

# 全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌破坏机理研究

周云<sup>1,2,3</sup>, 陈太平<sup>2,4</sup>, 裴熠麟<sup>2,5</sup>, 胡翔<sup>2,5</sup>

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 3. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082; 4. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410082; 5. 建筑安全与环境国际联合研究中心, 湖南长沙 410082)

**摘要:**现有的建筑结构抗连续倒塌研究主要针对现浇结构展开,对装配式结构讨论的相对较少。为研究全装配式混凝土框架结构在中柱失效情况下的抗连续倒塌性能,从某四跨七层空间框架结构底部提取出一榀单层两跨的框架子结构,按照1/2缩尺比例分别设计了一个现浇(RC)试件和两个全装配式(PC)试件,其中PC试件在梁柱节点处分别采用明(暗)牛腿-插销杆-角型钢板的连接方式。对上述试件分别开展了中柱移除状态下的静力试验,并对加载过程中测试所得的结构持荷能力、构件应变响应及失效破坏模式依次进行了分析。试验结果表明,RC试件在加载过程中先后产生了压拱效应和悬链线效应,而PC1试件只出现了压拱效应阶段,PC2试件也仅发展了短暂的悬链线效应,均表明该类型全装配式结构的二次抗倒塌能力相对不足。试验过程中,RC试件梁端部及跨中截面处纵筋应变响应均达至屈服状态,而PC试件的受力及变形区域则主要集中在节点连接处,表明其构件的材料利用率不如现浇结构充分。同时,PC1和PC2试件的极限承载力分别为RC试件在压拱效应阶段峰值荷载的76%和81%,相应极限位移仅为RC试件的72%和77%,表明该全装配式结构与现浇结构相比承载力和延性均相对有限。结构失效模式方面,RC试件最终由于梁端纵筋被拉断而发生破坏,PC1及PC2试件则分别因节点处插销杆被剪断及梁端混凝土被压溃而丧失承载力,表明插销杆抗剪强度和节点区域混凝土抗压强度为该类型全装配式结构抗连续倒塌设计的关键参数。

**关键词:**全装配式结构;抗连续倒塌;静力试验;梁柱节点;延性杆

**中图分类号:**TU375.4;TU391

**文献标志码:**A

## Failure mode research of fully assembled precast concrete frame structure under progressive collapse test

ZHOU Yun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Taiping<sup>2,4</sup>, PEI Yilin<sup>2,5</sup>, HU Xiang<sup>2,5</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Green Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology, Changsha 410082, China; 4. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Changsha 410082, China; 5. National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The existed architecture progressive collapse research are mainly focused on the cast-in-place concrete

收稿日期:2019-03-05; 修订日期:2019-05-14

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400, 2016YFC0701308); 湖南省重点研发计划项目(2017SK2220); 国家自然科学基金项目(51878264)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0701400, 2016YFC0701308); Key Research and Development Program of Hunan Province (2017SK2220); National Natural Science Foundation of China (51878264)

作者简介:周云(1979-),男,教授,博士,主要从事装配式建筑及结构健康监测方面研究. E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn

通讯作者:裴熠麟(1995-),男,硕士研究生,主要从事装配式结构方面研究. E-mail: yilin\_pei@hnu.edu.cn

structures, which is less discussed around the prefabricated structures. To explore the performance of the fully assembled concrete frame structure under the mid-column loss scenario, a two-span single-story sub-structure was selected from a four-span seven-story frame structure, and a reinforced concrete (RC) concrete specimen and two precast concrete (PC) concrete specimens were built with the 1/2 reduced scale, respectively, where the exposed/hided corbel with dowel rod and angel cleat joint connections was employed in the PC specimens, respectively. The static load tests were conducted for the specimens under mid-column loss scenario to discuss the structural loading capacity, reinforcement strain responses and failure patterns. The experimental results has revealed that both of the compressive arch action (CAA) and catenary action (CTA) has formed during the loading process of RC specimen, while only the CAA was occurred in PC1 and the temporary CTA was formed in PC2, showing that a lack of structural secondary progressive collapse performance for this type of fully assembled PC structure. During the loading tests, the reinforcements at the beam-end and mid-span section of RC specimen has both reached into the yield state, while the deformation of PC specimens were mainly concentrated on the beam-column joint connections, showing that a lower material performance utilization ratio in this type of assembled structures. Meanwhile, the ultimate loading capacity of PC1 and PC2 specimen was only 76% and 81% times of the peak load of RC specimen at CAA stage, and the ultimate displacement was only 72% and 77% times of RC specimen, correspondingly, indicating that the loading and ductility capacity of the PC structure was relatively lower than the RC structure. As for the structural failure patterns, the RC specimen was damaged by the tensile failure of longitudinal reinforcements in beam-end, while the PC specimens were damaged by the shear failure of dowel rod and the crush of concrete at beam-end, respectively, indicating that the shear capacity of dowel rod and the compressive capacity of concrete in joint area plays an important in the progressive collapse behavior of this type of fully assembled structures.

**Key words:** fully assembled precast concrete structure; progressive collapse resistance performance; static load test; beam-column joint; dowel rod

## 引言

受英国 Ronan Point 公寓连续性倒塌事故<sup>[1]</sup>影响,建筑结构的抗连续性倒塌性能受到了工程界的广泛关注。所谓连续性倒塌,是指建筑结构由初始的局部构件破坏,最终扩展至部分或整体结构发生倒塌的情况。通常情况下,结构的最终破坏状态往往与初始破坏状态不成比例。引起结构发生连续倒塌的因素主要为车辆撞击、煤气爆炸、炸弹袭击、火灾等意外事件<sup>[2]</sup>。

为探讨建筑结构在倒塌过程中的受力特性、荷载转换机制及发生连续倒塌破坏的可能性,国内外学术界及工程界对此进行了大量的分析研究。其中拆除构件法作为一种评估结构抗连续倒塌能力的重要方法,已被国内外众多学者广泛应用于建筑结构的抗连续倒塌问题研究当中。该方法通过拆除结构关键承重构件以模拟其在偶然极端荷载作用下的失效情况,同时在被拆除构件处上方持续施加荷载直至结构发生破坏,从而获取整个加载过程中的结构响应。易伟建等<sup>[3]</sup>通过对一榀 1/3 缩尺的四跨三层混凝土框架结构进行抗连续倒塌试验,研究了结构在倒塌过程中的传力机制。Mohamed 等<sup>[4]</sup>基于替代路径法(alternative load path, ALP),对移除角柱后多层混凝土框架结构剩余部分的荷载有效传递路径进行了研究。Su 等<sup>[5]</sup>在约束框架梁轴向变形的基础上,对 12 个混凝土框架子结构的竖向抗连续倒塌性能进行研究。Hai 等<sup>[6]</sup>对 2 个采用不同抗震设计等级的足尺框架子结构进行了抗连续倒塌试验。Iribarren 等<sup>[7]</sup>研究了不同材料性能参数及损伤工况对多层混凝土框架结构抗连续倒塌性能的影响。Qian 等<sup>[8]</sup>通过选取框架梁的配筋率及箍筋间距作为试验变量,研究了 4 个足尺构件在中柱移除后剩余结构的抗连续倒塌性能。Yu 等<sup>[9]</sup>以梁柱节点处不同配筋构造作为试验变量,研究了 6 个混凝土框架结构在中柱失效后的抗连续倒塌性能。Qian 等<sup>[10]</sup>以梁端配箍率、抗震设计构造及梁跨高比等为试验变量,对 7 个 1/3 缩尺框架子结构在角柱失效工况下的抗连续倒塌性能进行了讨论。王少杰等<sup>[11]</sup>基于抽柱法对一两层现浇混凝土空间框架结构进行了拟静力抗倒塌试验,分别研究了自结构底层中柱失效后,剩余结构在竖向倒塌过程中的荷载传递路径及抗力机制。Li 等<sup>[12]</sup>提出了一种适用于判别混凝土框架结构发生连续性倒塌的概率评估指标,并分别通过对某单榀四层框架结构和某八

层空间框架结构开展相应数值模拟分析,对所提方法的有效性进行了验证。Lu等<sup>[13]</sup>对1个1/3比例缩尺的框架子结构和4个梁板子结构开展了抗连续倒塌试验,并对影响结构性能的关键参数(如配筋率、板厚及梁高等)依次进行了研究。Lu等<sup>[14]</sup>针对现有现浇混凝土结构压拱效应分析模型中所存在的抗力计算过程复杂、所需结构参数信息繁多等不足之处,通过基于大量有限元数值模拟结果,提出了一种适用于现浇混凝土框架结构中梁构件压拱效应承载力预测的新型计算方法。综合现有研究成果表明,混凝土框架结构在连续倒塌过程中主要由压拱效应和悬链线效应提供抗力机制。其中压拱效应是指由水平边界提供的位移约束作用,从而有效提高结构承载能力;而悬链线效应则充分利用了结构处于大变形状态下钢筋的抗拉强度,被认为是抗连续性倒塌的第二道防线。

现有的建筑结构抗连续倒塌试验研究主要围绕现浇结构展开,而对大比例缩尺的装配式结构,尤其是对采用焊接、螺栓及插销等干节点连接形式的全装配式结构研究地相对较少。Nimse等<sup>[15]</sup>分别研究了四种干节点连接形式下装配式结构的抗连续倒塌性能,并对其抗力机制、变形能力及失效模式依次进行了讨论。Qian等<sup>[16]</sup>通过开展混凝土框架结构抗倒塌试验,对比研究了采用后浇整体式和焊接连接方式下结构的传力机制与倒塌失效模式。潘毅等<sup>[17]</sup>在OpenSees中基于拆除构件法对某六层无粘结预应力装配式框架结构进行了抗连续倒塌分析,并模拟了自关键构件失效后至结构发生连续性倒塌的全过程。Kang等<sup>[18-19]</sup>通过开展后浇整体式预制混凝土框架结构抗连续倒塌试验,分别对梁底部纵筋采用搭接和90°弯钩锚固方式下的结构受力性能进行研究。Elsanadedy等<sup>[20]</sup>针对三个采用牛腿连接的1/2缩尺装配式结构开展了抗连续倒塌试验,并利用LS-DYNA进行了结构参数优化设计。Feng等<sup>[21]</sup>利用OpenSees对某预制装配式混凝土框架子结构的抗连续倒塌性能进行了研究,并对影响结构性能的后浇混凝土强度、钢筋强度及锚固端长度等参数依次进行了分析。Lin等<sup>[22]</sup>提出一种适用于抗震和抗连续倒塌的联合防御可恢复型功能框架结构,其梁柱构件通过剪力板进行荷载传递,预应力钢筋则同时作为抗震的自复位钢筋和抗连续倒塌的拉结配筋;除此之外,其所设计的可更换耗能装置也能够有效消耗地震和连续倒塌过程中所产生的动能。

为研究全装配式混凝土框架结构的抗连续倒塌性能及应变响应特征,本文按照1/2缩尺比例分别设计了1个现浇框架子结构和2个全装配式框架子结构,其中装配式结构采用明(暗)牛腿-插销杆-角型钢板的节点连接方式。对上述构件分别开展了中柱失效情况下的静力试验,通过获取加载过程中结构的荷载、位移及应变等特征响应,对结构的受力性能、变形能力及失效模式依次进行了讨论,并最终对采用该类型节点连接方式的全装配式结构的抗连续倒塌性能进行评估。

## 1 结构设计

### 1.1 原型结构设计

为研究全装配式混凝土框架结构在遭遇煤气爆炸、恐怖袭击和车辆撞击等偶然荷载作用时的抗连续性倒塌性能,湖南大学结构健康监测研究团队([www.hnutest.com](http://www.hnutest.com))按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)<sup>[23]</sup>和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)<sup>[24]</sup>要求,设计了一栋纵横向均为四跨七层的框架结构,如图1所示。其中结构横向柱距为6.0m,纵向柱距为7.5m,单层层高为3.6m;柱截面尺寸为700mm×700mm,梁截面尺寸为400mm×600mm。屋面恒荷载设置为7.5kN/m<sup>2</sup>,其他楼层恒荷载取为5.0kN/m<sup>2</sup>;屋面活荷载设置为0.5kN/m<sup>2</sup>,其他楼层活荷载取为2.0kN/m<sup>2</sup>。整体结构考虑7度设防,其中设计地震分组为第一组,场地类别为二类,基本地震加速度设置为0.1g。

### 1.2 试验构件设计

在原型结构设计完成后,提取图1中阴影所示框架子结构作为试验研究对象,按照1/2缩尺比例进行试验构件设计。本试验共设计试件3个,其中包括1个现浇(RC)试件和2个全装配式(PC1,PC2)试件。该装配式构件采用牛腿-插销杆-角型钢板的节点连接方式,其中PC1试件采用明牛腿形式,PC2试件则采用暗牛腿形式,如图2所示。预制梁柱通过牛腿处伸出的插销杆进行连接,使整个节点可利用插销杆的抗剪能力进行弯矩传递;为进一步提高节点处的弯矩传递性能,装配式试件在梁端上表面安装有角型钢板,其分别通过插销杆及高强螺杆与梁柱构件进行有效连接。同时在预制梁及牛腿内部,分别设置了环形箍筋将插销杆进行水平拉结。

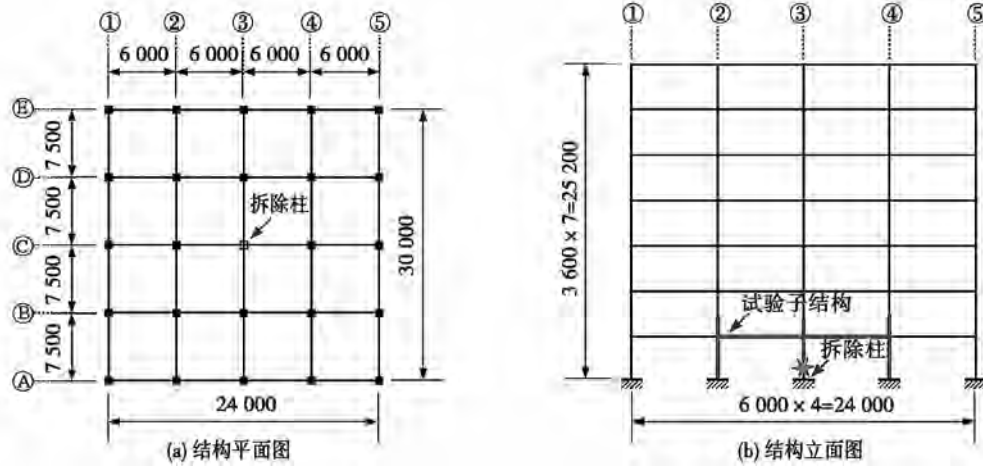


图 1 原型结构 (单位: mm)  
Fig. 1 View of prototype structure (unit: mm)

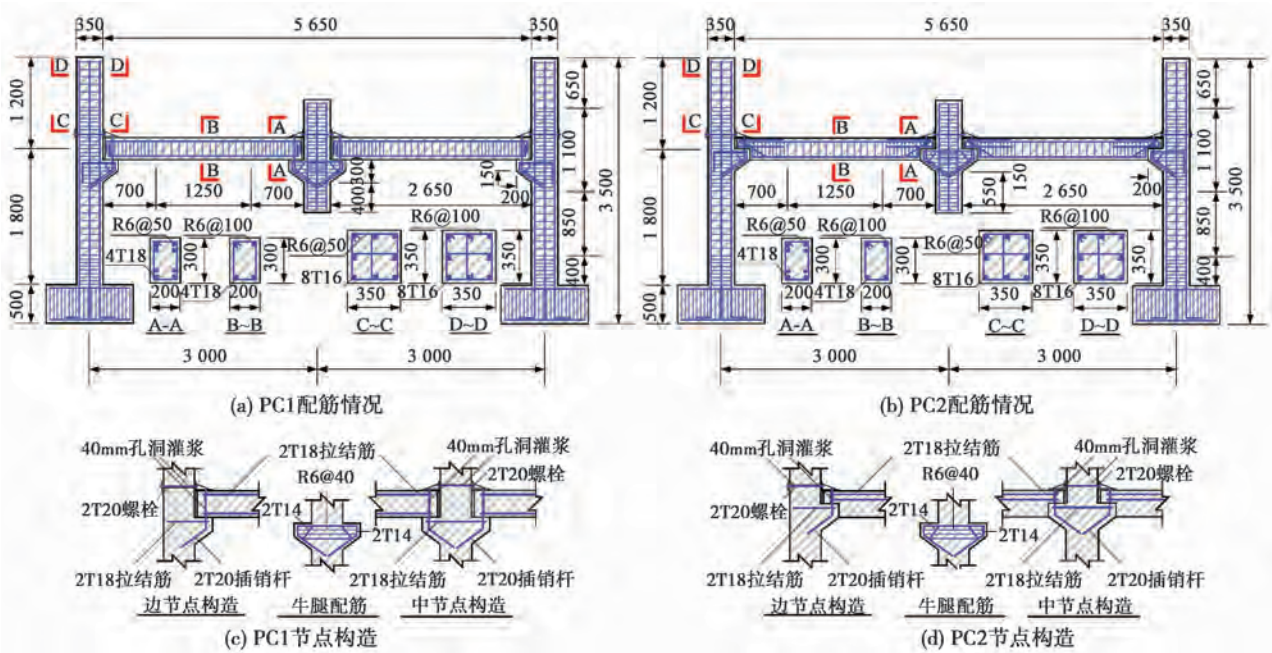


图 2 装配式框架子结构配筋详图 (单位: mm)  
Fig. 2 Reinforcement details of tested frame PC specimens (unit: mm)

测试试件的梁端截面尺寸为 200 mm × 300 mm,柱端截面尺寸为 350 mm × 350 mm;为固定试件,在边柱底部设置有截面尺寸为 500 mm × 500 mm 的锚固地梁。试件梁净跨为 2 650 mm;中柱高度取为 1 500 mm,边柱高度取自首层柱底至二层柱的反弯点处,并在综合考虑约束安装位置后设置为 3 000 mm。构件配筋方面,所有纵向钢筋均采用 HRB400 级钢筋,横向箍筋均采用 HPB300 级钢筋。PC 试件梁柱内纵向受力钢筋配筋情况与 RC 试件相同。其中 RC 试件在节点处采用通长钢筋,PC 试件则在梁端设置弯起构造。为安装插梢杆,在预制梁端预留有 2 个直径为 40 mm 的贯通孔洞;同时为考虑安装误差,在预制梁端面与柱端面相接处预留有 10 mm 的间隙,待梁柱安装完毕后使用高强灌浆料进行填充。试件详细配筋如表 1 所示。

表 1 试件配筋情况

Table 1 Reinforcement information of tested specimens

试件编号	纵向钢筋			横向箍筋	
	梁端纵筋	柱端纵筋	牛腿纵筋	梁/柱箍筋	牛腿箍筋
RC	4T18	8T16	—	R6@50/100	—
PC1	4T18	8T16	4T14	R6@50/100	R6@40
PC2	4T18	8T16	4T14	R6@50/100	R6@40

注:表中 T 表示变形钢筋,R 表示光圆钢筋。

## 2 试验方案

### 2.1 试验装置

静力试验是指通过一定控制机制对结构进行匀速加载,以获取结构由弹性阶段发展至破坏阶段的特征响应<sup>[25]</sup>。根据本试验目的,设计了相应静载试验加载装置,如图3(a)所示。该装置由反力架装置、中柱支撑约束装置、边柱反弯点约束装置和边柱地梁约束装置构成。其中反力架装置可为边柱约束提供有效支撑,从而保证试验过程中的各项加载制度顺利完成;中柱支撑约束装置可避免试件在加载过程中发生倾斜、侧移等情况;由于边柱高度取至二层层高一半处,故边柱上端反弯点约束装置可使得边柱端部沿所在平面内发生自由转动,但不产生位移;地梁约束装置则是使框架子结构在边柱柱底处产生固定约束<sup>[26]</sup>。

### 2.2 测试方案

为获取中柱移除过程中框架子结构的极限承载能力、变形性能以及荷载转换机制,通过安装相应仪器设备分别对加载过程中的施加荷载、结构位移及应变响应进行测试,如图3(b)所示。荷载测量方面,通过在中柱的底(顶)部布置量程为100 kN的荷载传感器,分别对试验过程中卸(加)载阶段所施加的外部荷载进行测量。同时,在边柱反弯点处布置有量程为300 kN的荷载传感器,用以测量试验过程中边柱处产生的约束荷载。位移测量方面,在中柱底部安装量程为700 mm的电子尺,用以对其竖向位移进行测量;通过在边柱柱头及梁柱节点处安装量程为50 mm的百分表,实现对结构水平侧移能力的评估;除此之外,通过在锚固地梁处分别沿水平及竖直方向安装百分表,用以观测结构的整体位移响应。结构应变测量方面,通过选取框架梁身端部及跨中截面、边柱节点顶部及底部位置处作为关键截面,针对每个控制截面分别布置4个钢筋应变片。其中装配式试件额外选取牛腿上表面作为关键截面,并对应布置2个应变片进行测量。

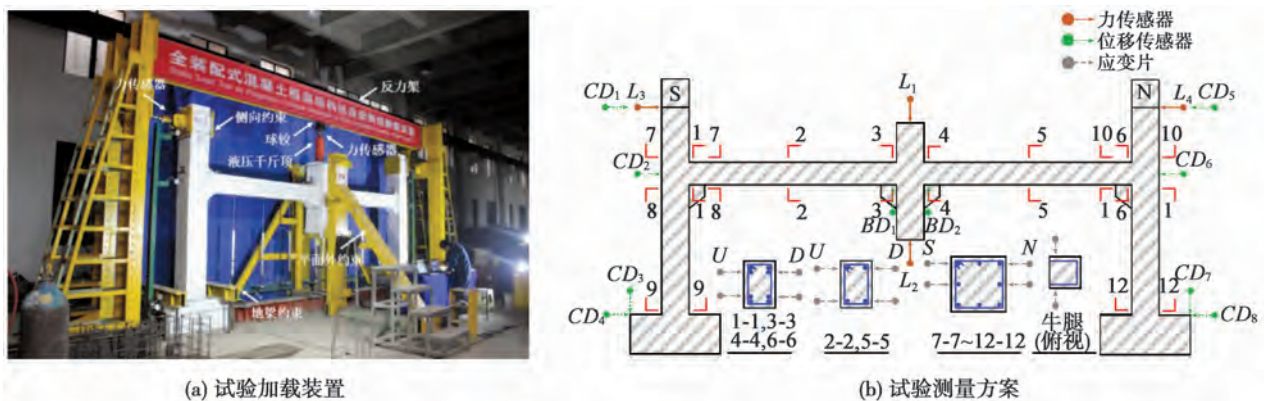


图3 试验测试概况

Fig. 3 Scenario details of experimental test

### 2.3 加载制度

试验过程中,通过在中柱底部布置一台16 t机械式千斤顶,以模拟结构未发生破坏时中柱的支撑作用。同时,在中柱顶部安置了一台30 t液压式千斤顶,用于试验过程中进行荷载施加。整个试验加载过程可分为以下3个阶段:

(1) 预加载阶段。首先,通过利用中柱上方千斤顶施加竖向荷载,使加载装置中的各部分充分接触;然后,通过缓慢卸载中柱底部千斤顶,并检查相关仪器设备工作是否正常。待检查无误后,通过预加载卸载机制,使整体试件恢复至初始状态;

(2) 中柱底部卸载阶段。在试验前期阶段,通过逐级卸载中柱底部千斤顶,以模拟结构发生的中柱破坏状态。同时,对试件自重、顶部千斤顶、加载球铰以及荷载传感器等构件传递至中柱的荷载进行测量;

(3) 中柱顶部加载阶段。通过利用中柱顶部千斤顶逐级施加竖向荷载,直至试件发生破坏;并对加载过程中的外加荷载、结构位移及应变响应等试验数据依次进行记录。

为保证试验顺利进行,在试验前期阶段采用力控制加载机制,其中卸载阶段每级卸载3 kN,加载阶段每

级加载 5 kN。当荷载达至峰值或开始有所下降时,改采用位移控制加载机制。当每级荷载施加完毕后,待试件持荷约 5 min 后,再进行相应的结构响应数据采集工作,并对试件裂缝发展情况进行观测与记录。

### 3 结构荷载-位移响应特性

试验过程中测试所得的结构中柱荷载-位移曲线如图 4 所示,易知 RC 试件和 PC2 试件均产生了压拱效应和悬链线效应,而 PC1 试件则只产生了压拱效应。其中 RC 试件在悬链线效应阶段的峰值荷载较压拱阶段提高约 22% 左右。对于装配式结构而言,PC1 试件在压拱阶段的峰值荷载则远低于相应 RC 试件;PC2 试件虽形成了短暂的悬链线效应,但其受力过程却发展地不够充分,其悬链线阶段的峰值荷载仅为压拱效应阶段的 79% 左右。试验过程中所测试构件的边节点均先呈现出向外的水平位移,并在达到最大值后逐渐减小。所不同的是,RC 试件和 PC2 试件在边节点向外的位移减小为零后,又产生了向框架内部发展的水平位移;而 PC1 试件则因插梢杆被剪断而失去承载能力,并未产生向内的水平位移。同时,PC2 试件向内的最大位移远小于相应 RC 试件,表明其在悬链线效应阶段的二次抗倒塌能力发展地不够充分。

测试所得的结构特征响应值如表 2 所示。与现浇试件相比,装配式试件的承载能力相对较低,其中 PC1 和 PC2 试件在压拱效应阶段的峰值荷载分别为 RC 试件的 76% 和 81%。当达至峰值荷载后,RC 试件荷载发展状态相对较为平缓稳定,并在悬链线效应阶段得到明显提升;而 PC 试件中荷载则迅速下降,且在悬链线效应阶段并没有发生回升,其极限承载能力远低于相应 RC 试件。

表 2 试验结果详情

Table 2 Details of test result

试件编号	压拱效应阶段		悬链线效应阶段		边节点水平位移	
	峰值荷载(kN)	峰值位移(mm)	峰值荷载(kN)	峰值位移(mm)	最大向外位移(mm)	最大向内位移
RC	119	131	145	614	7	14
PC1	91	101	—	—	8	—
PC2	97	96	76	475	8	3

### 4 结构应变响应

#### 4.1 梁端应变响应

加载过程中试件梁端边节点及跨中截面处的钢筋应变响应如图 5 所示。对于 RC 试件,靠近边柱处框架梁端截面上部钢筋应变在试验初期迅速增长至屈服状态,而下部钢筋则起初处于受压状态,并在中柱位移达到 50 mm 时转为受拉状态;梁跨中截面各钢筋应变在试验前期均处于受压状态,并在中柱竖向位移为 424 mm 时转为受拉状态,且在中柱位移达至 442 mm 时呈现出迅速增长的趋势。除此之外,靠近中柱处框架梁端截面钢筋在中柱位移为 40 mm 和 101 mm 时突然迅速增大;上部钢筋则一直处于受压状态,并在中柱位移为 351 mm 左右时达至最大值,随后逐渐减小。对于 PC1 试件,试验过程中靠近边柱处梁端截面上部钢筋呈受拉状态,下部钢筋则在试验前期受压,直至中柱竖向位移达至 100 mm 后才转为受拉状态;靠近中柱处梁端截面上部钢筋在整个试验过程中始终处于受压状态,下部钢筋应变片则在竖向位移达至 76 mm 时发生失效。整个加载过程中,梁端钢筋应变均未发生屈服;梁跨中截面钢筋应变响应相对较小,整体呈现为受压状态。对于 PC2 试件,靠近边柱梁端截面上部钢筋呈受拉状态,并最终达到屈服应变;靠近中柱梁端截面上部钢筋在试验过程中始终处于受压状态,且最终达至屈服状态。梁跨中截面的钢筋应变响应相对较小,在

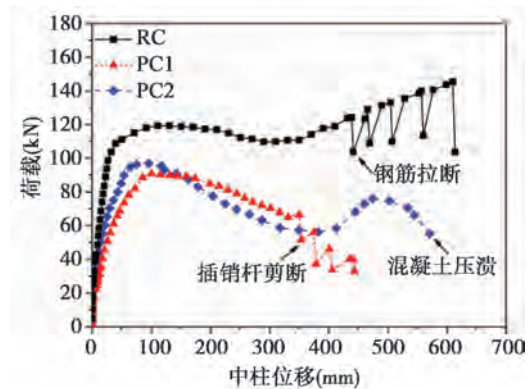


图 4 结构荷载-位移曲线<sup>[27]</sup>

Fig. 4 Load-displacement relationship of tested specimens<sup>[27]</sup>

试验前期阶段整体呈受压状态,并在竖向位移达至 401 mm 后转为受拉状态。

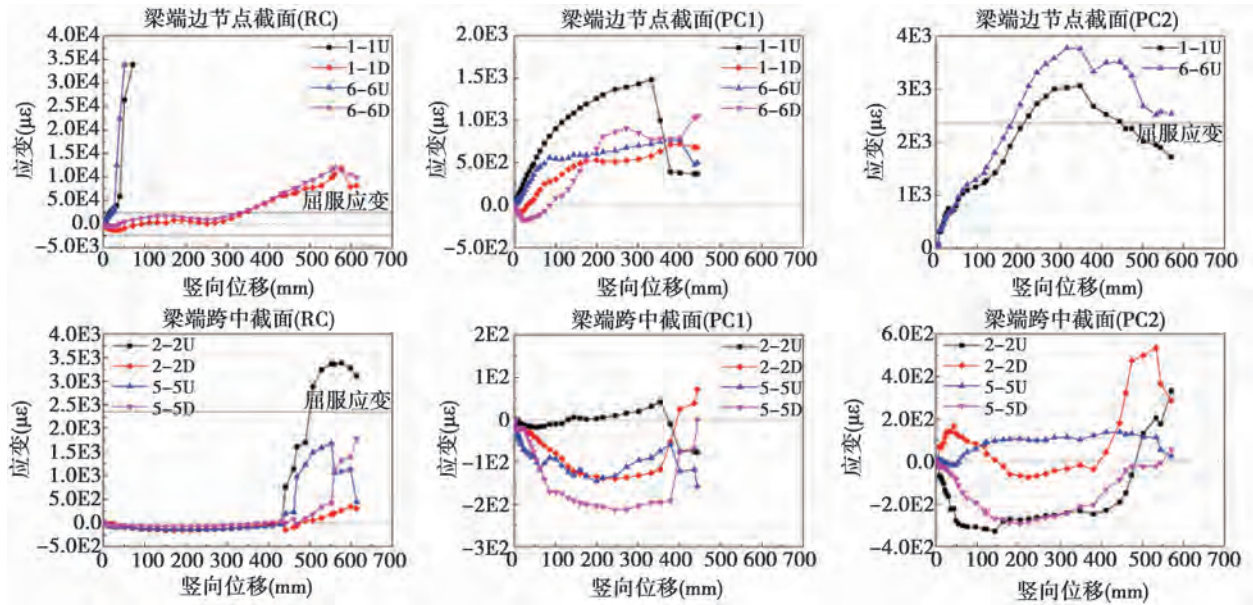


图5 框架梁钢筋应变响应

Fig. 5 Longitudinal reinforcement strain responses of frame beam

#### 4.2 柱端应变响应

加载过程中试件柱端边节点及边柱底部截面处的应变响应如图6所示。对于RC试件,两侧边柱处各截面钢筋应变响应相差不大,且总体变化趋势基本相同。其中边节点上截面处外侧钢筋在试验前期处于受拉状态,直至中柱竖向位移达至450 mm时才转为受压状态;该截面处内侧钢筋应变响应则恰好由受压转至受拉状态。节点下部截面及柱底截面处钢筋应变响应与节点上部截面处变化规律基本相同。对于PC1试件,节点上部截面外侧钢筋在试验过程中呈现受拉状态,并在中柱竖向位移为220 mm左右时达至最大值后,随着中柱位移的增长而逐渐减小;而节点上部截面内侧钢筋则处于受压状态,同样在中柱位移为220 mm左右时达到最大值。节点下截面及柱底截面钢筋应变变化趋势与节点上截面基本相同。在试件柱端各截面钢筋应变响应中,边节点下截面处钢筋应变值最大,且钢筋发生受拉屈服。对于PC2试件,边节点上截面外

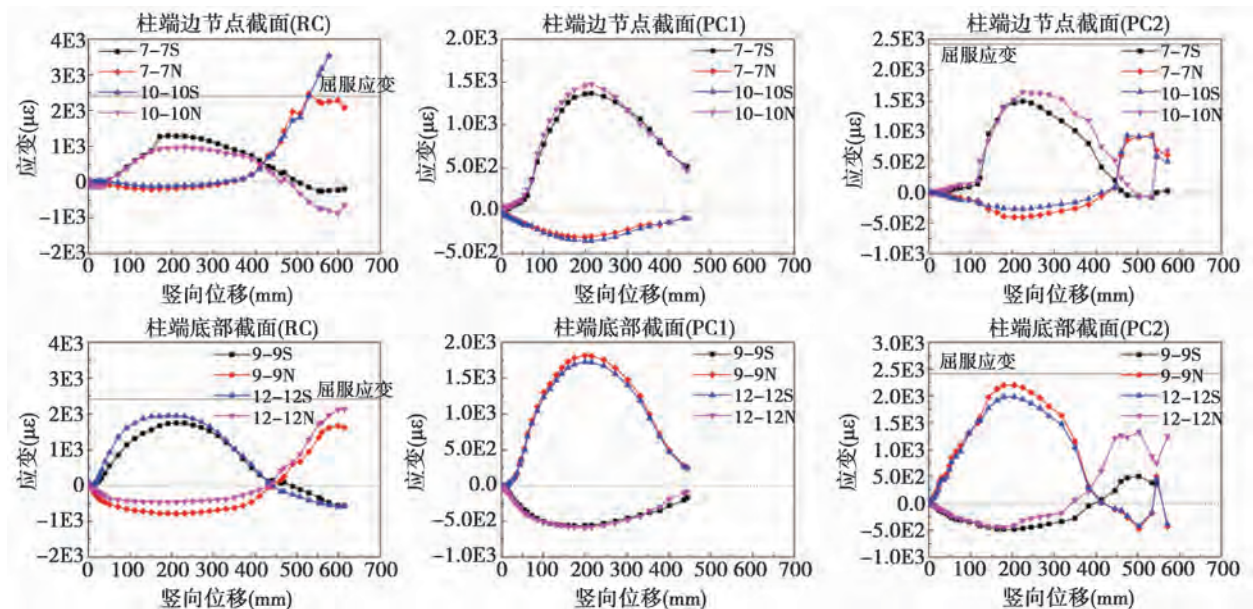


图6 框架柱钢筋应变响应

Fig. 6 Longitudinal reinforcement strain responses of frame column

侧钢筋呈现受拉状态,并在中柱竖向位移为 220 mm 左右时达至最大值;之后随着中柱位移的增长而逐渐减小,直至位移为 471 mm 时转为受压状态。而边节点上截面内侧钢筋在试验前期处于受压状态,并在位移达至 436 mm 时转为受拉状态。节点下截面及柱底截面钢筋应变变化趋势与边节点上截面基本相同。在试件柱端各截面应变响应中,边节点下截面处受拉钢筋应变值最大,并最终发生屈服。

### 4.3 牛腿应变响应

装配式试件牛腿处水平拉结筋的应变响应如图 7 所示。对于 PC1 试件,中柱牛腿处钢筋在试验过程中呈现受拉状态,边柱牛腿处钢筋则为受压状态,且中柱钢筋应变响应略大于边柱钢筋响应,但均未达至屈服状态。而对于 PC2 试件,中节点及边节点处牛腿钢筋均处于受拉状态,但应变响应值不大,约维持在 600  $\mu\epsilon$  左右。当中柱竖向位移达至 450 mm 后,中节点牛腿处钢筋应变明显增大。

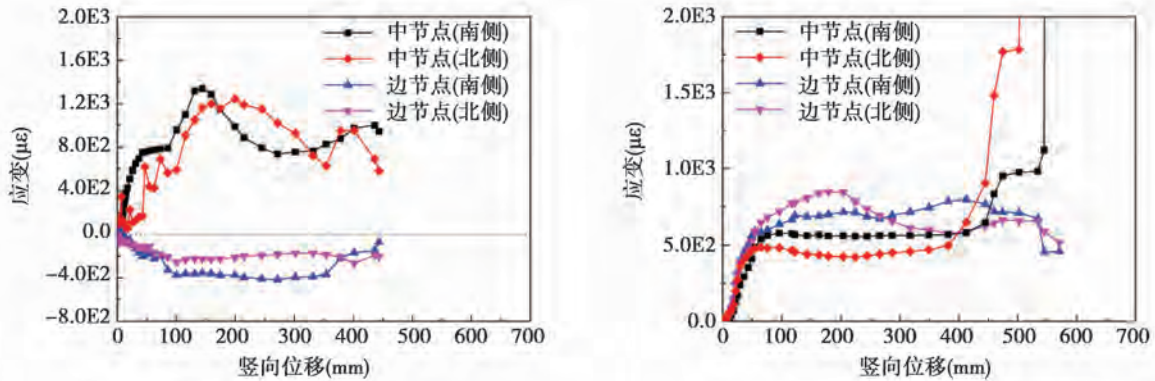


图 7 牛腿钢筋应变响应

Fig. 7 Reinforcement strain responses of corbel

### 4.4 特征阶段应变响应

框架梁在加载过程中各阶段的特征应变响应如图 8 所示。对于 RC 试件,随着试验过程的进行,梁端上部钢筋应变响应持续增大。当达至屈服状态后,靠近边柱处梁端上部钢筋中受拉应变迅速增长,直至应变片发生失效;同时由于悬链线效应的发展,导致梁中纵向受力钢筋最终被拉断。对于 PC1 试件,受牛腿提供的支撑作用影响,靠近边柱处梁端底部钢筋在试验前期表现为受拉状态;除此之外,靠近中柱处梁端上部钢筋应变响应均比相应 RC 试件要小。PC2 试件的应变发展情况与 PC1 试件基本相同,其中梁身下部钢筋受操作因素等影响并未采集到有效数据。总体而言,由于该装配式试件在加载过程中并未产生有效的悬链线效应,从而导致其应变响应比相应现浇试件要小。

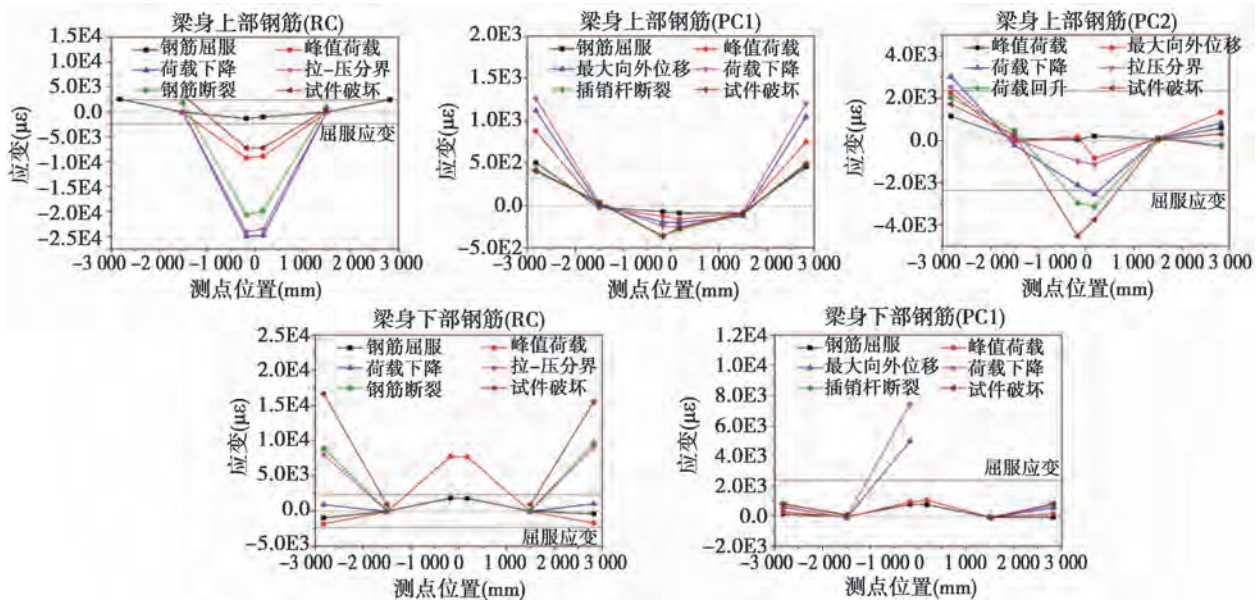


图 8 框架梁各阶段应变响应

Fig. 8 Strain response of beam longitudinal reinforcement at different loading stage



测试所得的框架南侧边柱应变响应如图9所示。可知在整个试验过程中,RC试件及PC2试件中钢筋应变响应均发生了拉-压状态转变;而PC1试件由于只存在压拱效应阶段,故未产生向框架内侧的水平位移。除此之外,RC试件中边柱内侧节点处钢筋应变响应在悬链线效应阶段发展达至屈服状态,而PC1试件外侧节点处钢筋则在压拱效应阶段即发生受拉屈服。

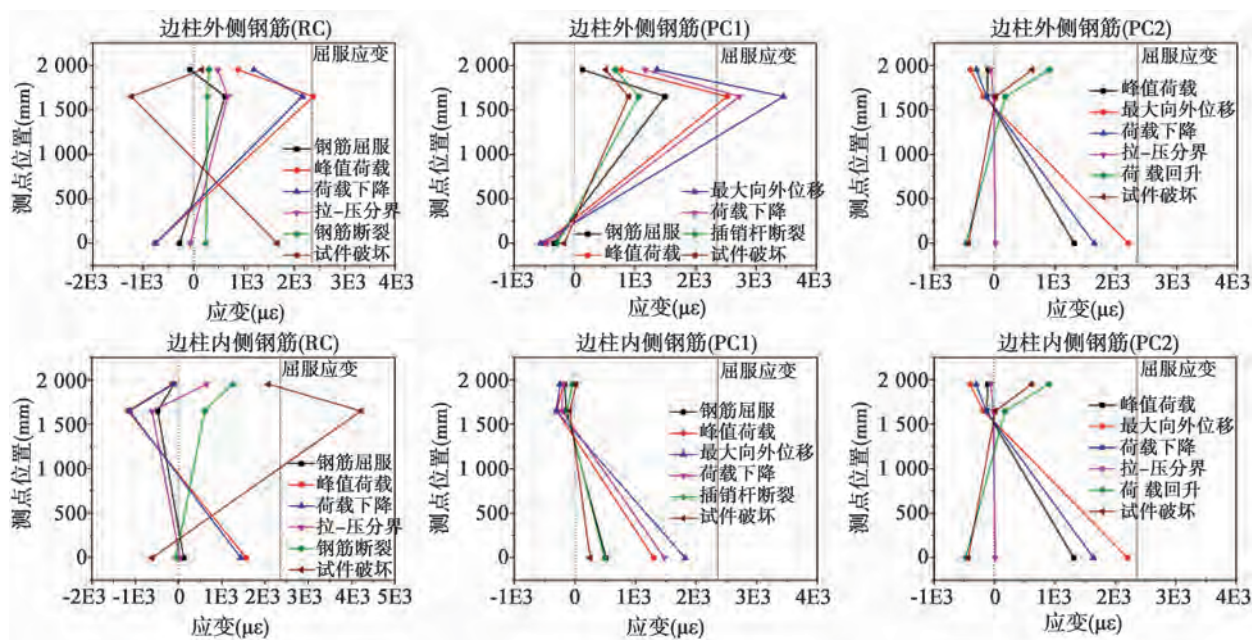


图9 框架柱各阶段应变响应

Fig. 9 Strain response of column longitudinal reinforcement at different loading stage

## 5 结构失效模式

### 5.1 失效特征

试验过程中,现浇试件梁端截面在加载初期产生了少数受弯裂缝。但由于边柱对框架梁水平位移的约束作用,梁身刚度并未产生明显下降,且产生了压拱效应以抵抗外加荷载。随着试验的持续进行,靠近中柱处梁端下部钢筋及靠近边柱处梁端上部钢筋均发生屈服,梁身整体刚度随之产生明显下降。在中柱竖向位移为131 mm时,试件达到第一次峰值荷载119 kN。且随着中柱位移的持续增加,结构所施加的荷载随之逐渐减小。当竖向位移达至290 mm时,荷载达至最小值110 kN;之后外加荷载又逐步上升。随着试验的进行,当边节点向外的水平位移发展恢复至初始位置时,相应压拱效应发生失效,试件开始进入悬链线阶段以抵抗外加荷载;同时产生了沿梁高分布的贯通裂缝,且梁跨中截面处纵向受力钢筋由受压转为受拉状态。当中柱竖向位移为614 mm左右时,结构达至第二峰值荷载145 kN,约为第一峰值荷载的1.22倍。该现浇试件最终因梁端纵向受力钢筋被拉断而发生破坏。

装配式试件的受力过程与现浇试件相比存在明显不同。其中梁身裂缝在试验前期发展较少,主要集中在节点连接处。随着中柱竖向位移的持续增加,靠近中柱梁端上部混凝土呈现受压状态,且整个节点上部区域凭借混凝土受压及插梢杆的抗剪性能提供水平压力;梁端下部混凝土则处于受拉状态,且节点下部区域依靠混凝土与插梢杆传递拉力。靠近边柱梁端上部混凝土呈现受拉状态,节点上部区域主要由插梢杆的抗剪性能传递纵向钢筋中的拉力;梁端下部混凝土处于受压状态,节点下部则凭借牛腿提供支撑力。由于两侧边柱的水平约束作用,试件的整体承载能力得以显著提高。当中柱竖向位移发展至101 mm左右时,PC1试件达到峰值荷载91 kN;而PC2试件则在中柱位移为96 mm左右时达到第一峰值荷载97 kN。随着中柱竖向位移的持续增加,结构所施加的荷载逐渐降低。当中柱位移约达至350 mm~440 mm左右时,PC1试件梁柱节点处的插梢杆被陆续剪断,试件最终发生破坏。而PC2试件中插梢杆均未被剪断,且在荷载降至最小值后又逐渐增加,并在中柱位移为475 mm时达至第二峰值荷载76 kN,约为第一峰值荷载的0.77倍。PC2试件

最终由节点端部混凝土被压溃而丧失承载力,如图10所示。

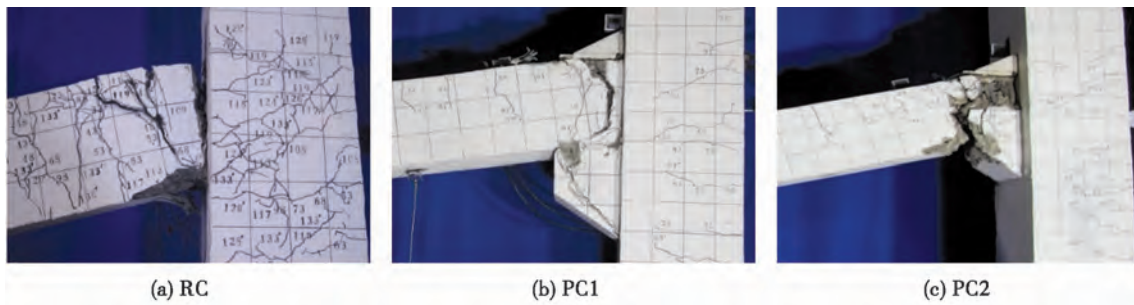


图10 裂缝发展模式

Fig. 10 Development of crack patterns

## 5.2 破坏形态

整个试验过程中,现浇试件靠近中柱处梁端裂缝宽度发展最大。同时,共有五根纵向受力钢筋被先后拉断,分别为中节点南侧梁端下部钢筋(两根)、中节点北侧梁端下部钢筋(一根)和北侧边节点梁端上部钢筋(两根)。除此之外,靠近边柱梁端下部区域和中柱梁端上部区域处混凝土均被压溃。装配式试件的失效模式与现浇试件存在显著不同。其中PC1试件中节点牛腿表面混凝土发生脱落,且靠近中节点处角型钢板受试件转动挤压影响而发生翘起变形。边节点处混凝土发生脱落,而其余位置处混凝土裂缝并未显著发展,整个框架梁形成了可转动的铰机构。在中柱竖向位移分别达至354 mm,379 mm,406 mm和443 mm左右时,PC1试件边柱处插销杆被角型钢板陆续剪断,导致试件丧失承载力。而PC2试件中插销杆在整个试验过程中并未发生断裂;但在试验后期靠近中节点处梁端下部企口与牛腿外接触面间产生分离,整个试件凭借牛腿与角型钢板之间的局部混凝土传递内力,最终导致梁端混凝土被压溃而发生破坏,如图11所示。

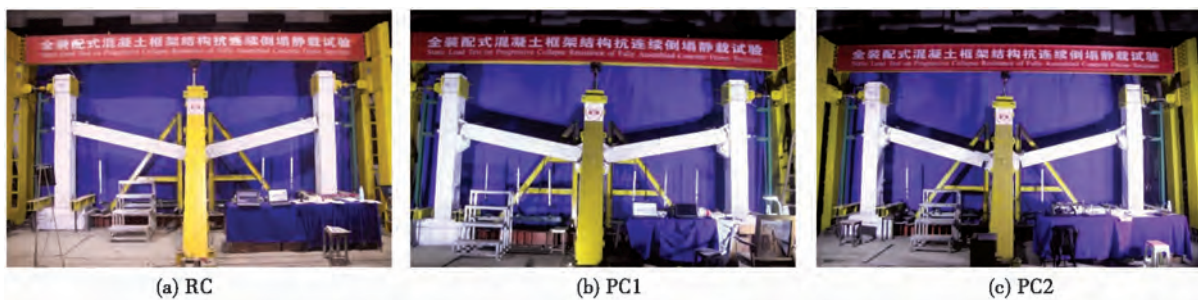


图11 结构失效模式

Fig. 11 Failure patterns of global structure

荷载传递路径方面,受框架梁身整体变形影响,装配式试件中两侧边柱产生了向框架外部的水平移动,结构进入压拱效应阶段。由于梁端节点处纵向钢筋缺乏有效的通长连接构造,使得钢筋强度利用率相对有限。其中当PC1试件中压拱效应失效后,其整体承载能力迅速下降,并最终因插销杆被剪断而发生破坏。PC2试件在压拱效应失效后,两侧边柱则发生了向框架内部的水平位移,整体结构产生悬链线效应阶段,相应二次抗连续倒塌能力得以升高,但最终因梁端部混凝土被压溃而丧失承载力。依据试验过程测试所得的结构失效模式,可知插销杆抗剪强度和节点区域混凝土抗压强度为该类型采用牛腿-插销杆-角型钢板连接方式全装配式结构的设计关键。因此,可通过在后续研究中开展相应数值模拟分析,如采用高强螺杆作为抗剪插销杆、在梁柱节点处浇筑超高性能混凝土及优化角钢加劲肋数及开洞位置等方式,进一步提高该类型全装配式结构的抗连续倒塌性能。

## 6 结论

为探讨采用干节点连接方式的全装配式混凝土框架结构的静力抗连续倒塌能力,本文按照1/2缩尺比

例,分别设计了一个现浇(RC)框架子结构和两个全装配式(PC1, PC2)框架子结构。其中装配式试件在梁柱节点处采用明(暗)牛腿-插销杆-角型钢板的连接方式。对上述构件依次开展了中柱失效情况下的静力试验,并分别对结构的极限承载能力、位移变形能力、应变响应及失效模式进行讨论。相关结论如下:

(1)通过对该现浇及装配式构件的试验测试结果进行分析,揭示了该类型混凝土框架子结构在中柱失效下的受力特征和荷载传递机制。现浇试件在整个加载过程中先后产生了压拱效应和悬链线效应,且悬链线效应阶段的峰值荷载较压拱效应阶段提高约22%左右,从而有效增强了结构二次防倒塌能力;而装配式PC1试件在试验过程中则主要经历了压拱效应阶段,PC2试件中虽形成了短暂的悬链线效应,但其极限承载能力仍远低于相应现浇试件。

(2)对该类型全装配式结构的承载力及变形性能分别进行了评估。装配式PC1及PC2试件的极限承载力分别为现浇试件在压拱效应阶段峰值荷载的76%和81%左右,其抗连续倒塌能力相对较弱;与现浇试件相比,除PC2试件梁端纵筋发生屈服外,装配式试件各测点处的应变响应均未达至屈服状态;同时,RC及PC2试件中边柱纵筋应变响应在加载过程中均发生了拉-压状态转变。除此之外,PC1及PC2试件的中柱竖向极限位移约为现浇试件的72%和77%,表明该类型装配式试件的延性相对不足。

(3)试验过程中现浇构件的裂缝发展模式较为均匀,整体结构最终因梁端纵向受力钢筋被拉断而丧失承载力,且梁端混凝土被压溃;其构件性能得到充分发挥,材料利用率相对较高。而该装配式试件的受力和变形则主要集中在梁柱节点处,梁跨中截面处裂缝发展较少,材料的整体利用率相对较低。

(4)构件失效模式方面,现浇试件中梁端纵向受力钢筋最终被拉断;PC1试件中由于梁柱节点处插销杆被剪断而发生破坏,PC2试件则由于节点处梁端混凝土被压溃而丧失承载力。因此,插销杆抗剪强度及节点区域混凝土抗压强度为该类型全装配式结构抗连续倒塌设计的关键所在。

#### 参考文献:

- [1] Pearson C, Delatte N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2005, 19(2): 172-177.
- [2] 李 易. RC 框架结构抗连续倒塌设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2011.  
LI Yi. Research on progressive collapse design method of RC frame structure [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [3] 易伟建, 何庆锋, 肖 岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(5): 104-109.  
YI Weijian, HE Qingfeng, XIAO Yan. Experimental study on collapse resistance of reinforced concrete frame structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(5): 104-109. (in Chinese)
- [4] Mohamed O A. Assessment of progressive collapse potential in corner floor panels of reinforced concrete buildings [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(3): 749-757.
- [5] Su Y, Tian Y, Song X. Progressive collapse resistance of axially-restrained frame beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(5): 600-607.
- [6] Hai S L, Bao Y, Sadek F, et al. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario [D]. National Institute of Standards and Technology, Technical Note, 1720, 2011.
- [7] Iribarren B S, Berke P, Bouillard P. Investigation of the influence of design and material parameters in the progressive collapse analysis of RC structures [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(10): 2805-2820.
- [8] Qian K, Li B. Experimental and analytical assessment on RC interior beam-column subassemblages for progressive collapse [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 26(5): 576-589.
- [9] Yu J, Tan K H. Structural behavior of RC beam-column subassemblages under a middle column removal scenario [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(2): 233-250.
- [10] Qian K, Li B. Experimental and analytical assessment on RC interior beam-column subassemblages for progressive collapse [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 26(5): 576-589.
- [11] 王少杰, 刘福胜, 徐赵东. RC 空间框架结构竖向倒塌全过程试验研究与理论分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 162-167.  
WANG Shaojie, LIU Fusheng, XU Zhaodong. Experimental and theoretical analysis on entire course of vertical progressive collapse of spatial RC frame structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5): 162-167. (in Chinese)
- [12] Li Y, Lu X Z, Guan H, et al. Probability-based progressive collapse-resistant assessment for reinforced concrete frame structures [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(11): 1723-1735.
- [13] Lu X Z, Lin K Q, Li Y, et al. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario [J]. *Engineering Structures*, 2017, 149: 91-103.
- [14] Lu X Z, Lin K Q, Li C F, et al. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168: 721-735.
- [15] Nimse R B, Joshi D D, Patel P V. Experimental study on precast beam column connections constructed using RC corbel and steel billet under

- progressive collapse scenario [C]//Structures Congress, 2015: 1101 – 1117.
- [16] Qian K, Li B, Liu Y. Integrity of precast concrete structures to resist progressive collapse [J]. Geotechnical and Structural Engineering Congress. 2016, 1976 – 1986.
- [17] 潘毅, 陈侠辉, 姚蕴艺. 基于抽柱法的无粘结预应力装配式框架结构连续倒塌分析[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 162 – 170  
PAN Yi, CHEN Xiahui, YAO Yunyi, Progressive collapse analysis of unbonded post-tensioned precast RC frame structures using column removal method [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 162 – 170. (in Chinese)
- [18] Kang S B, Tan K H. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal [J]. Engineering Structures, 2015, 93: 85 – 96.
- [19] Kang S B, Tan K H. Progressive collapse resistance of precast concrete frames with discontinuous reinforcement in the joint [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 04017090 – 1 – 13.
- [20] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Al-Salloum Y A, et al. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 552 – 571.
- [21] Feng D C, Wu G, Lu Y. Numerical investigation on the progressive collapse behaviour of precast reinforced concrete frame subassemblages [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(3): 04018027 – 1 – 14.
- [22] Lin K Q, Lu X Z, Li Y, et al. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119: 390 – 407.
- [23] GB50010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50010, Code for Design of Concrete Structures [S]. Beijing, China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [24] GB50011, 建筑抗震设计规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50011, Code for Seismic Design of Buildings [S]. Beijing, China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [25] 曹万林, 秦成杰, 董宏英, 等. 装配式单排配筋再生混凝土中高剪力墙抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1): 110 – 118.  
CAO Wanglin, QIN Chengjie, DONG Hongying, et al. Study on seismic behavior of mid-rise prefabricated single-row reinforced recycled concrete shear walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1): 110 – 118. (in Chinese)
- [26] 曹万林, 刘子斌, 刘岩, 等. 装配式H型钢柱框架-复合墙结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 213 – 221.  
CAO Wanglin, LIU Zhibin, LIU Yan, et al. Experimental study on assembled H-shaped steel column frame infilled with composite wall [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 213 – 221. (in Chinese)
- [27] 陈太平. 全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌静载试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
CHEN Taiping. Static load test study on progressive collapse resistance of fully prefabricated concrete frame structures [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)