

试件编号	方向	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数	极限位移角/rad
XJ	推	6.67	36.84	5.52	1/52
	拉	6.82	37.18	5.45	1/51
PC1	推	5.75	26.78	4.66	1/71
	拉	5.94	30.71	5.17	1/62
PC2	推	6.04	28.38	4.70	1/67
	拉	6.21	30.41	4.90	1/62
PC3	推	6.26	31.43	5.02	1/60
	拉	6.37	33.30	5.23	1/57
PC4	推	6.13	29.15	4.75	1/65
	拉	6.29	35.42	5.63	1/54
PC5	推	6.17	29.25	4.74	1/65
	拉	6.32	37.24	5.90	1/51

之间,总体上略小于现浇柱的 1/52,主要因为内部 FRP 约束环和灌浆料提高了部分截面的抗弯刚度,从而导致变形能力减弱。

2.6 轴压比的影响

表 4 为现浇柱与相应的 PC2 装配柱(连接接缝高度 $l_c=200\text{ mm}$)的承载力及延性系数计算结果。

表 4 不同轴压比下试件的承载力及延性性能
Table 4 Bearing capacities and ductility of specimens under different axial compression ratios

试件编号	轴压比	峰值荷载/kN	极限荷载/kN	延性系数
PC2	0.2	104.6	89.0	4.70
PC2-0.4	0.4	125.8	107.0	2.78
PC2-0.6	0.6	124.0	105.4	2.24
XJ	0.2	108.4	92.1	5.52
XJ-0.4	0.4	127.8	108.6	2.83
XJ-0.6	0.6	126.2	107.3	2.67

从表 4 中发现,随着轴压比从 0.2 增加到 0.4、0.6,装配柱与现浇柱均出现了承载力增加而延性降低的现象。装配柱的峰值承载力分别提高了 20.27%、18.55%,现浇柱则分别提高了 17.16%、16.42%;装配柱的延性系数分别降低了 40.85%、52.34%,而现浇柱则降低了 48.73%、51.63%。从承载力和延性性能的变化来看,轴压比对于装配柱和现浇柱抗震性能的影响无显著区别。

3 结 论

- (1)笔者提出一种含 FRP 约束竖向钢筋搭接连接方式,建立了基于 OpenSees 平台材料库并考虑节点作用的装配柱模型,比较真实地反映了装配柱的抗震规律。
- (2)当连接位置位于塑性铰区域外时,装配柱的承载力、刚度及延性与现浇柱相符性较好,当连接位置处于塑性铰区域内时,二者相符性较差,为保证装配柱的抗震性能,建议将连接接缝位置设在塑性铰区域外。

(3)不同轴压比下,该种节点连接方式装配柱的延性和承载力与相应的现浇柱性能接近。

(4)鉴于特殊的连接机理,含 FRP 约束竖向钢筋搭接连接的装配柱在能量耗散方面略优于相同配筋的现浇柱,因此,充分挖掘装配式结构连接方式所带给结构的附加性能,也应如研究连接方式主体一样对其予以重视。

参考文献

- [1] NI W B, QIAO D H, SUN H W, et al. Seismic performance of a full-scale precast concrete I-shaped column frame structure with a grouted connection [J]. *KSCE journal of civil engineering*, 2022, 26(2): 753 – 769.
- [2] GAO L, LIU Y L, ZHANG X C, et al. Experimental study on grouting sleeve node of prefabricated frame structure [J]. *World earthquake engineering*, 2016, 32(1): 75 – 80.
- [3] BARTON R D, AMELI M J, PANTELIDES C P. Precast concrete bridge column-footing connections with recessed grouted splice sleeve connectors [J]. *ACI structural journal*, 2022, 119(1): 215 – 226.
- [4] YANG M, JIA Y, LIANG D. Shaking table tests and simulations of grouting sleeve connecting prefabricated bridge piers [J]. *Symmetry*, 2022, 14(1): 652 – 667.
- [5] 顾箭峰, 向春燕, 黄民水, 等. 套筒埋置位置对预制拼装桥墩结构抗震性能影响[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(5): 73 – 85.
(GU Jianfeng, XIANG Chunyan, HUANG Minshui, et al. Influence of sleeve embedded location on seismic performance of precast assembled bridge pier structure [J]. *Journal of Chang'an university (natural science edition)*, 2022, 42(5): 73 – 85.)
- [6] ZHAO J, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete [J]. *ACI structural journal*, 2007, (104): 133 – 141.
- [7] GIRGIN S C, MOHARRAMI M, KOUTROMANOS I. Nonlinear beam-based modeling of rc columns including the effect of reinforcing bar buckling and rupture [J]. *Earthquake spectra*, 2018, 34(3): 1289 – 1309.
- [8] ZHAO L, BI K, HAO H, et al. Numerical studies on the seismic responses of bridge structures with precast segmental columns [J]. *Engineering structures*, 2017, 151: 568 – 583.
- [9] 温学彬. 含 FRP 约束环钢筋锚固性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(WEN Xuebin. Experimental study on anchorage performance of steel bars with FRP confined ring [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [10] 高猛. 含 FRP 约束的装配式剪力墙钢筋搭接连接研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(GAO Meng. Study on the overlapping connection of reinforcements in prefabricated shear wall with FRP confined rings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [11] 李京龙. 含 FRP 约束竖向钢筋连接的装配式剪力墙抗震性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
(LI Jinglong. Seismic behavior of assembled shear wall with FRP constrained vertical reinforcement connections [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.)
- [12] LIU H, CHEN J, XU C, et al. Seismic performance of precast column connected with grouted sleeve connectors [J]. *Journal of building engineering*, 2020, 31: 271 – 282.
- [13] 王建. 套筒浆锚连接钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
(WANG Jian. Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete columns assembled by grout-filled sleeve and mechanical connection [D]. Xi'an: Xi'an University of architecture and technology, 2013.)
- [14] POPA V, PAPURCU A, COTOFANA D, et al. Experimental testing on emulative connections for precast columns using grouted corrugated steel sleeves [J]. *Bulletin of earthquake engineering*, 2015, 13(8): 2429 – 2447.
- [15] 中国建筑标准设计研究院. JGJ 1—2014 装配式混凝土结构技术规程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(China Institute of Building Standard Design & Research. JGJ 1—2014 Technical specification for prefabricated concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [16] PAULAY T, PRIESTLEY M. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, 1992.
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)