

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201911019

# 预制混凝土柱与独立基础浆锚连接抗震性能研究\*

陈俊<sup>1</sup>, 彭月<sup>1</sup>, 曹子美<sup>1</sup>, 许福<sup>1</sup>, 赵晨辉<sup>1</sup>, 杨才千<sup>1,2</sup>, 张白<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411100; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210009)

**摘要:** 为研究预埋波纹套管内预制混凝土柱与独立基础浆锚连接试件的抗震性能, 进行了6个预制装配式柱和1个现浇柱的拟静力低周循环往复荷载试验。试验重点研究了柱纵筋锚固长度、轴压比、柱底纵筋局部脱黏(柱底锚固纵筋5倍直径范围内)对预制柱抗震性能的影响。结果表明: 柱纵筋锚固长度为 $10d$ 时( $d$ 为钢筋直径), 基础发生了开裂破坏, 随着锚固长度的增加, 破坏形态由基础开裂破坏变为柱脚弯曲破坏; 为使预制柱与现浇柱的抗震性能相当, 柱纵筋最小浆锚长度不宜小于 $20d$ ; 轴压比一定时, 对柱纵筋进行局部脱黏处理, 可改善试件的延性及耗能能力。柱纵筋锚固长度一定时, 随着轴压比的增加, 试件的水平极限承载力及刚度均增大。

**关键词:** 预制混凝土柱; 浆锚连接; 抗震性能; 锚固长度; 局部脱黏

**中图分类号:** TU375.3   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0142-09

## Research on Seismic Behavior of Prefabricated Concrete Columns and Independent Foundation with Grouted Corrugate Sleeve

CHEN Jun<sup>1</sup>, PENG Yue<sup>1</sup>, CAO Zimei<sup>1</sup>, XU Fu<sup>1</sup>, ZHAO Chenhui<sup>1</sup>, YANG Caiqian<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Bai<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** To study the seismic performance of prefabricated columns and independent foundation connection with grouted corrugate sleeve, six prefabricated columns and one cast-in-place column were tested under pseudo-static low-frequency cyclic load. The influences of anchorage length of column reinforcement, axial compression ratio and the partial debonding of column reinforcement with 5 times the diameter of the column reinforcement on the seismic behavior were investigated. The results show that when the anchorage length of the column reinforcement is  $10d$ , the foundation breaks; with the increase of the anchorage length, the failure mode changes from the base cracking to the column bending failure; in order to make the seismic performance of the prefabricated column equivalent to the cast-in-place column, the minimum anchorage length of the column reinforcement should not be less than  $20d$ ; when the axial compression ratio is constant, the partial debonding of column reinforcement can

\* 收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2020-02-17

基金项目: 湖南省国际与区域科技创新合作重点研发项目(2018WK2111, 2018WK2110)、湖南省创新创业技术投资项目(2018GK5028)、湖南省自然科学基金(2019JJ60047)资助

作者简介: 陈俊(1973—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事预制装配式结构研究。E-mail: chenjun0325@126.com

通讯作者: 杨才千(1974—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事先进传感与结构健康监测、预制装配式结构研究。

E-mail: yecqjxx@hotmail.com

improve the ductility and energy consumption of the specimen. When the anchorage length of the column reinforcement is constant, the horizontal ultimate bearing capacity and the stiffness of the specimen increase with the increase of the axial compression ratio.

**Keywords:** prefabricated concrete column; grouted anchors; seismic performance; anchorage length; partial debonded

## 引 言

随着我国建筑工业化的推进,预制柱节点浆锚连接越来越广泛的应用在民用房屋建筑中,国内外学者对其进行了大量研究:贾俊峰等<sup>[1]</sup>研究了采用灌浆金属波纹管锚固钢筋连接的预制RC墩柱的抗震性能,研究发现预制柱的损伤主要发生在墩底与承台交界面处以及墩柱塑性铰区。刘阳等<sup>[2]</sup>对带有榫头的套筒灌浆连接柱进行了拟静力试验研究,结果表明预制柱的抗震性能与现浇柱相当。赵勇等<sup>[3]</sup>对6个大直径高强钢筋预制柱采用套筒灌浆连接进行了拟静力试验,其中轴压比为0.25的试件,出现了受力钢筋从套筒中拔出现象。李锐等<sup>[4]</sup>对6个钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱进行了低周往复加载试验,研究了钢筋强度等级、轴压比和灌浆料强度对其抗震性能的影响,结果表明,套筒顶部破坏最严重,轴压比较小的预制柱根部灌浆层结合面发生了破坏。关宏波等<sup>[5]</sup>对采用GFRP管与基础灌浆连接的预制柱进行抗震性能研究,结果表明轴压比对预制柱的耗能能力和刚度退化影响较大。陈俊等<sup>[6]</sup>将预制柱脚5倍纵筋直径范围内的纵筋进行脱黏处理,研究灌浆连接预制柱与基础连接的抗震性能,结果表明脱黏处理能提高预制柱的延性系数。

Y.Zhou等<sup>[7]</sup>研究了波纹套管内钢筋与高强灌浆料的黏结锚固性能,研究表明钢筋与高强浇筑料可靠黏结,且钢筋达到其极限抗拉强度所需的最小锚固长度均小于ACI 318M-05<sup>[8]</sup>、Eurocode 2<sup>[9]</sup>、《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup>中规定的最小值。N.Burratti等<sup>[11]</sup>研究了预制混凝土柱与基础在钢管内灌浆连接时的抗震性能并进行有限元分析,得出了预制柱具有良好的抗震性能和整体性能。B.Feng等<sup>[12]</sup>通过试验研究和有限元分析方法,研究了轴压比和剪跨比对灌浆连接预制混凝土短柱水平抗剪承载力的影响,结果表明短柱的抗剪承载力随着轴压比

或剪跨比的增大而增大;提高轴压比能明显提高该连接的性能。M.Tazarv等<sup>[13]</sup>制作了一种镀锌波纹管灌浆连接的预制混凝土圆形柱,并对柱与基础交界处的纵筋进行无黏结处理,通过水平低周往复加载试验发现无黏结处理提高了预制柱的抗震性能及延性性能。M.T.Nikoukalam等<sup>[14]</sup>对预制柱脚塑性铰区域的纵筋进行局部脱黏,进行了三个预制柱的低周往复加载试验,研究表明脱黏处理减小了钢筋应力集中现象,延缓塑性铰的形成,提高了预制柱的延性性能。

独立基础因经济、抗不均匀沉降强等优点越来越广泛的应用于装配式中低层建筑中。目前对柱节点抗震性能研究中,柱通常与基础梁连接,对采用浆锚连接的预制柱与独立基础节点的抗震性能研究较少。为此本文开展了波纹管浆锚连接预制柱与独立基础抗震性能试验研究,分析其水平极限承载、延性及耗能能力等力学指标。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文设计了6根预制装配式长柱及1根现浇钢筋混凝土柱作为对比。各试件基本参数见表1。试件详细尺寸及配筋如图1所示,其中图1(a)基顶未配置钢筋,受力时柱纵向钢筋将应力传递给基底钢筋;图1(b)中脱黏处理能减少柱脚区域钢筋的应力集中现象,使脱黏区域钢筋的应力分布均匀,改变了柱脚塑性铰的形成过程;图1(c)、(d)为独立基础配筋详图。

预制柱与独立基础混凝土的设计强度为C30。预埋金属波纹管的内径为50 mm,预埋至预制独立基础的长度为600 mm。试件构造满足《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup>与《建筑抗震设计规范》<sup>[15]</sup>要求,本试验的抗震等级为二级。

预制混凝土柱与基础通过预埋金属波纹套管

连接,试件制作与装配过程如图2所示。文献[6, 14]研究结果表明,柱脚纵筋局部脱黏可提高预制柱的延性性能,为研究脱黏处理对预制柱与独立基

础连接抗震性能的影响,将部分试件在柱与基础界面以下5倍纵筋直径范围内对纵筋进行脱黏处理。

表1 试件基本参数

Table1 Basic parameters of specimens

试件名称	粘结情况(*1)	纵筋配筋	配筋率	柱纵筋锚固长度	轴力/kN	设计轴压比
CIP1	现浇	4C20	1.67	—	301.5	0.2
PC10-0.2	有粘结	4C20	1.67	10d	301.5	0.2
PC20-0.2	有粘结	4C20	1.67	20d	301.5	0.2
PC10-0.4	有粘结	4C20	1.67	10d	603.0	0.4
PC20-0.4	有粘结	4C20	1.67	20d	603.0	0.4
PC10A5-0.2	无粘结	4C20	1.67	10d	301.5	0.2
PC10A5-0.4	无粘结	4C20	1.67	10d	603.0	0.4

注:(\*1)是指柱纵筋局部黏结情况;CIP1指现浇试件,PC代表预制试件;0.2(0.4)代表轴压比;10(20)代表柱脚纵筋插入波纹管的长度为10(20)倍柱纵筋直径;A代表柱纵筋无黏结处理位于预制柱与基础交界面以下;5为无黏结长度为5倍柱纵筋直径;轴力为竖向轴力设计值,根据轴压比与实测混凝土轴心抗压强度和截面积的乘积计算得到

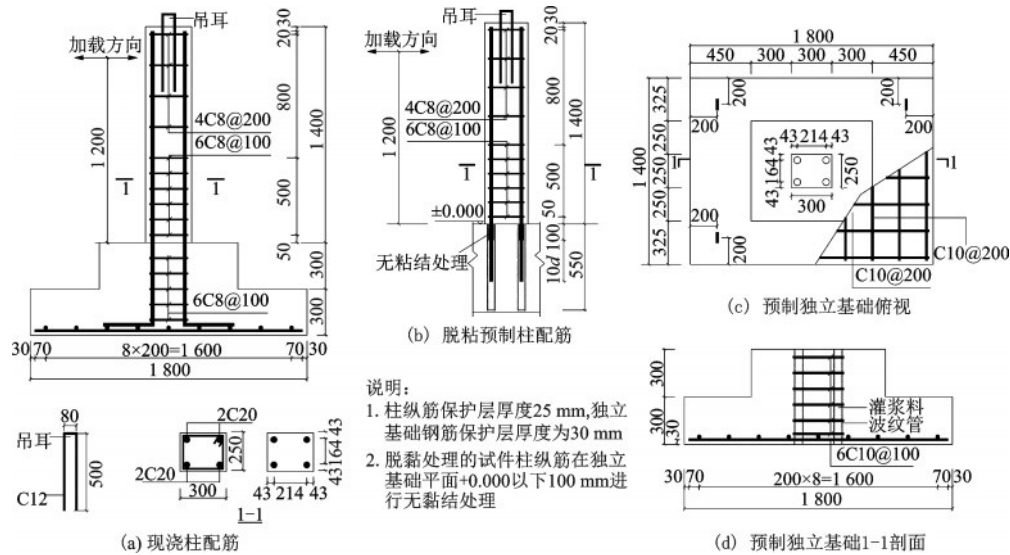


图1 试件配筋

Fig.1 Reinforcement details of specimens

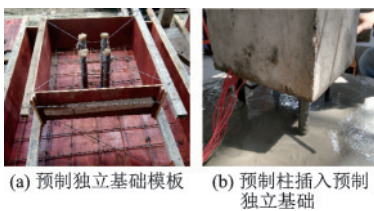


图2 试件制作与装配过程

Fig.2 Fabrication and assembly process of specimens

## 1.2 材料性能

浇筑混凝土及 HPG-A 灌浆料时预留混凝土标准试块,与试件同条件养护 28 d 后在 SYE-2000

型压力试验机上对试块进行抗压强度试验,分别测得混凝土立方体抗压强度为 32 MPa, HPG 立方体抗压强度为 50 MPa。将留置的钢筋在万能试验机上进行拉伸试验,测得钢筋的总伸长率、钢筋屈服强度、钢筋极限强度见表 2。

## 1.3 加载装置与加载方案

试验装置如图 3 所示,2 000 kN 穿心千斤顶施加竖向预定恒定轴力,水平作动器施加水平力,作动器吊装辅具的作用是减少作动器自重对实验结果的影响。试件沿加载方向两端采用滑动铰支座

表2 钢筋材性试验结果

Table 2 Material properties of rebars

$d/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$\delta/\%$
8	430	576	9.38
10	427	551	14.4
20	506.5	622	24

注： $d$ 为钢筋直径； $f_y$ 为钢筋屈服强度值； $f_u$ 为钢筋极限抗拉强度值

约束。本试验为低周往复加载试验,采用位移控制的加载方式,每一级位移往复加载三次,具体的分级施加的位移 $\Delta$ 为:3、6、9、12、18、24、36、48、72、96 mm。当试件的水平承载力下降到其极限承载能力的85%以下时,试验终止。

### 1.4 测点布置

本试验共布置了12个位移计。在柱正面沿柱脚往上每隔150 mm布置一个位移计,每侧布置4个位移计共8个位移计,以测量对应柱脚高度的位移变化值,通过计算可得各柱脚高度的弯曲曲率。水平位移计9号用来测量试件加载点处的水平位移。为了消除独立基础水平位移对试验结果的影响,在基础加载点一侧中部布置水平位移计10号,同时在基础下阶顶面布置竖向位移计11号和12号测量基础的竖向位移,位移计布置如图3所示。

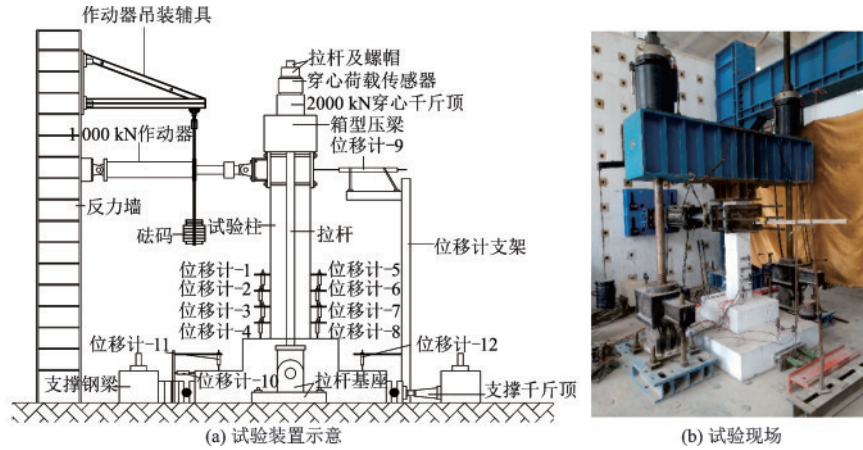


图3 试验装置

Fig.3 Test apparatus

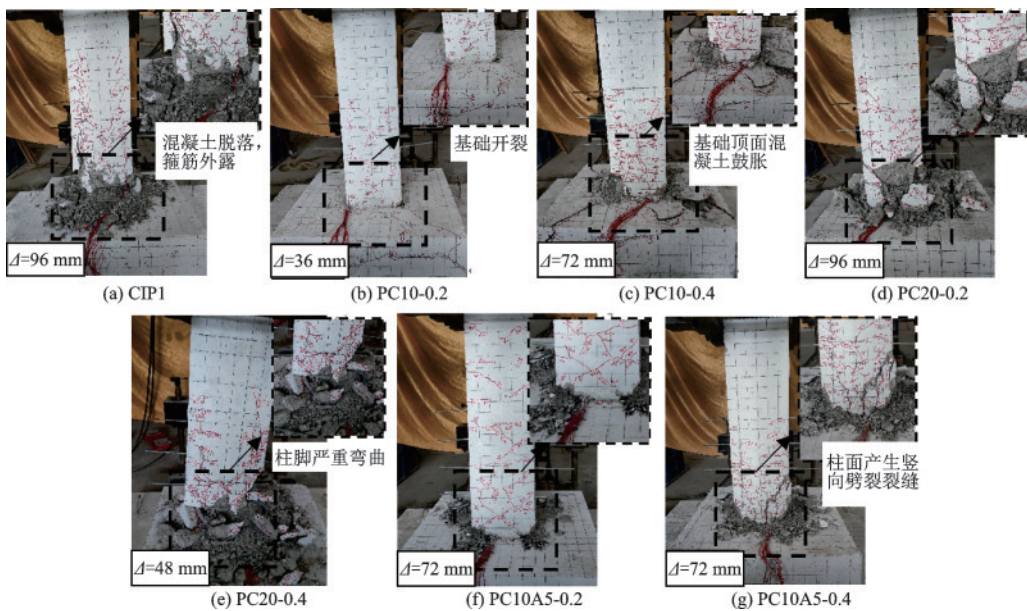


图4 试件破坏形态

Fig.4 Failure patterns of specimens

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏特征

各试件破坏形态及局部破坏特征如图4所示。为方便描述,定义平行于加载方向的柱面为侧面,垂直于加载方向的柱面为正面。

加载初期试件均在柱脚正面出现水平弯曲裂缝,此外预制试件柱与基础结合面开裂,随着位移的增大,裂缝向侧面延伸开展,在四面形成多条水平及竖向劈裂裂缝。试件PC10-0.2、PC10-0.4由于柱纵筋锚固长度低于独立基础第一阶台阶的高度,且独立基础顶部未配置钢筋,混凝土对纵筋约束不足,使试件在基础顶面沿对角线形成了多条剪切斜裂缝并延伸至基础侧面,最终发生了基础的开裂破坏,破坏形态见图4(b)、(c);增大柱纵筋锚固长度,试件(PC20-0.2、PC20-0.4)的破坏模式由基础弯剪破坏变为柱脚弯曲破坏,破坏区域大约为0~250 mm,破坏形态为柱脚混凝土脱落,纵筋屈服,箍筋鼓屈,独立基础未见明显破坏迹象,破坏形态如图4(d)、(e)所示;锚固长度相同时,经脱黏处理的试件PC10A5-0.2、PC10A5-0.4柱脚斜裂缝出现较晚,裂缝发展比有粘结试件缓慢。脱黏处理改变了试件的破坏形态,破坏区域在柱脚0~150 mm内,基础未见破坏,试件破坏形态如图4(f)、(g)所示;对比不同轴压比试件的破坏形态可知,轴压

比较大的试件破坏程度更为严重。

### 2.2 滞回曲线分析

试验测得试件的滞回曲线如图5所示,比较图中曲线可以得出:加载初期,滞回曲线刚度变化很小,滞回环包围的面积较小。随着位移等级的增大,试件残余变形变大,滞回环包围的面积增大,耗能也逐渐增加。由于试件受力时剪切变形引起的斜裂缝张合及独立基础两端产生的竖向位移,使结构内力重新分布,导致部分试件的滞回曲线出现了明显的捏缩现象。试件PC10-0.2达到峰值荷载之后独立基础迅速开裂破坏,滞回曲线呈弓形,抗震性能差。

对比图5中(b)、(d)及(c)、(e)可知,增大柱纵筋锚固长度后,纵筋屈服后在柱脚形成塑性铰区,增大了柱脚弯曲变形能力,试件的滞回曲线更加饱满,耗能能力得到改善;经脱黏处理后的试件PC10A5-0.2、PC10A5-0.4裂缝发展缓慢,破坏形态发生变化,滞回环包围面积变大,试件抗震性能及耗能能力得到改善。这是由于脱黏处理减小了脱黏区钢筋的应力集中现象,使应力分布均匀,改变了柱脚塑性铰的形成过程;对比轴压比不同的三组试件可知,试件纵筋锚固长度为 $10d$ 时,增大轴压比,滞回曲线包围的面积增加,试件耗能能力增大,柱纵筋锚固长度增加到 $20d$ 或进行脱黏处理后,增大轴压比没有明显改善试件的抗震性能。

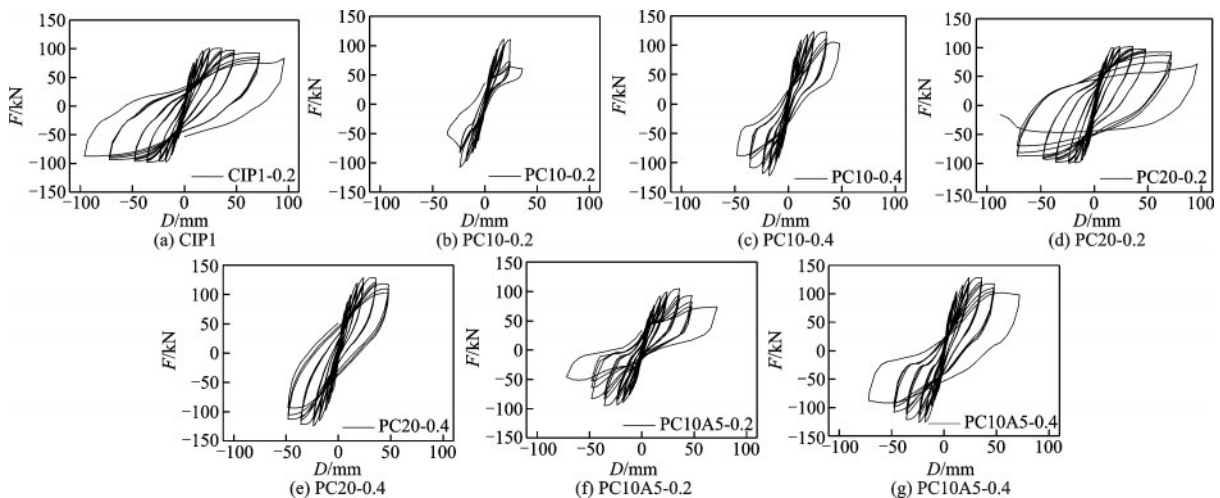


图5 试件滞回曲线

Fig.5 Hysteretic loops of specimens

### 2.3 骨架曲线分析

图6为各试件的骨架曲线。由图6(a)、(b)可知试件水平极限承载力随着轴压比的增大而增大,且轴压比对破坏荷载的影响较大。轴压比一定,随着柱纵筋锚固长度的增加,对其强度

衰退影响在逐渐减小;由图6(b)可知试件经脱黏处理后极限位移大大增加,延性增大;从图6(c)可知:试件CIP1与试件PC20-0.2的骨架曲线几乎重合,其峰值荷载相当,且其强度退化接近,表明现浇试件与预制试件PC20-0.2抗震能力相当。

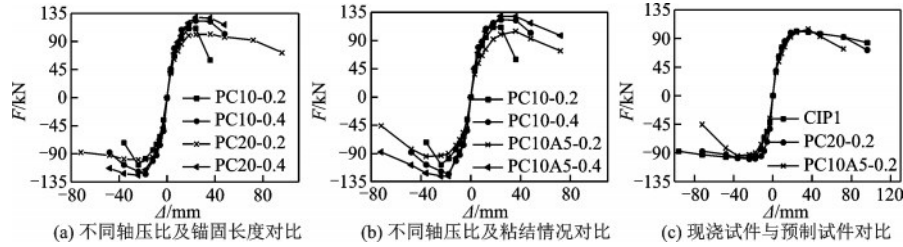


图6 试件骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves of specimens

### 2.4 延性分析

试件延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ ,  $\Delta_u$ 为极限位移;  $\Delta_y$ 为试件的屈服位移。根据试件骨架曲线通过屈服弯矩法确定极限位移与屈服位移后计算出各试件的延性系数。

表3给出了各试件的延性系数,由表3可知:试验柱PC10-0.2由于柱纵筋锚固长度不足,易从基础开始破坏,导致其延性系数小于3,其余各个试件的延性系数均大于3,表明试件具有良好的延性性能;柱纵筋锚固长度一定,试件PC10-0.4的水平极限承载力及延性系数均大于PC10-0.2的,试件PC20-0.4的承载比试件PC20-0.2的提高了27%,但延性系数大大降低,表明试件的承载力会随着轴压比的增大而增大,延性系数受轴压比及纵筋锚固长度的影响大;对比PC10-0.2与PC10A5-0.2,PC10-0.4与PC10A5-0.4两组试件,试件的延性系数分别提高了70%和7%,表明柱纵筋脱黏处理可提高试件的变形能力,且轴压比对试件受力性能影响较大。

### 2.5 刚度退化分析

以割线刚度 $K_i$ 反映刚度的退化情况, $K_i$ 计算式为:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

式中, $F_i$ 和 $\Delta_i$ 分别为第*i*级加载时的峰值荷载及对应峰值位移。

表3 试件延性系数

Table 3 Ductility coefficient of specimens

试件编号	$\Delta_u$ /mm	$F_u$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$F_y$ /kN	$\mu$
CIP1	88.9	85.94	11.05	80.34	8.05
PC10-0.2	27.9	94.35	11.99	94.78	2.33
PC10-0.4	46.66	104.81	10.82	100.88	4.31
PC20-0.2	79.11	86.28	10.52	80.28	7.52
PC20-0.4	49.84	109.31	12.73	102.06	3.92
PC10A5-0.2	53.17	89	14.05	81.75	3.78
PC10A5-0.4	57.91	109.57	12.55	105.43	4.61

各试件第三级位移循环下的割线刚度如图7所示,由图7可知:除试件PC10-0.2外,其余试件割线刚度均呈指数减小。试件PC10-0.4、PC20-0.2及PC20-0.4的刚度退化曲线基本一致,表明增大轴压比或纵筋锚固长度中任一参数,另一参数的变化对试件刚度影响减小;当纵筋锚固长度为 $10d$ 时,割线刚度随轴压比的增大显著增加;经脱黏处理后的试件(PC10A5-0.2与PC10-0.2)刚度显著增加,而试件PC10-0.4与PC10A5-0.4的刚度相差不大,表明对试件进行脱黏处理后,轴压比的变化对刚度影响减小,同理,增大轴压比后,脱黏处理对试件刚度影响减小。

### 2.6 耗能能力分析

试件耗能系数可定量反映其耗能能力,其表达式:

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (2)$$

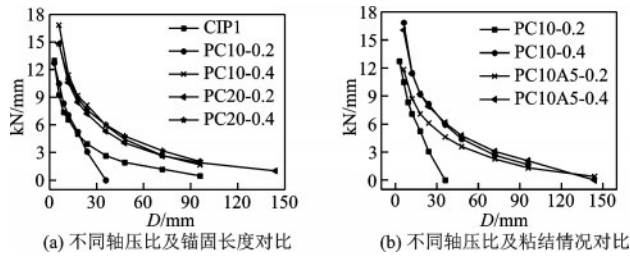


图7 各试件割线刚度

Fig.7 Secant stiffness of specimens Hysteretic loops

式中,  $S_{(ABC+CDA)}$  为第一次位移加载至破坏荷载时滞回曲线的包围面积。

滞回曲线示意如图8所示,各试件耗能系数见表6。由表6可知:锚固长度一定时,试件PC10-0.2、PC20-0.2的耗能系数分别比PC10-0.4、PC20-0.4的大2.2%、49.4%;表明柱纵筋锚固长度一定,耗能能力随着轴压比的增大而减小;试件PC20-0.2、PC20-0.4的耗能系数分别比PC10-0.2、PC10-0.4的大58.6%、8.6%,表明轴压比一定时,试件耗能能力随柱纵筋锚固长度的增加而增大;随着轴压比的增大,纵筋锚固长度的变化对试件耗能能力的影响变小;试件PC10A5-0.2、

PC10A5-0.4的耗能系数相比PC10-0.2、PC10-0.4的提高了32.4%、45.1%;表明轴压比不变,柱纵筋局部脱黏能够有效的提高预制柱的耗能能力。

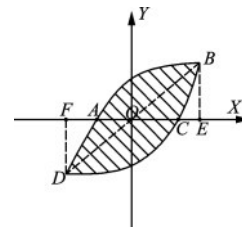


图8 滞回曲线示意

Fig.8 Hysteretic loops

表6 各试件耗能系数

Table 6 Energy consumption of specimens

试件名称	$S_{(ABC+CDA)}/(kN \cdot mm)$	$S_{(OBE+ODE)}/(kN \cdot mm)$	$E$	相对值
CIP1	18 825.90	7 810.27	2.41	1
PC10-0.2	4 756.30	2 659.93	1.79	0.74
PC10-0.4	7 758.10	4 431.76	1.75	0.73
PC20-0.2	18 453.00	6 491.94	2.84	1.18
PC20-0.4	9 992.40	5 259.85	1.90	0.79
PC10A5-0.2	10 298.50	4 348.17	2.37	0.98
PC10A5-0.4	14 777.00	5 808.50	2.54	1.05

## 2.7 柱脚曲率分析

利用柱正面位移计测得的数据,按  $\varphi = \Delta\theta/H$  计算出沿柱脚不同高度的曲率,其中  $\varphi$  为沿柱脚方向的曲率,  $H$  为同一方位相邻位移计之间的距离。 $\Delta\theta = (\delta_w - \delta_E)/L$ , 式中  $\delta_w$  与  $\delta_E$  为同一高度位移计两侧面的伸缩位移;  $L$  为试件柱两正面之间的水平距离。各试件沿柱脚不同高度的曲率如图9所示。由图9可知:各试件的曲率随位移等级的增加而增加,柱脚0~150 mm内曲率最大,说明试件发生了柱脚弯曲破坏,柱脚0~150 mm内破坏严重;试件PC10-0.2在不同位移等级下柱脚曲率变化不大,

表明柱脚损伤较小,与试件发生基础顶面破坏的特征吻合。

因试件发生柱脚弯曲破坏时主要集中在柱脚0~150 mm内,故重点分析各试件在该处的曲率变化,如图10所示。由图10可知:位移水平等级较小时,各试件曲率变化相近;当位移水平等级超过2%时,现浇柱曲率变化幅值大于其他预制试件,表明现浇柱的弯曲变形比预制柱大;经过脱黏处理试件的曲率变化大于相对应的未经脱黏处理的试件,这主要是由于纵筋局部脱黏减少脱黏区域钢筋的应力集中现象,使钢筋的应力分布较均匀,从而在一定程度上提高了试件的弯曲变形能力。

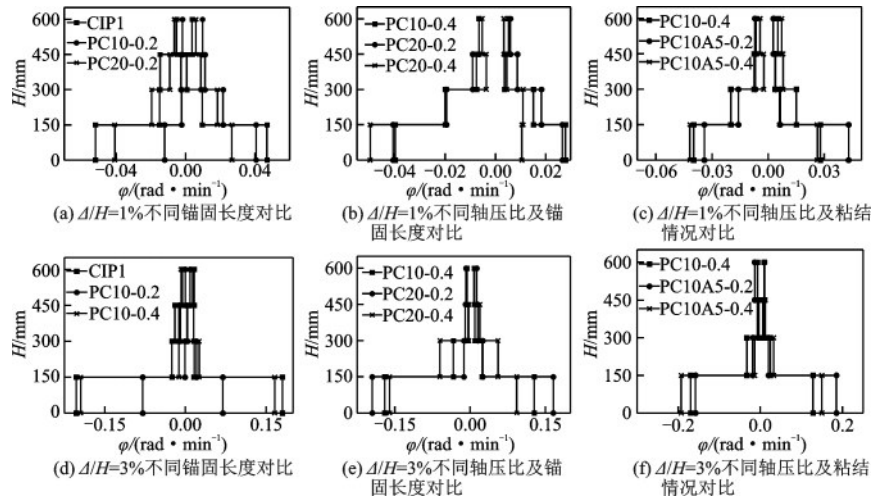


图9 不同位移等级下部分试件沿柱脚不同高度的曲率

Fig.9 Curvatures of specimens along different heights of column foot under different displacement levels

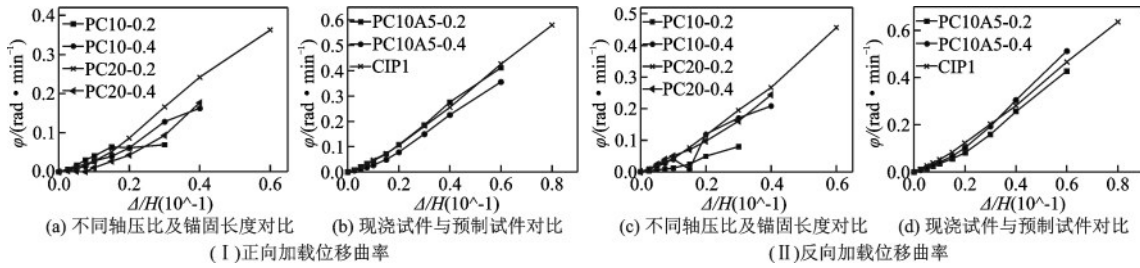


图10 各试件柱脚0~150 mm 曲率变化

Fig.10 Curvatures variation from 0 to 150mm of the column feet

### 3 结论

(1)柱纵筋锚固长度为  $10d$  的两个预制试件基础均发生了开裂破坏,其余试件主要在柱脚处发生弯曲破坏,破坏区域为柱脚  $0\sim 150\text{ mm}$ 。

(2)试件水平极限承载力及刚度会随着轴压比的增大而增大,但其耗能能力会降低,且试件弯曲变形能力受轴压比影响较大。

(3)增大柱纵筋锚固长度,试件的耗能能力及刚度均会增大;经脱黏处理的试件延性性能及耗能能力提升。

(4)增大轴压比、柱纵筋锚固长度及进行脱黏处理之间存在相关性,改变其中任意一个影响因素,另外两个影响因素的变化对试件受力性能影响减小。

(5)通过试验对比分析可知,采用该种连接方式的构件用于实际工程中时,应避免独立基础发生开裂破坏,柱纵筋锚固长度建议大于纵筋直径的

20倍。

### 参考文献:

[1] 贾俊峰,郭扬,宋年华,等.基于灌浆波纹管锚固连接的预制拼装RC墩柱抗震试验[J].中国公路学报,2018,31(12):211-220.  
Jia J F, Guo Y, Song N H, et al. Seismic testing of precast RC bridge pier columns anchored by grouted corrugated ducts [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 211-220. (in Chinese)

[2] 刘阳,郭子雄,吕英婷,等.采用改进纵筋连接的足尺装配式钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(11):101-110.  
Liu Y, Guo Z X, Lyu Y T, et al. Experimental study on seismic behavior of full-scale PRC columns with new mechanical splice technique for longitudinal reinforcement [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (11): 101-110. (in Chinese)

[3] 赵勇,李锐,王晓锋,等.大直径高强钢筋套筒灌浆连接预制柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,

- 2017, 50(5): 27-35,71.
- Zhao Y, Li R, Wang X F, et al. Experimental research on seismic behaviors of precast concrete columns with large-diameter and high-yield strength reinforcements splicing by grout-filled coupling sleeves[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 27-35,71. (in Chinese)
- [4] 李锐,郑毅敏,赵勇. 配置500MPa钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 255-263.
- Li R, Zheng Y M, Zhao Y. Experimental research on seismic performance of precast concrete columns with 500 MPa reinforcements splicing by grout-filled coupling sleeves[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 255-263. (in Chinese)
- [5] 关宏波,刘士润,魏晓刚,等. GFRP套管钢筋混凝土柱恢复力模型的试验研究[J]. 地震研究, 2015, 38(1): 173-180,182.
- Guan H B, Liu S R, Wei X G, et al. Research on experiment of hysteretic model of reinforced concrete columns confined by GFRP tube[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(1): 173-180, 182. (in Chinese)
- [6] 陈俊,肖岩. 纵筋浆锚连接预制柱的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 63-73.
- Chen J, Xiao Y. Experimental study on seismic behavior of precast concrete column with longitudinal reinforcement grouting-anchoring connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 63-73. (in Chinese)
- [7] Zhou Y, Ou Y C, Lee G C. Bond-slip responses of stainless reinforcing bars in grouted ducts[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 651-665.
- [8] ACI 318M-05. Building code requirements for structural concrete[S]. Michigan: American concrete institute, 2005.
- [9] Eurocode 2. Design of concrete structures-part 1: general rules and rules for buildings[S]. Brussels: The European Standard EN, 2004.
- [10] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] Buratti N, Bacci L, Mazzotti C. Seismic behavior of grouted sleeve connections between foundations and precast columns [C] //Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul: [s. n.]2014: 25-29.
- [12] Feng B, Xiong F, Liu B, et al. Shear performance of horizontal joints in short precast concrete columns with sleeve grouted connections under cyclic loading [J]. PLOS ONE, 2016, 11(11): e0165988.
- [13] Tazarv M, Saiidi M S. Seismic design of bridge columns incorporating mechanical bar splices in plastic hinge regions[J]. Engineering Structures, 2016, 124: 507-520.
- [14] Nikoukalam M T, Sideris P. Experimental performance assessment of nearly full-scale reinforced concrete columns with partially debonded longitudinal reinforcement [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 143(4): 04016218.
- [15] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(本文责编:池营营)