

文章编号:

全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌性能研究

*周云^{1,2}, 陈太平², 裴熠麟², 胡翔², 易伟建²

(1.工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082; 2.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 建筑结构的连续倒塌本质上属于复杂的动力非线性过程。现有的研究主要集中于现浇结构, 对全装配式结构的讨论相对较少。本文利用 PKPM 设计了一栋七层四跨的框架结构, 并从底部提取出一榀单层两跨子结构, 按照 1/2 缩尺比例设计了包括一个现浇结构(RC)和两个全装配式结构(PC)在内的框架子结构试件。该装配式构件梁柱节点处采用牛腿-插梢杆-角型钢板的连接形式, 其中 PC-1 试件设置为明牛腿, PC-2 试件设置为暗牛腿。对该三个试件分别进行了中柱移除情况下的拟静力试验, 获取了加载过程中结构的荷载-位移曲线, 并对结构的极限承载能力进行了分析。同时基于试验结果, 在 ABAQUS 中分别建立了结构的精细化有限元模型, 并对试件的加载过程进行了模拟。试验和计算结果均表明, RC 试件在加载过程中先后出现了压拱阶段和悬链线阶段, 而 PC 试件只存在压拱阶段。同时 PC-1 和 PC-2 试件的极限承载力分别为 RC 试件在拱效应阶段荷载峰值的 76% 和 81%, 且极限位移仅为 RC 试件的 72% 和 77%, 表明全装配式混凝土框架结构与现浇结构相比承载力和延性相对较为不足。

关键词: 全装配式混凝土结构; 抗连续倒塌; 静载试验; 梁柱节点; 数值模拟

PROGRESSIVE COLLAPSE RESISTANCE RESEARCH OF THE FULLY ASSEMBLED CONCRETE FRAME STRUCTURES

*ZHOU Yun^{1,2}, CHEN Tai-ping², PEI Yi-lin², HU Xiang², YI Wei-jian²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The structural progressive collapse behavior is a complex dynamic nonlinear process which has been verified by many reinforced concrete (RC) structures, while few researches were conducted for the fully assembled precast concrete (PC) structures. A four-span seven-floor frame structure was designed in this paper by PKPM, and three two-span substructures were designed from the bottom of the structure with the 1/2 scale ratio respectively, which including a cast-in-site reinforced concrete (RC) specimen and two fully assembled precast concrete (PC) specimens. And the screw rod-steel plate connected form was employed in the beam-column joint of PC specimens, where the PC-1 and PC-2 were designed with covered/uncovered brackets respectively. The pseudo-static tests were conducted for the three specimens under the removal of middle column, and the structural ultimate loading capacity were analyzed based on the acquired specimen load-displacement relationships. And the accuracy finite element (FE) model were built in ABAQUS to simulate the loading process of each specimen respectively. The results revealed that both of the compressive arch action (CAA) and the catenary action (CTA) were formed in the RC specimen, while only the CAA action was occurred in the PC specimens. The ultimate loading capacity of PC-1 and PC-2 is approximately 76% and 81% of the RC specimen at the CAA stage, and the ultimate displacement is 72% and 77% correspondingly, which has indicated that a higher loading capacity and ductility is presented by the RC structures.

Keywords: Fully assembled concrete structure; Progressive collapse resistance; Static load test; Beam-column joint; Numerical simulation

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400,2016YFC0701308);湖南省科技计划项目(2017SK2220);长沙市科技计划项目(kq1706019)

通讯作者: 周云(1979—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测及动力识别的研究(E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn)

自从英国 Ronan Point 公寓连续性倒塌事故发生以来, 多层结构的抗连续性倒塌性能引起了工程界广泛关注。所谓连续性倒塌, 即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。通常情况下, 结构的最终破坏状态与初始破坏状态不成比例。引起结构连续倒塌的因素主要为煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等意外事件。

为了研究框架结构体系在偶然荷载作用下发生连续倒塌破坏的可能性、倒塌过程中力的转换机制以及结构受力特性等机理, 国内外学术界和工程界对此进行了大量的分析研究。2011 年, Qian 等^[1]研究了 4 个足尺框架子结构在移除中柱过程中抗连续倒塌受力性能。2013 年, Qian 等^[2]设计了 7 个 1/3 缩尺的梁柱子结构试验模型, 来研究在角柱失效情况下的结构承载能力。2013 年, Yu 等^[3]研究了 6 个 RC 框架子结构在中柱失效情况下的抗连续倒塌性能。2016 年, Pham 等^[4]通过有限元软件 LS-DYNA 研究了分别利用拟静力加载和动力加载研究爆炸情况下结构抗连续倒塌的受力性能。2016 年, 陆新征等^[5]通过试验研究了单向约束梁板楼盖系统移除中柱和边柱情况下楼板所起到的作用。

现有的抗连续倒塌研究主要集中在现浇结构, 对大比例尺全装配式结构的研究相对较少。本文采用试验和数值模拟方法, 对包括一个现浇框架子结构和两个全装配式框架子结构在内的 1/2 比例缩尺试件进行了研究, 分析其在中柱移除情况下的结构承载力性能, 并探讨干连接节点的可靠性和安全性。

1 结构设计

1.1 原型结构概况

按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[6]和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[7]的要求, 湖南大学土木工程结构健康监测团队 (www.hnutest.com) 利用 PKPM 设计了一栋纵横向均为四跨的七层预制装配式混凝土框架结构, 如图 1 所示。该框架结构考虑 7 度设防, 横向柱距为 6.0m, 纵向柱距为 7.5m, 层高为 3.6m。框架柱截面尺寸为 700mm×700mm, 框架梁截面尺寸为 400mm×600mm。

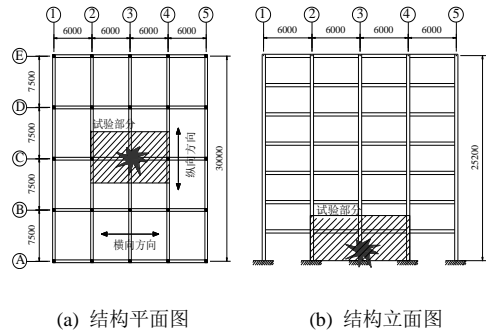
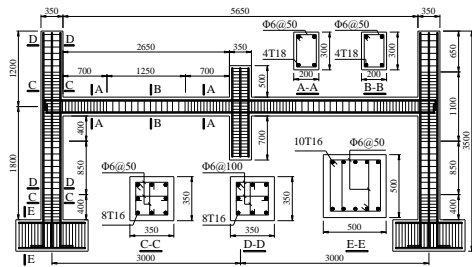


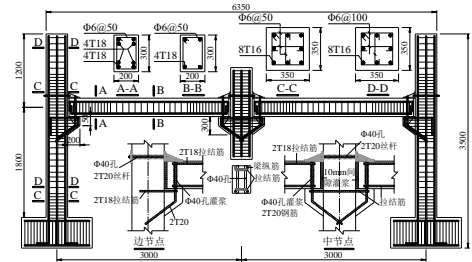
图 1 原型结构图

1.2 模型结构概况

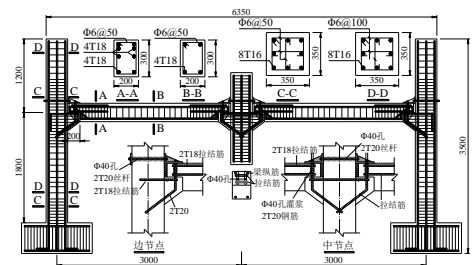
对原型结构完成设计配筋后, 提取图 1 中阴影部分所示的框架子结构作为试验研究对象, 按照 1/2 缩尺比例, 制作了框架子结构的试验模型, 其中包括 1 个现浇框架子结构对比试件 (RC) 和 2 个全装配式混凝土框架子结构试件 (PC)。子结构试件的详细尺寸如图 2 所示, 其中 PC 构件在梁柱节点处采用牛腿-插梢杆的连接方式, 并在梁端上表面安装了一个角型钢板作为传力途径。



(a) 现浇 RC 试件



(b) 全装配式 PC-1 试件



(c) 全装配式 PC-2 试件

图 2 框架子结构尺寸及详细配筋

表 1 试件详细信息表

试件编号	试件尺寸				纵向钢筋			横向箍筋		
	柱截面 /(mm ²)	边柱高 /(mm)	梁截面 /(mm ²)	梁净长 /(mm)	柱纵向筋	梁纵向筋	牛腿纵筋	柱箍筋	梁箍筋	牛腿
RC	350×350	3000	200×300	2650	8T16	4T18	—	R6@50/	R6@50/	—
PC-1	350×350	3000	200×300	2630	8T16	4T18	4T14	100	100	R6@40
PC-2	350×350	3000	200×300	2630	8T16	4T18	4T14			R6@40

注：表中 T16 表示直径为 16mm 的变形钢筋，R6 表示直径为 6mm 的光圆钢筋。

2 试验加载测量方案

根据试验目的，设计了框架结构试验加载装置，如图 3 所示。该装置包括加载钢架、中柱支撑约束装置、边柱反弯点约束装置和子结构地梁约束装置四部分。加载钢架可以保证构件在试验过程中的加载程序顺利完成，又可以为边柱约束装置提供可靠的支撑；中柱支撑约束装置可以保证中柱竖直向下移动，不发生倾斜和侧移；边柱高度为底层层高与二层层高一半之和，且边柱上端反弯点约束装置可以使边柱端在平面内自由转动，但不发生位移；地梁约束装置的作用是使框架结构边柱柱底产生固定约束。为获取中柱移除过程中结构的承载能力及变形性能，在中柱上端安装了力传感器，并通过位移计对加载过程中结构的竖向位移、边节点侧移进行了准确测量。

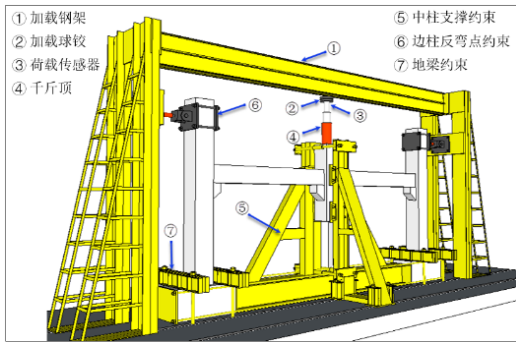


图 3 加载装置设计图

3 试验结果

框架结构试件中柱施加荷载及竖向位移、南北两侧边节点水平位移测点布置情况如图 4 所示。其中，中柱施加荷载与中柱竖向位移的关系曲线是判断结构受力性能的重要依据；边节点水平位移是

划分抗连续倒塌压拱阶段和悬索阶段的依据。

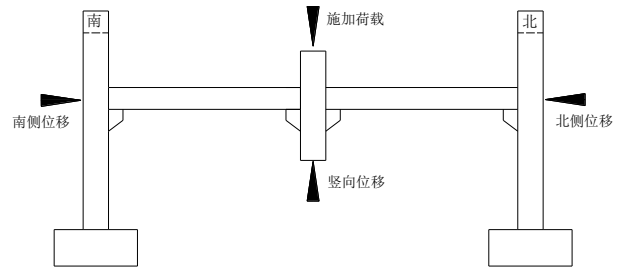
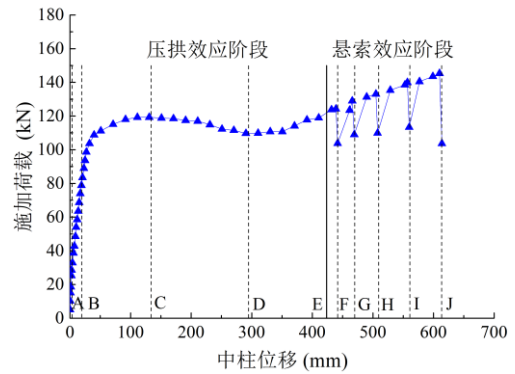
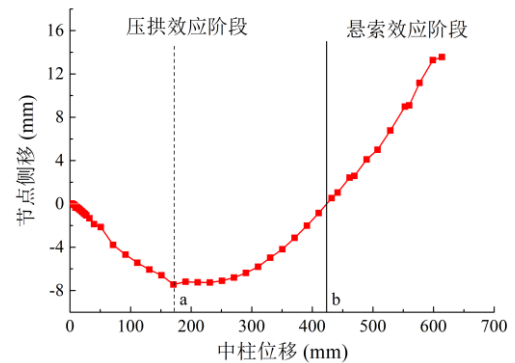


图 4 中柱荷载-位移及边节点侧移测量示意图

RC 试件中柱荷载施加情况和相应中柱竖向位移、边节点水平侧移之间的关系曲线如图 5 所示。



(a) 荷载-位移曲线



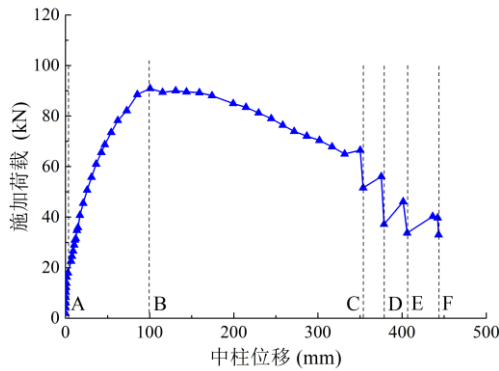
(b) 边柱节点-位移曲线

图 5 现浇 RC 试件试验结果

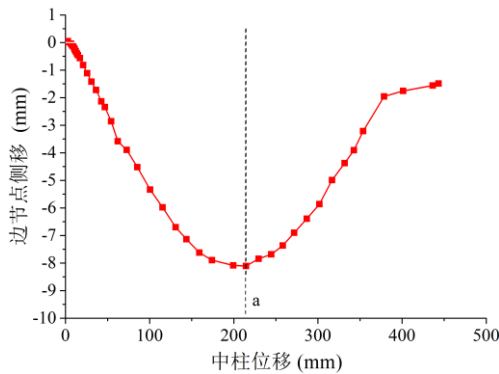
从图中可看出，整个试验加载过程主要分为压

拱效应和悬索效应两个阶段。其中 OE 为压拱效应作用阶段，边节点水平位移向外发展；EJ 为悬索效应作用阶段，边节点水平位移向内发展。在点 E 和点 B 处，边节点水平位移为 0。由于混凝土发生开裂且钢筋发生屈服，压拱效应阶段由弹性阶段 (OA)、弹塑性阶段 (AB) 和塑性铰发展阶段 (BE) 组成。在弹性阶段中，混凝土未发生开裂现象，构件处于弹性受力状态。弹塑性阶段中混凝土框架梁已经出现裂缝，但钢筋未发生屈服现象。塑性铰发展阶段中，框架梁端受力钢筋已经发生屈服。从 RC 构件整个受力过程可以看出，压拱效应峰值点之后结构持荷能力有所下降，在悬索效应阶段荷载高于压拱效应峰值荷载。

试件 PC-1 的试验结果如图 6 所示。



(a) 荷载-位移曲线

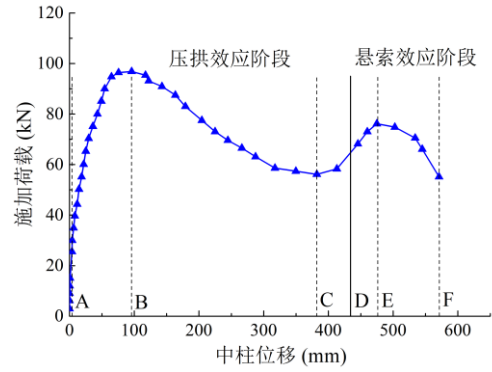


(b) 边柱节点-位移曲线

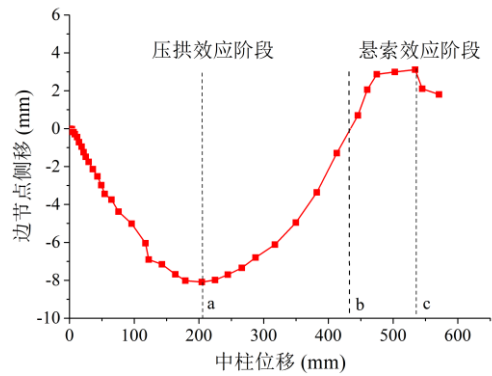
图 6 全装配式 PC-1 试件试验结果

根据试验结果可知，PC-1 只经历了压拱效应一个阶段；同时在整个受力过程中，边节点的水平位移一直向外，没有产生向内的水平位移。结构的荷载-位移曲线下降段比较陡峭，压拱效应峰值点之后荷载下降明显。

试件 PC-2 试验结果如图 7 所示。



(a) 荷载-位移曲线



(b) 边柱节点-位移曲线

图 7 全装配式 PC-2 试件试验结果

从图中可看出，PC-2 试件整个试验过程主要分为压拱效应和悬索效应两个阶段。其中 OD 为压拱效应作用阶段，边节点向外移动；DF 为悬索效应作用阶段，边节点向内移动。在点 D 和 b 处，边节点水平位移为 0。从整个受力过程可以看出，结构的荷载-位移曲线下降段比较陡峭，压拱效应峰值点之后荷载下降明显。同时悬链线效应发展充分，悬链线阶段施加的荷载远小于拱效应阶段的峰值荷载。

4 有限元模拟

4.1 建模方法

模型中混凝土构件采用 ABAQUS 中的 CDP (concrete damaged plasticity) 材料模型，如图 8 所示。该模型可以模拟混凝土在低静水压力时，受到冲击荷载作用时的力学行为。材料的屈服面和塑性流动法则等相关参数可按表 2 进行选取^[8]。按照《混凝土设计规范》(GB50010-2010)^[6]建议，混凝土本构选取单轴受拉受压模型，并以试验测试的混凝土抗压强度作为模型强度代表值；同时材料泊松比取 0.2，密度取 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

表 2 CDP 模型参数

φ (°)	ε	σ_{b0}/σ_{c0}	K_c	μ
30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

注： φ 为膨胀角， ε 为流动势偏移量， σ_{b0}/σ_{c0} 为双轴极限抗压强度与单轴受压极限强度之比， K_c 为拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力不变量之比， μ 为粘性系数。

钢筋采用等向弹塑性模型，其单轴应力-应变曲线采用三折线强化模型^[9]，并考虑钢筋屈服之后的强化段和下降段，如图 9 所示。其中弹性模量取为 $2 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，泊松比取 0.3，密度取 $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。钢筋屈服应力和极限强度均按照实际测试结果进行选取。

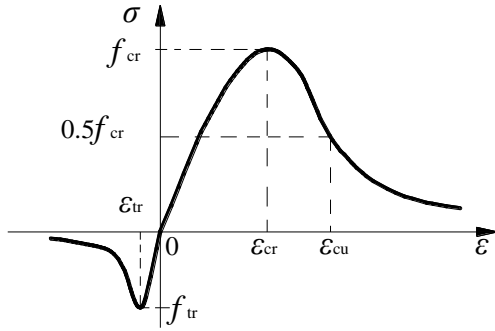


图 8 混凝土应力应变曲线

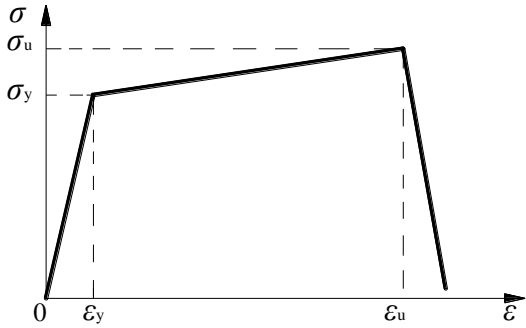


图 9 钢筋应力应变曲线

对于用于连接的高强螺杆和锚固板等构件，为简化计算均采用二折线线性强化模型。其中弹性模量取为 $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，泊松比取为 0.3，密度为 $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

根据现场试验信息，在 ABAQUS 中分别建立了现浇结构和装配式结构的精细化有限元模型，如图 10 所示。其中混凝土采用 C3D8R 单元，钢筋采用 T3D2 单元。采用弹簧单元模拟边柱上端反弯点处弹性约束，并根据试验结果定义刚度系数。

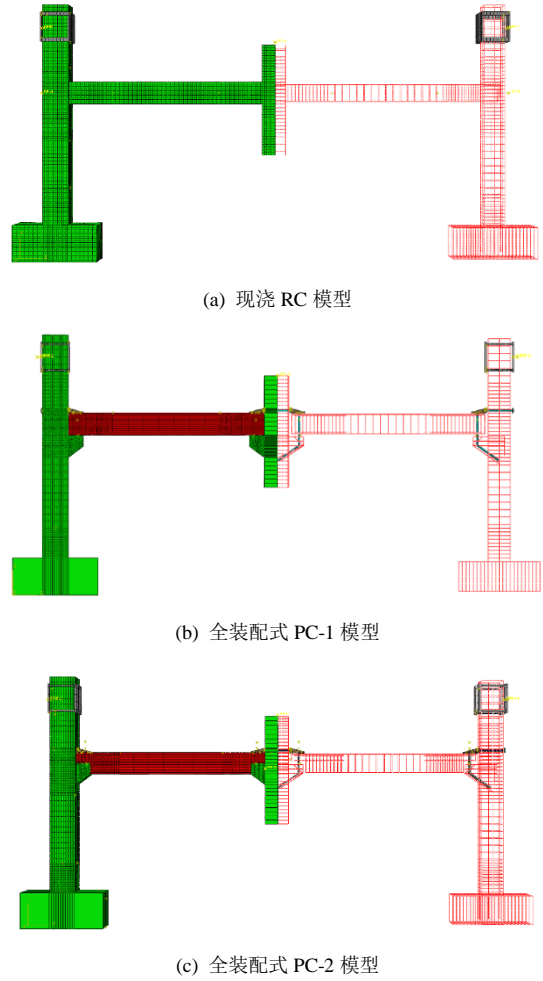
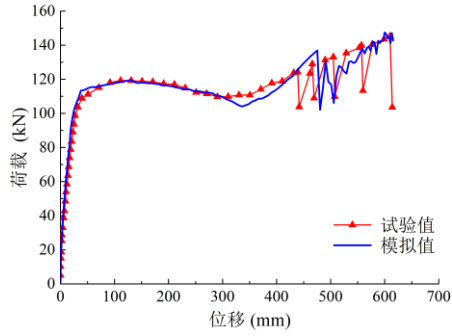


图 10 试件有限元模型图

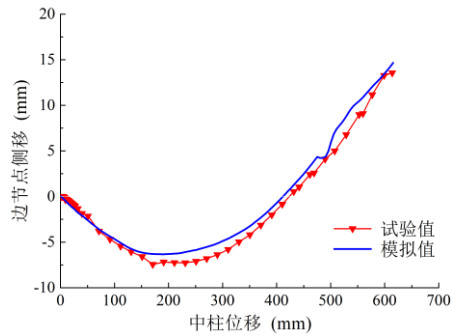
RC 试件节点区域混凝土单元网格取为 30mm，框架柱中部位置混凝土单元网格取为 50mm；钢筋单元网格取为 50mm。为提高计算效率，装配式试件 PC-1 和 PC-2 中混凝土单元网格在梁柱节点区域采取 20mm，而在梁跨中和柱中部区域则划分为 200mm；钢筋单元网格大小均为 50mm，并采用结构化网格划分技术。

4.2 模拟结果

RC 试件计算所得的荷载-位移曲线和边柱梁柱节点处水平位移曲线如图 11 所示。其中(a)为 RC 试件试验和模拟荷载-位移曲线对比。由曲线可知，模拟曲线与试验曲线吻合良好，曲线趋势和关键点的荷载位移值均相差很小，基本重合。(b)为 RC 试件试验和模拟边节点水平位移曲线对比。由图可知，模拟的边节点水平位移与试验曲线趋势相同，模拟曲线在向外的位移略小于试验结果，向内的位移略大于试验结果。



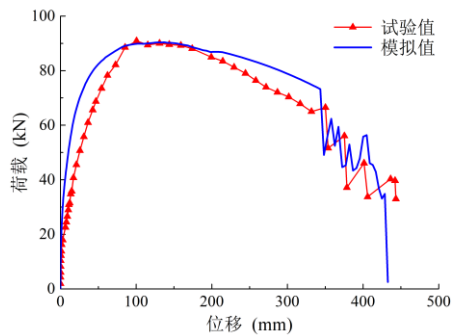
(a) 荷载-位移曲线



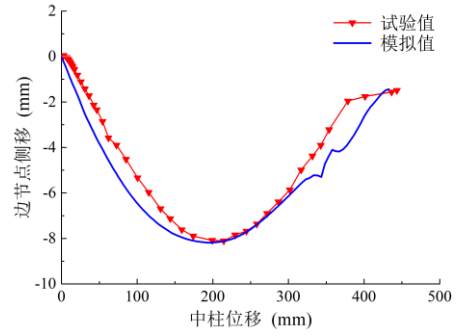
(b) 边柱节点-位移曲线

图 11 现浇 RC 试件模拟结果

PC-1 试件模拟所得结果如图 12 所示。其中(a)为 PC-1 试件试验和模拟荷载位移曲线对比。由曲线可知，模拟曲线与试验曲线吻合良好，峰值荷载点荷载位移值相差很小，钢筋发生断裂的位置相差不大。曲线上升段和下降段略有差异，主要为模型中灌浆和梁柱空隙的处理造成。(b)为 PC-1 试件试验和模拟边节点水平位移曲线对比。由图可知，模拟的边节点水平位移与试验曲线趋势相同，但在试验初始阶段边节点有向框架内的微小移动，随后迅速向框架平面外移动；而模拟开始阶段边节点边向框架外移动，造成模拟的边节点位移曲线整体左移。



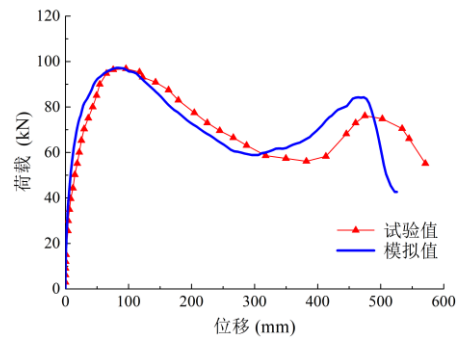
(a) 荷载-位移曲线



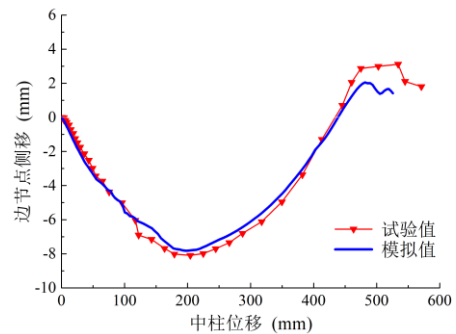
(b) 边柱节点-位移曲线

图 12 全装配式 PC-1 试件模拟结果

PC-2 试件模拟所得结果如图 13 所示。其中(a)和(b)分别为 PC-2 试件荷载-位移曲线和边节点水平位移的试验与有限元模拟对比图。由曲线可知，模拟曲线与试验曲线在受力前期吻合良好，峰值荷载点荷载位移值相差很小。模拟的边节点水平位移与试验曲线趋势相同。但在荷载下降至最低点位置处，插梢处钢筋已经发生断裂，荷载下降明显；模拟后期荷载虽然有所上升，但与试验曲线还是具有一定差距。这种差距主要是模拟过程中混凝土材料并未发生压溃脱落现象，与试验现象不同。



(a) 荷载-位移曲线



(b) 边柱节点-位移曲线

图 13 全装配式 PC-2 试件模拟结果

5 结论

本文通过设计一个现浇框架结构 (RC) 和两个全装配式框架结构 (PC-1, PC-2), 对中柱移除情况下的结构抗连续倒塌性能进行了试验研究。同时在 ABAQUS 中分别建立了精细化的结构有限元模型, 并对加载过程进行了模拟。主要结论如下:

(1) 通过对三个试件进行加载试验, 揭示了混凝土框架结构在移除中柱过程中的抗连续倒塌受力性能。现浇试件整个受力过程包括压拱效应阶段和悬索效应阶段, 尤其是悬索效应阶段的发展, 为结构提供第二次防倒塌保障; 而装配式试件 PC-1 在中柱移除过程中主要经历了压拱效应一个阶段, 虽然 PC-2 有短暂的悬索效应发展, 但其承载力不及现浇试件。

(2) 试验结果表明, 现浇试件承载能力高于装配式试件, 尤其是悬索效应峰值较拱效应峰值提高约 22%, 大大增强了结构防连续倒塌能力。装配式试件 PC-1 和 PC-2 的承载力分别为 RC 试件拱效应峰值的 76% 和 81%; 同时 PC 试件的极限位移仅为现浇试件极限位移的 72% 和 77%, 表明装配式试件延性相对不足。

(3) 结构有限元模型计算所得的荷载-位移曲线与试验结果吻合程度良好, 较好地反映了试件在各个加载阶段的受力性能。为后续结构参数分析和性能优化提供了基础保障。

参考文献:

- [1] Qian K, Li B. Experimental and Analytical Assessment on RC Interior Beam-Column Subassemblages for Progressive Collapse[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2012, 26(5):576-589.
- [2] Qian K, Li B. Performance of Three-Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Substructures under Loss of a Corner Column Scenario[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(4):584-594.
- [3] Yu J, Tan K H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages[J]. *Engineering Structures*, 2013, 55(4):90-106.
- [4] Pham A T, Tan K H, Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse[J]. *Engineering*

Structures, 2016, 149:2-20.

- [5] Lu X, Lin K, Li Y, et al. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario[J]. *Engineering Structures*, 2016.
- [6] 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构设计规范 (GB50010). 北京. 建筑工业出版社, 2010
- [7] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 (GB50011). 北京. 建筑工业出版社, 2010
- [8] 曾翔. 冲击和快速加载作用下钢筋混凝土梁柱构件性能试验与数值模拟研究:[湖南大学博士论文]. 长沙: 湖南大学, 2014, 3-35
- [9] Othman H, Marzouk H. Finite-Element Analysis of Reinforced Concrete Plates Subjected to Repeated Impact Loads[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9):04017120-1:16.