

DOI:10.11918/202005078

一种栓筋连接的装配式 RC 框架结构抗倒塌分析

张娇磊¹, 李进¹, 郑先超², 赵花静³, 李青宁¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 安阳工学院 土木与建筑工程学院, 河南 安阳 455000; 3. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

摘要: 为研究一种外包钢管栓筋连接的装配式钢筋混凝土框架结构的抗倒塌性能, 完成了3根足尺装配式整体式长柱试验。首先使用有限元软件 SAP2000 中的多段线性塑性连接单元提出了一种简化的装配式柱模型, 模拟出了该柱-柱节点, 并与试验结果比较。然后采用抽柱法对一栋6层外包钢管栓筋连接的装配式框架结构和现浇框架结构进行连续倒塌分析, 分别抽除首层角柱、首层长边中柱、首层短边中柱、首层内柱四种工况, 得到了抽柱后的关键构件内力、位移时程曲线; 最后通过 Pushdown 曲线分析装配与现浇结构的倒塌机制。研究表明: 多段线性塑性连接单元较好地模拟了装配式柱-柱节点, 模拟值与试验值比较吻合; 在设计荷载作用下, 四种工况中内柱的破坏对装配结构影响最大, 其位移比现浇结构大了72.2%; 在抗力曲线中发现, 角柱破坏时是装配结构梁机制的承载力最低的情况, 比现浇结构小了25.4%, 内柱破坏时是装配结构悬链线机制的承载力最低的情况, 比现浇结构小了33.1%。最终得出需要加强装配结构的内柱和边柱及其相邻梁构件的截面尺寸和配筋, 以及外包钢管的厚度来提高其刚度, 本文可为此类装配式结构的后续工程应用提供一种抗倒塌设计参考。

关键词: 抗连续倒塌; 抽柱法; 柱-柱节点; 连接单元; 装配式框架; 现浇框架

中图分类号: TU375.3; TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)04-0111-09

Analysis of collapse resistance of prefabricated RC frame structure with reinforcement connection

ZHANG Jiaolei¹, LI Jin¹, ZHENG Xianchao², ZHAO Huajing³, LI Qingning¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, Henan, China;

3. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To study the progressive collapse of a prefabricated reinforced concrete frame structure (PRCS) with steel tube bolted connection, three full-scale prefabricated long columns were tested. First, a simplified prefabricated column model was proposed by using the multi-stage linear plastic connection element in SAP2000. The column-column joint was simulated and compared with test results. Then, a six-story PRCS connected by steel tube bolted bars and a six-story cast-in-place reinforced concrete frame structure (CRCS) were analyzed by removing column method. Four working conditions were removed, namely, the corner column, the long side middle column, the short side middle column, and the inner column of the first floor. The internal force and displacement time history curve of key components were obtained after removing the columns. Lastly, the collapse mechanisms of PRCS and CRCS were analyzed through Pushdown curves. Results show that the multi-stage linear plastic connection element well simulated the prefabricated column-column joint, and the simulation value was consistent with the test value. Under design load, the failure of the inner column had the greatest impact on the PRCS, and its displacement was 72.2% larger than that of the CRCS. By analyzing the Pushdown curves, it was found that when the corner column was damaged, the bearing capacity of the PRCS under beam mechanism was the lowest, which was 25.4% less than that of CRCS, and the lowest bearing capacity was 33.1% less than that of CRCS when the inner column was damaged. Finally, the section size and reinforcement of the inner and side columns and their adjacent beam members that are needed to be strengthened, as well as the thickness of the outer steel tube, were obtained to improve their rigidity. Therefore, this paper can provide reference for the collapse resistance design of the subsequent engineering application of such prefabricated structures.

Keywords: progressive collapse resistance; removing column method; column-column joint; connecting unit; prefabricated frame; cast-in-place frame

收稿日期: 2020-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51678474); 陕西省自然科学基金(2019JQ-765); 教育厅专项科研计划(18JK1420)

作者简介: 张娇磊(1996—), 男, 硕士研究生;

李青宁(1952—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李进, lijn2171@outlook.com

结构的连续倒塌通常是由于意外事件或者偶然荷载造成整体结构局部发生破坏, 从而触发连锁效应加剧破坏的扩散, 最终整体结构丧失承载力继而出现大面积的坍塌^[1]。而建筑结构的连续倒塌通常造成重大的人员伤亡和经济损失, 故对建筑结构

的抗倒塌性能进行研究,具有十分重要的意义。而装配式建筑结构是中国实现建筑工业的一条重要途径,装配式建筑因其具有施工效率高、环保、湿作业少、可集成化生产等特点^[2],因此对装配式建筑进行抗倒塌分析,对装配式的工程应用会提供一定的帮助。但是装配式建筑由于其节点连接部位的安全性能尚未完全解决,更需要进行抗连续倒塌的设计,如 2020 年 3 月 7 日福建泉州一装配式框架结构的倒塌造成大量人员的伤亡。虽然连续倒塌问题一直受到工程界的广泛重视,国内外也陆续制定了一些相应的建筑结构抗连续倒塌设计规范^[3-4],但目前的抗连续倒塌规范均是针对现浇钢筋混凝土结构,对装配式钢筋混凝土结构的抗连续倒塌设计指导较少。JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》^[5]中指出装配式建筑应当考虑抗连续倒塌的设计,但并未给出具体的设计说明,由于国家正在大力推动装配式建筑的发展,因此对装配式建筑结构的抗连续倒塌研究具有十分重大的工程意义。

自从英国 Ronan Point 公寓由于发生局部爆炸导致其 18 层的装配式结构发生倒塌以及美国“911”事件导致的结构连续倒塌^[6-7],让人们认识到建筑结构的抗连续倒塌设计的重要性,故近些年来国内外学者也逐渐开展对装配式结构的抗连续倒塌研究。文献[8]对一种叠合梁和一种装配整体式柱进行抗倒塌试验研究,通过依次拆除相应柱构件,研究了配筋率、底筋构造、叠合面构造,结果表明:在拆除相关关键构件后,装配式结构均发生了压拱效应、悬链线效应,最终梁纵筋被拔断导致结构最终失效,同时给出了结构抗力方面的性能建议。文献[9]完成了 2 个 1:3 缩尺的预制梁板柱子结构,2 个试件分别为焊接连结和后浇整体式连结,研究结果表明:对于焊接连结装配式结构,在结构破坏时发生脆性破坏,结构延性较差,后浇装配整体式结构的性能较优于焊接连结的装配式结构。文献[10]完了 4 个 1:3 缩尺的预制梁柱装配式结构,对其进行了抽中柱的抗倒塌试验,其中 4 个试件涉及不同连结方式以及现浇节点进行对比分析,研究结果表明:湿连结抗倒塌效果优于现浇节点,其中干连结由于螺栓存在应力集中,损伤退化快。文献[11]研究了机械套筒、弯起锚固、预应力连结等 4 种湿连结以及一个现浇试件,研究结果表明:套筒连结破坏均在套筒连结处发生了集中破坏,更换梁的弯起锚固时,其抗倒塌性能达到了等同现浇的水平,同时施加预应力之后可以显著提高二者的抗倒塌能力。但总的来说近些年来国内外学者主要研究的是现浇钢筋混凝土结构^[12-15],对于装配式结构的抗连续倒塌机理研究较少,因此本文对一种新型装配式结构的倒塌性能展开研究。

鉴于此,本文对一种新型的柱-柱构造连接:“一种局部外包钢管栓筋连结的装配整体式柱”进行整体抗连续倒塌研究,此柱-柱节点的相关抗震性能已经充分研究,可以达到等同现浇的水平,此构件安装方便,且节点的弯剪承载力均满足要求,构件的耗能、延性均较好^[16-17],且已经运用到实际工程当中(见图 1),因此研究其整体的抗倒塌性能具有较大的工程意义。基于此本文对一栋 6 层装配式钢筋混凝土框架结构(下称装配结构)以及一栋 6 层现浇钢筋混凝土框架结构(下称现浇结构)进行依次拆除关键构件,分析和对比二者相应的内力、位移时程和结构抗力曲线,以期为此类装配式节点的工程应用提供抗连续倒塌设计依据。



图 1 试点工程的现场施工

Fig. 1 Site construction of pilot project

1 试验参数与节点构造

本次试验共设计 4 个足尺钢筋混凝土长柱,一个现浇柱 PRCC - W01, 3 个装配式柱 PRCC - W02、PRCC - W03、PRCC - W04,其中装配式柱截面均为 400 mm × 400 mm,柱纵向配筋也均为 8 根直径为 22 mm 的 HRB400 级钢筋,其中箍筋均采用中国建筑研究院提供的高强复合螺旋箍筋,箍筋直径为 5 mm,箍筋屈服强度为 1 050 MPa,箍筋间距为 50 mm,在柱顶 400 mm 高度设置箍筋加密区,间距为 30 mm。其中混凝土等级均为 C40,柱高 2 100 mm。装配式上柱与下柱是断开的,纵筋不连续,在连接处使用外包钢管,横向穿筋,且横向穿筋焊接在钢管上面,其中钢管材料选用 Q235 级扁豆花纹槽型钢板,厚度为 5 mm,栓筋采用直径 22 mm 的 HRB400 级钢筋。最后,在外包钢管与混凝土柱之间灌入高强灌浆料,最终使其成为一个装配整体式柱。详细设计参数见表 1,装配式柱详细构造见图 2,装配后的实物见图 3。

表 1 装配式柱设计参数

Tab. 1 Design parameters of prefabricated column

试件编号	钢管厚度/mm	轴压比	剪跨比	体积配箍率/%
PRCC - W01		0.60	4.75	0.79
PRCC - W02	5	0.35	4.75	0.79
PRCC - W03	8	0.60	4.75	0.79
PRCC - W04	5	0.60	4.75	0.79

所使用的连接单元的有效性,选取了此次 3 个装配式柱节点拟静力试验,采用上述建模方法进行建模分析,试验加载与有限元加载,见图 7,其计算结果

与试验结果对比见图 8。最终将该多段线性塑性连接单元布置在框架结构柱每一处的柱脚处,以考虑其最不利情况。

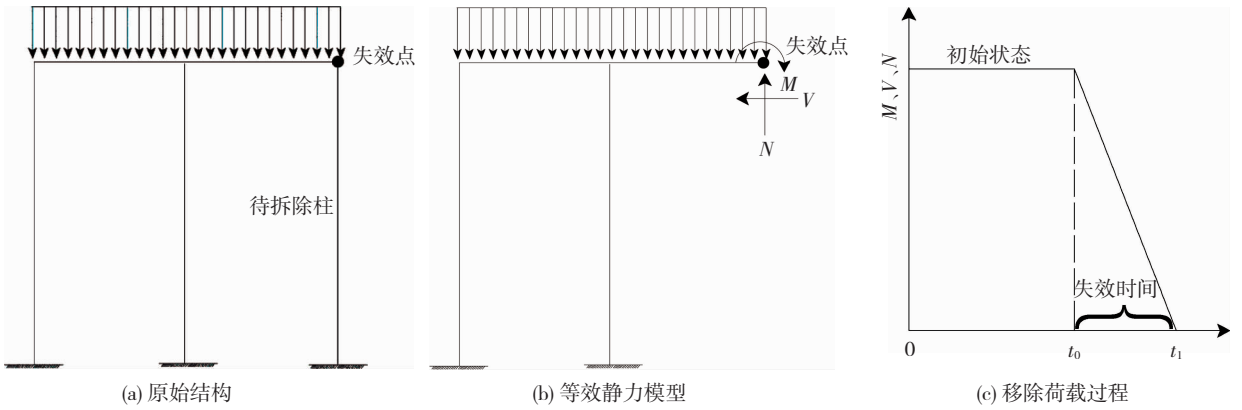


图 4 抽柱法示意流程

Fig. 4 Flow of removing column method

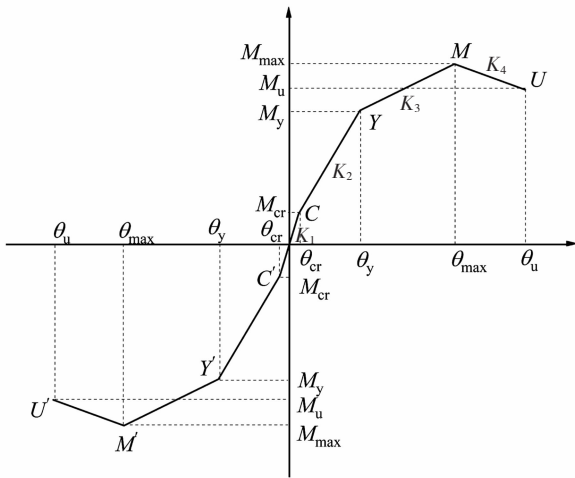


图 5 装配式柱节点不同破坏阶段的刚度取值

Fig. 5 Stiffness values of prefabricated column joints in different failure stages

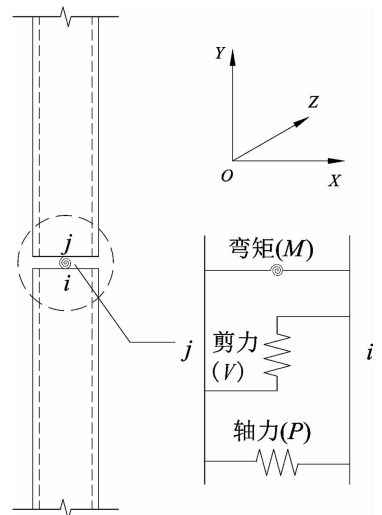


图 6 装配式结构节点模型示意

Fig. 6 Joint model of prefabricated structure

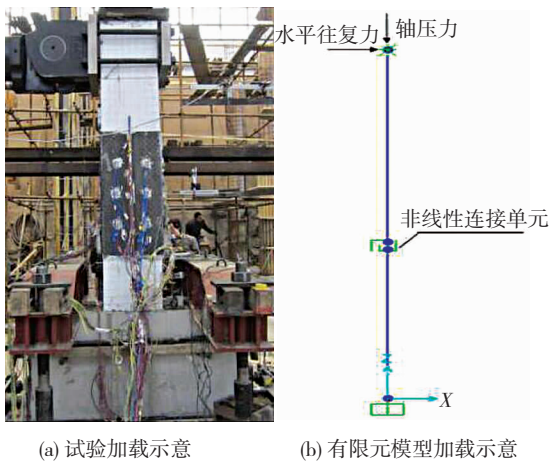


图 7 试件加载

Fig. 7 Loading of test piece

由图 8 可知,本文使用的多段线性塑性连结单元较好得模拟了该装配式柱节点,为下面装配式框架结构的建立奠定了基础。

2.3 框架结构模型的建立

根据中国建筑设计规范^[19-20],设计一栋 6 层装配式结构,现浇结构配筋和尺寸同装配结构。该结构地震分组为第二组,场地特征周期 0.4 s,II 类场地、抗震设防烈度 8 度(0.2 g),结构重要性系数 1.0,平立面尺寸见图 9,柱截面尺寸均为 500 mm × 500 mm,梁截面尺寸分别为 300 mm × 600 mm、200 mm × 400 mm。楼板采用膜单元,楼板厚度为 250 mm,其他梁柱构件采用框架单元,混凝土本构采用 Mander 约束关系,钢筋采用二折线强化本构。屋面恒载 5 kN/m²、屋面活载 0.5 kN/m²、楼面恒载 4 kN/m²、楼面活载 2 kN/m²、梁间线荷载 9.6 kN/m、基本风压为 0.35 kN/m²、基本雪压为 0.25 kN/m²。其中构件拆除规则依据 GSA 2013^[21] 相关建议进行拆除,主要分析四种倒塌工况:1) 首层角柱失效(A-1 柱);2) 首层长边中柱失效(B-1 柱);3) 首层短边中柱失效(A-4 柱);4) 首层内柱失效(B-4 柱)。

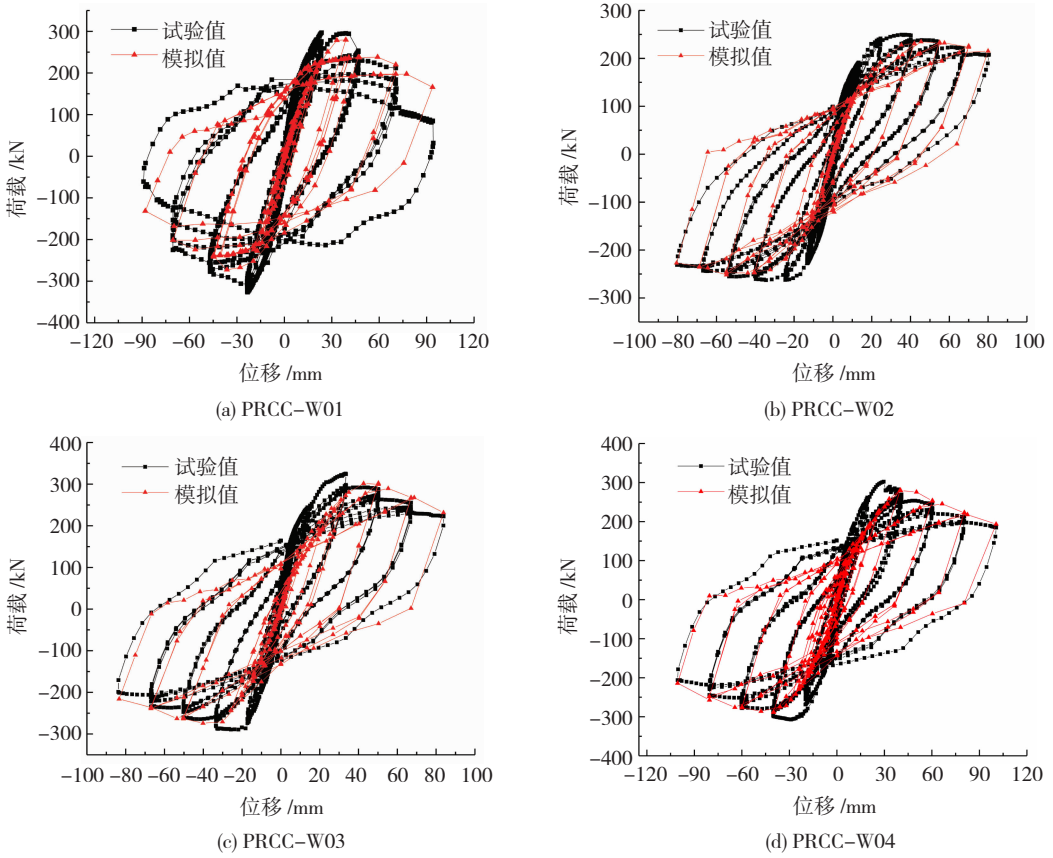


图 8 柱-柱节点滞回曲线验证

Fig. 8 Column-column joint hysteretic curve verification

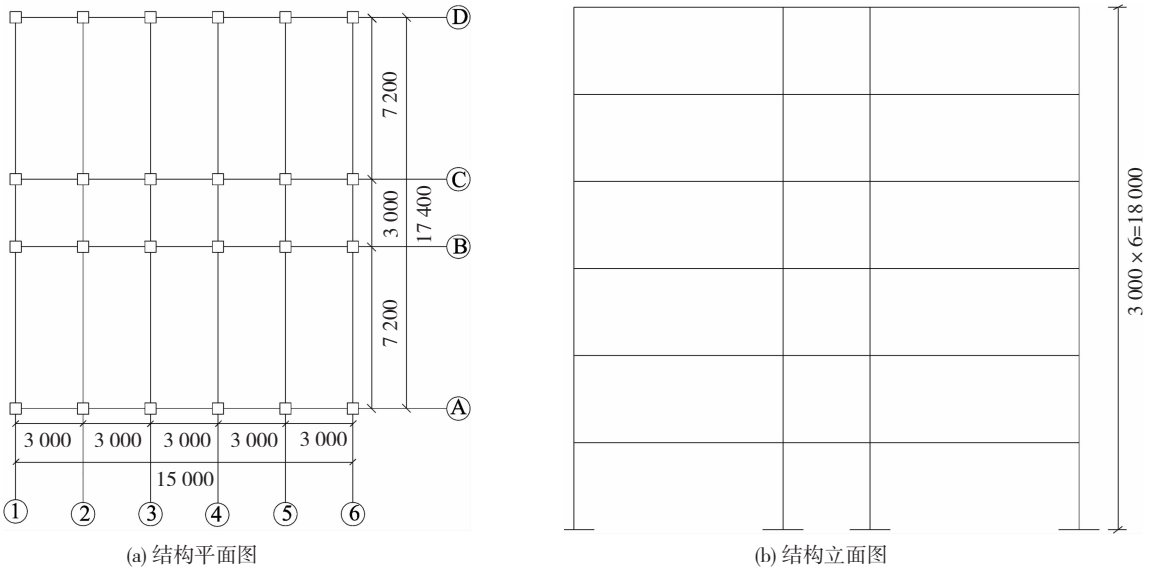


图 9 六层装配与现浇结构简图 (mm)

Fig. 9 Schematic diagram of six-story PRCS and six-story CRCS (mm)

3 连续倒塌分析

3.1 失效准则

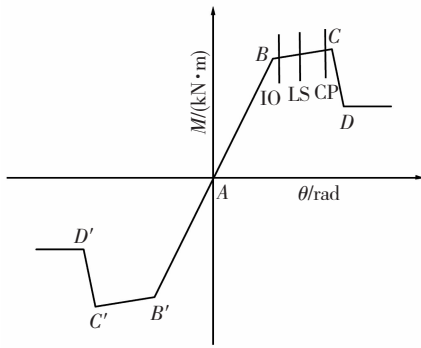
对结构进行弹塑性非线性分析时,即使结构进入非线性行为,但此时仍可继续承担外荷载作用,但有时变形过大并没有完全破坏也认为结构或者构件达到失效状态。因此对结构的抗连续倒塌分析,也

需要事先定义好结构的失效界限,本文取梁、柱端塑性转角达到 CP(倒塌)性态,见图 10,失效点位移达到梁跨度 1/10 时认为结构开始连续倒塌^[22-23]。

3.2 抽柱后结构的动力分析

首先针对装配结构与现浇结构失效点的位移、失效柱相邻构件轴力时程结果,进行抗倒塌分析,同时相邻构件的选取为距离失效柱最近的柱子,若存

在两个及以上距离等长的则选取受力最大的。本文设置分析时长为 3 s, 从 0.5 s 开始拆除, 并首先在一倍设计荷载作用下进行研究装配与现浇结构的抗倒塌能力。

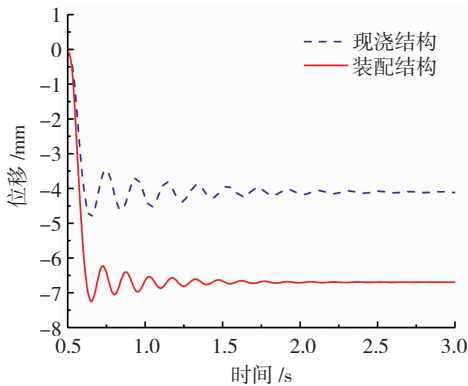


A 点为初始点; B 点为屈服点; C 点为极限承载力; D 点为残余强度; IO、LS、CP 分别代表直接使用、生命安全、防止倒塌。

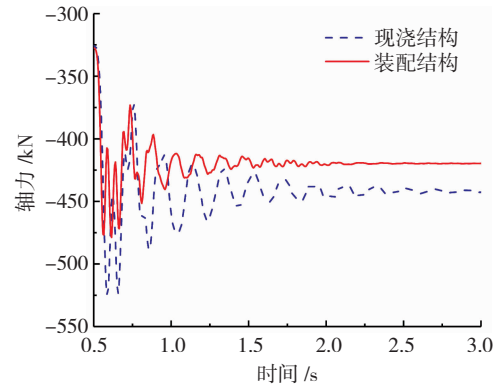
图 10 塑性角弯矩-转角曲线

Fig. 10 Plastic angle bending moment-rotation angle curve

首先从图 11 ~ 14 可知, 四种工况下装配与现浇结构均未发生连续倒塌。对于抽 A-1 柱工况下, 现浇结构的最终位移稳定在 -4.1 mm, 装配结构的最终位移稳定在 -6.7 mm, 其中装配结构位移比现浇结构大了 38.9%; 其中对于轴力而言, 现浇结构的轴力前期波动较大, 后期趋于稳定在 -441.9 kN, 装配结构的轴力最终稳定在 -419.7 kN, 其中装配结构的轴力最终比现浇结构小了 5%, 见图 11。对于抽 B-1 柱工况下, 现浇结构的最终位移稳定在 -2.5 mm, 装配结构的最终位移稳定在 -4.4 mm, 其中装配结构位移比现浇结构大了 43.1%; 现浇结构的轴力最终稳定在 -336 kN, 装配结构的轴力最终稳定在 -323 kN, 装配结构的轴力最终比现浇结构小了 3.9%, 见图 12。对于这两种工况, 抽角柱和长边中柱装配结构与现浇结构的力学性能基本一致, 在对装配结构进行抗倒塌设计时可按照现浇结构进行考虑。



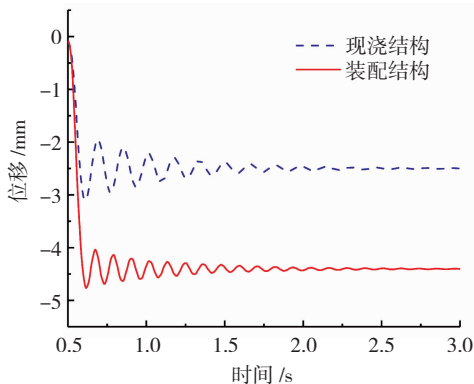
(a) 抽 A-1 柱后失效点位移时程曲线



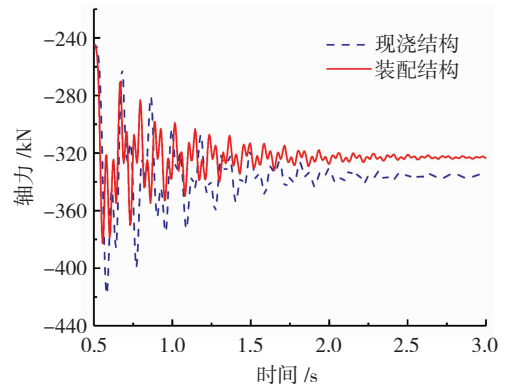
(b) 抽 A-1 柱后相邻 A-2 柱轴力时程曲线

图 11 抽 A-1 柱后装配与现浇结构受力变化

Fig. 11 Stress variation of PRCS and CRCS after removing column A-1



(a) 抽 B-1 柱后失效点位移时程曲线



(b) 抽 B-1 柱后相邻 B-2 柱轴力时程曲线

图 12 抽 B-1 柱后装配与现浇结构受力变化

Fig. 12 Stress variation of PRCS and CRCS after removing column B-1

抽 A-4 柱后现浇结构的最终位移稳定在 -6.4 mm, 装配结构的最终位移稳定在 -20.3 mm, 此工况下装配与现浇结构的位移差别较大, 装配结构比现浇结构位移大了 68.4%; 对轴力而言, 仍是现浇

结构的轴力前期波动较大, 最终现浇结构轴力稳定在 -456.9 kN, 装配结构的轴力稳定在 -445.9 kN, 二者轴力相差较小, 基本一致, 见图 13。抽 B-4 柱后现浇结构的最终位移稳定在 -5 mm, 装配结构的最终

终位移稳定在 -18 mm, 装配结构的位移比现浇结构位移大了 72.2%; 此时二者的轴力也基本一致, 见图 14。表明在抽短边中柱、内柱工况下, 在构件发生初始破坏倒塌时, 装配结构会发生较大的变形, 尽管外

包钢管栓筋柱在构件层次上表现出足够的刚度, 但在空间三维结构中仍会出现刚度不足, 发生较大变形, 使得结构发生较大位移, 所以应当适当提高装配结构边柱、内柱的截面尺寸和外包钢管的刚度。

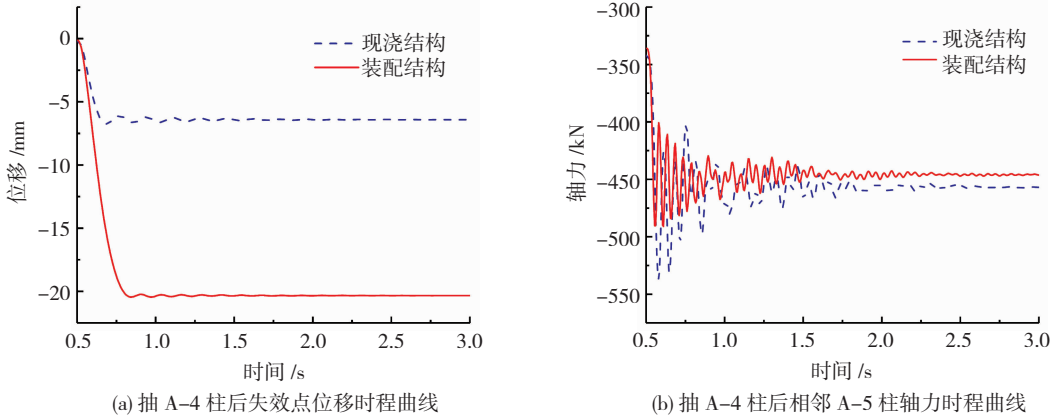


图 13 抽 A-4 柱后装配与现浇结构受力变化

Fig. 13 Stress variation of PRCS and CRCS after removing column A-4

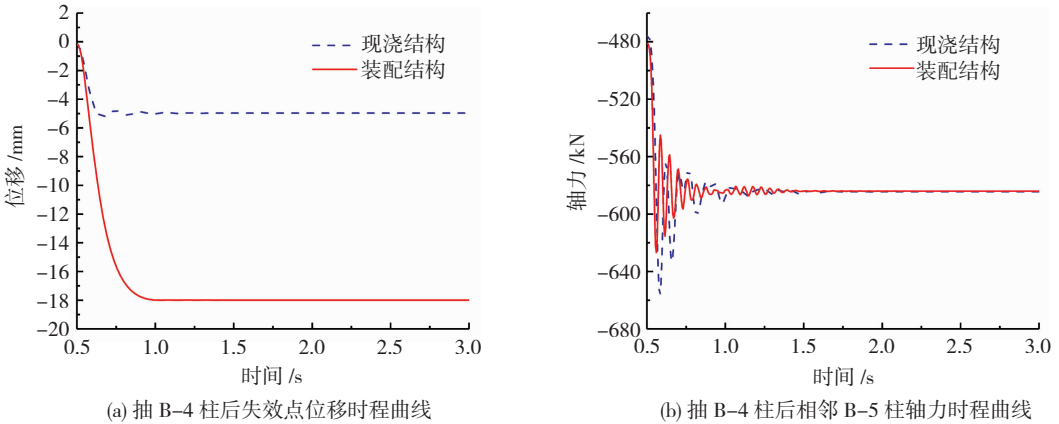


图 14 抽 B-4 柱后装配与现浇结构受力变化

Fig. 14 Stress variation of PRCS and CRCS after removing column B-4

3.3 结构的 Pushdown 分析

鉴于上述倒塌分析中, 装配结构与现浇结构的抗倒塌能力仍有一定的区别, 对其进一步的 Pushdown 分析, 根据加载位置的不同, Pushdown 分析可以分为受损跨加载、满跨加载。于晓辉等^[24]研究了 Pushdown 加载模式对结构的抗倒塌影响, 结果表明: 不同加载模式下的结构抗力曲线几乎一致。因此本文采用受损跨局部加载, 加载示意图见图 15。

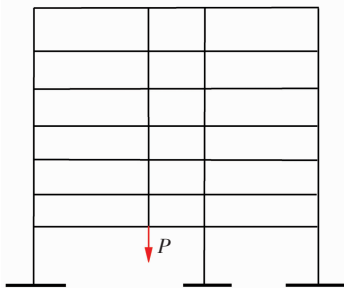


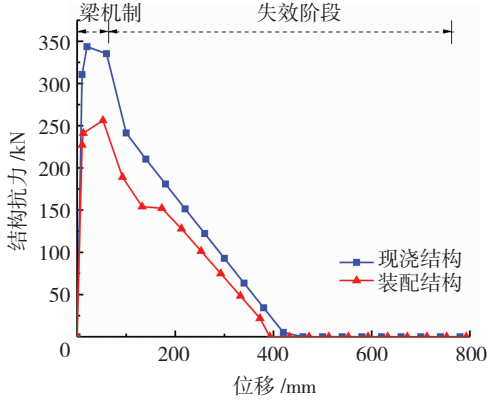
图 15 结构 Pushdown 加载示意

Fig. 15 Schematic diagram of Pushdown loading on structure

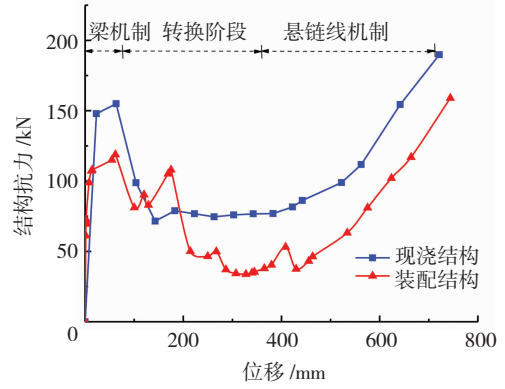
从图 16 可知, 装配结构 4 个部位的抽柱, 第一个峰值承载力在位移达到 80 ~ 100 mm 出现, 即梁机制抗倒塌承载力, 均略小于现浇结构的梁机制抗倒塌承载力。对于抽除 A-1 柱工况下, 装配与现浇结构均是达到梁机制承载力之后开始迅速发生大位移, 当位移达到 400 mm 时, 结构发生连续倒塌, 主要由于角柱的抽除后其梁缺少水平方向的约束, 无法提供其梁端轴力, 不能过渡到悬链线机制, 发生较早的破坏。对于抽除 A-4、B-1、B-4 柱工况下, 当装配与现浇结构达到梁机制承载力之后, 梁端塑性铰逐渐开始失效, 结构的位移开始迅速发展, 同时也使得梁端轴力也迅速增大, 进一步提高结构的抗力。对于 4 种工况下, 其中梁机制的承载力能力, 装配与现浇结构相差最大是抽除 A-1 柱工况, 现浇结构的梁机制承载能力比装配结构大了 25.4%; 其中装配结构与现浇结构的梁机制的承载能力相差最小的是抽除 B-1 柱工况, 二者仅相差 2.4%, 如

表 2 所示。由于本文梁截面高度较小,配制钢筋相对较多,出现悬链线机制的承载力稍大于梁机制的承载力^[25]。在悬链线机制的承载力中装配与现浇结构相差最大的是 B-4 工况,现浇结构悬链线机制的承载力比装配结构大了 33.1%;其中装配结构与现浇结构的悬链线机制的承载能力相差最小的是

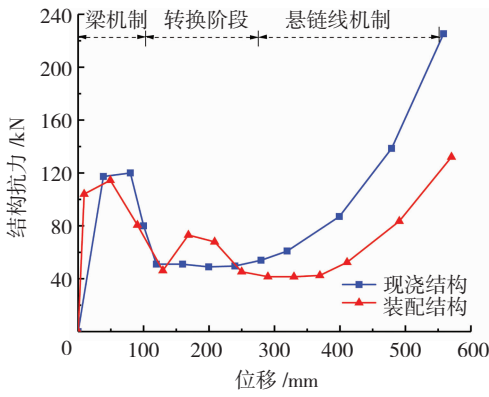
抽除 A-4 柱工况,二者仅相差 16.3%,如表 2 所示。综上所述,在拆除 A-4、B-1 柱工况下,装配与现浇结构的抗倒塌性能比较接近,但是在拆除 A-1、B-4(边柱、内柱)工况下相差较大。故需要提高内柱、边柱及其相邻梁构件的截面尺寸和配筋,以防止出现严重的倒塌现象。



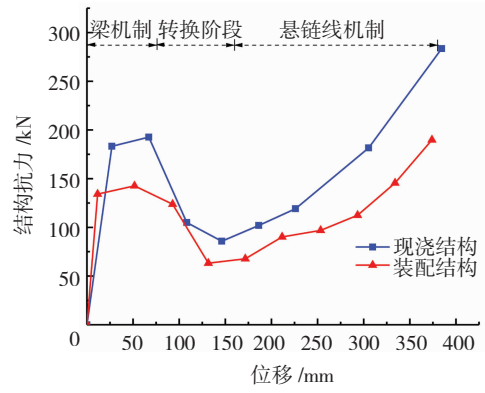
(a) 抽除 A-1 柱(Step=11 倒塌)



(b) 抽除 A-4 柱(Step=16 倒塌)



(c) 抽除 B-1 柱(Step=13 倒塌)



(d) 抽除 B-4 柱(Step=9 倒塌)

图 16 装配与现浇结构的 Pushdown 抗力曲线

Fig. 16 Pushdown resistance curves of PRCS and CRCS

表 2 梁机制、悬链线机制下的装配与现浇结构承载力对比

Tab. 2 Comparison of bearing capacity of PRCS and CRCS under beam mechanism and catenary mechanism

工况	$P_{CRCS}/$ kN	$P_{PRCS}/$ kN	$((P_{CRCS} - P_{PRCS})/$ $P_{PRCS})/\%$	
梁机制	A-1 柱	343.7	256.4	25.4
	B-1 柱	117.3	114.5	2.4
悬链线机制	B-4 柱	283.6	189.8	33.1
	A-4 柱	189.9	159.0	16.3

4 结 论

本文通过 3 根外包钢管栓筋连接的装配式柱试验,验证了基于 SAP2000 有限元软件建立的模型,结果表明模拟值与试验值基本一致。在此基础之上对一栋 6 层的装配式和现浇钢筋混凝土结构进行了抗倒塌研究,得出如下结论:

1) 当装配结构发生初始破坏仅在自重和设计荷载作用下时,其中在短边中柱和内柱发生破坏时,装配结构的位移分别比现浇结构大了 13.9 mm (增幅 68.4%)、13 mm (增幅 72.2%),故此两种工况下装配结构在内力重分布后,出现与同等配筋情况下的现浇结构刚度不足的情况,所以应当加强短边中柱和内柱的截面设计,以及提高外包钢管的厚度和强度。

2) 在结构的 Pushdown 抗力曲线中,装配结构在抽除角柱、短边中柱、内柱时梁机制的承载力均低于现浇结构,其中角柱破坏时梁机制的承载力低了 25.41%,主要在于角柱的破坏导致两端梁构件的约束严重不足,无法提供足够的轴力,故应当加强此柱和相邻梁构件的钢筋锚固设计,其中在长边中柱破坏时二者的梁机制承载力基本一致。装配结构悬链线机制的承载力均略低于现浇结构,可以提高梁截面高度和配筋进行改善。

参考文献

- [1] 周云,张琴,胡翔,等.基于拆除构件法的全装配式框架结构连续倒塌分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(5):1
ZHOU Yun, ZHANG Qin, HU Xiang, et al. Progressive collapse analysis of fully assembled precast concrete frame structures based on column removal method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5):1. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzkb.2020.05.001
- [2] 潘毅,陈侠辉,姚蕴艺,等.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
PAN Yi, CHEN Xiahui, YAO Yunyi, et al. Progressive collapse analysis of unbonded post-tensioned precast RC frame structures using column removal method [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12):162. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0645
- [3] Design of buildings to resist progressive collapse: UFC4-023-03 [S]. Washington DC: Department of Defense, United States of America, 2013
- [4] 建筑结构抗倒塌设计规范:CECS 392—2014 [S].北京:中国计划出版社,2014
Code for anti-collapse design of building structures: CECS 392—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014
- [5] 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014 [S].北京:中国建筑工业出版社,2014
Technical code for prefabricated concrete structure: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014
- [6] 田石柱,邹献.不同强度等级混凝土对混凝土框架结构的抗倒塌分析[J].世界地震工程,2016,32(1):29
TIAN Shizhu, ZOU Xian. Collapse resistance analysis of concrete frame structures with different concrete strength grade [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1):29
- [7] ADAM J M, PARISI F, SAGASETA J, et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century [J]. Engineering Structures, 2018, 173(6):122. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
- [8] KANG Shaobo, TAN Kanghai. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal [J]. Engineering Structures, 2015, 93(3):85. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.027
- [9] KAI Qian, LI Bing, LIU Yi. Integrity of precast concrete structures to resist progressive collapse [C]// Proceedings of Geotechnical and Structural Engineering Congress. Phoenix, Arizona: American Society of Civil Engineers, 2016: 1976. DOI: 10.1061/9780784479742.169
- [10] NIMSE R, JOSHI D, PATEL P. Experimental study on precast beam-column connections constructed using RC corbel and steel billet under progressive collapse scenario [C]// Proceedings of Structures Congress 2015. Portland, Oregon: American Society of Civil Engineers, 2015. DOI: 10.1061/9780784479117.094
- [11] 袁鑫杰,李易,陆新征,等.湿式连接装配式混凝土框架抗连续倒塌静力试验研究[J].土木工程学报,2019,52(12):47
YUAN Xinjie, LI Yi, LU Xinzheng, et al. Static progressive collapse test on prefabricated concrete frames with wet connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12):47
- [12] 周育珑,李易,陆新征,等.钢筋混凝土框架抗连续倒塌的压拱机制分析模型[J].工程力学,2016,33(4):34
ZHOU Yulong, LI Yi, LU Xinzheng, et al. An analytical model of compressive arch action of reinforced concrete frames to resist progressive collapse [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):34. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.02.0147
- [13] 初明进,周育珑,陆新征,等.钢筋混凝土单向梁板子结构抗连续倒塌试验研究[J].土木工程学报,2016,49(2):38
CHU Mingjin, ZHOU Yulong, LU Xinzheng, et al. An experimental study on one-way reinforced concrete beam-slab substructures for resisting progressive collapse [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2):38
- [14] 于晓辉,吕大刚,陈志恒.RC框架结构连续倒塌动力响应影响因素分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(6):48
YU Xiaohui, LÜ Dagang, CHEN Zhiheng. Analysis of influence factors on dynamic responses of progressive collapse for RC frame structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6):48. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201603077
- [15] 王多智,孙柏涛,戴君武,等.底部框架砖房地震倒塌调查与分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(2):184
WANG Duozhi, SUN Baitao, DAI Junwu, et al. Collapse investigation and analysis of RC frame supported masonry structures under the earthquake [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(2):184. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201609004
- [16] 李青宁,郑先超,颜志勇,等.高强螺旋箍筋约束混凝土柱连接抗震性能试验研究与理论分析[J].建筑结构学报,2013,34(8):90
LI Qingning, ZHENG Xianchao, YAN Zhiyong, et al. Seismic behavior experimental study and theoretical analysis on high-strength spiral stirrups confined concrete column [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8):90. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.08.011
- [17] ZHENG Xianchao, LI Qingning, PAN Shubing, et al. Experimental study on seismic of high strength spiral stirrups prefabricated column encased by steel plate hoop and bolt reinforcement [J]. Advanced Materials Research, 2012, 594(11):1675. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1675
- [18] 李佳龙,李钢,李宏男.基于隔离非线性的实体单元模型与计算效率分析[J].工程力学,2019,36(9):40
LI Jialong, LI Gang, LI Hongnan. The inelasticity-separated solid element model and computational efficiency analysis [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9):40
- [19] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010
- [20] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010
- [21] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project: GSA 2013 [S]. Washington DC: US General Services Administration, 2013
- [22] 孙春蕾,傅光耀,付善春.12层框架角柱与边柱连续倒塌破坏效应分析[J].南昌大学学报(工科版),2014,36(3):242
SUN Chunlei, FU Guangyao, FU Shanchun. Progressive-collapse destructive effects analysis of corner and side column in 12 layers frames [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2014, 36(3):242. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdg.2014.03.008
- [23] 陆艺诗.高层框架结构中大跨度空心楼板对抗连续倒塌能力影响的研究[D].广州:华南理工大学,2019
LU Yishi. Study on the influence of large-span hollow floor slabs on structural continuous collapse capacity in high rise frame structures [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. DOI: 10.27151/d.cnki.glnlu.2019.003147
- [24] 于晓辉,钱凯,吕大刚.竖向加载模式对结构连续倒塌 Pushdown 分析的影响[J].建筑结构学报,2015,36(增刊2):126
YU Xiaohui, QIAN Kai, LÜ Dagang. Effect of vertical loading patterns on Pushdown analysis of structures in resisting progressive collapse [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2):126. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S2.019
- [25] 李易,陆新征,叶列平,等.基于 Pushdown 分析的 RC 框架抗连续倒塌承载力研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(1):13
LI Yi, LU Xinzheng, YE Lieping, et al. Study on progressive-collapse resistance capacity of RC frame structures based on Pushdown analysis [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(1):13