

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202001029

装配式混凝土框架结构动态倒塌性能试验研究

杨涛^{1,2}, 谢元康¹, 郝天之³

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 广西北投交通养护科技集团有限公司, 广西南宁 530007)

摘要: 为了研究装配式混凝土框架结构的连续倒塌性能, 设计了6个比例为1/4的框架结构模型, 通过快速抽柱试验研究了框架梁的跨高比、拼接节点位置和预应力等参数对其动态倒塌性能的影响。试验结果表明, 中柱失效后在框架梁端和框架梁拼接节点的后浇混凝土区均产生了少量裂缝; 在框架梁跨度相同的情况下, 现浇混凝土框架结构的最大动态位移响应小于装配式框架结构; 在预制节段的框架梁内施加预应力后, 倒塌荷载对装配式框架结构的动力冲击作用增大, 但结构的最大动态位移和梁端钢筋应变等动态倒塌响应反而减小; 与现浇混凝土框架结构相比, 中柱失效后装配式框架产生的结构损伤更大; 当预制节段的拼接节点位置向框架柱靠近时, 装配式框架的最大动态位移响应增大; 试验所得预制装配式试件的位移动力增大系数和梁端钢筋应变动力增大系数的最大值分别为1.39和1.62, 这可为开展装配式混凝土框架结构静力倒塌分析时倒塌荷载动力增大系数的取值提供参考。

关键词: 装配式框架结构; 连续倒塌; 倒塌响应; 动力特性

中图分类号: TU378; TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0126-09

Experimental Study on Dynamic Collapse Performance of Prefabricated RC Frame Substructures

YANG Tao^{1,2}, XIE Yuankang¹, HAO Tianzhi³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Beitou Transportation Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: To study the progressive collapse of prefabricated reinforced concrete (RC) frame structures, six 1/4 scale frame substructures were designed and tested by fast removing columns. The influence of several parameters, such as the span to depth ratios of frame beams, the splicing joint positions as well as prestress, on the dynamic collapse performance was investigated. Experimental results show that at the frame beam ends and in the regions of post-poured concrete of the splicing joints for the prefabricated frames appeared a few cracks after the middle column failed. The maximum dynamic

* 收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568005)、广西重点实验室系统性研究项目(2016ZDK004)、南宁市创新创业领军人才“邕江计划”(20180104)资助

作者简介: 杨涛(1979—), 男, 副教授, 博士。主要从事混凝土结构受力性能研究。E-mail: yt48440002@163.com

通讯作者: 郝天之(1980—), 男, 正高级工程师, 博士。主要从事工程结构监测与检测评估。E-mail: htz0537@163.com

displacement response of the monolithic RC frame substructure was smaller than that of the prefabricated frame substructure with the same beam span. After prestress was applied on the frame beams of the prefabricated segments, the dynamic impact of collapse load on the prefabricated frame increased; however, the dynamic responses, including the maximum dynamic displacement and the strain of the longitudinal reinforcing bars at the beam ends, reduced instead. Compared with the monolithic RC frame substructure, the failure of the middle column caused more damage to the prefabricated frames. When the splicing joints of the prefabricated segments moved towards the frame column, the maximum dynamic displacement responses of the prefabricated frames increased. The maximum dynamic increase factors of the displacement and the strain of the reinforcing bars at the beam ends for the prefabricated substructures were 1.39 and 1.62, respectively, which may provide a reference for the determination of the dynamic increase factor of collapse load when the static collapse analysis is conducted on prefabricated RC frame structures.

Keywords: prefabricated frame structure; progressive collapse; collapse response; dynamic characteristics

引言

装配式框架结构可以实现工厂化预制和现场拼装施工,具有施工效率高、构件质量可靠等特点。与现浇混凝土框架结构相比,装配式框架结构中存在较多的预制构件拼接节点,若拼接节点处理不当将在结构中形成薄弱环节。因此,国内外学者对采用不同拼接节点形式的装配式框架结构的受力性能开展了相应的研究。李忠献等^[1]对装配整体型钢混凝土框架节点抗震性能开展的试验研究表明,节点能够满足抗震设计的延性要求且具有较好的耗能能力。H.Parastesh等^[2]提出了一种预制混凝土框架的延性梁柱节点,研究表明此类节点可以有效提高在高烈度区预制框架的抗震性能。程蓓等^[3]提出在预制节段预埋型钢并利用螺栓实现拼接的节点拼接方式,研究表明这种节点具有与现浇节点类似的耗能性能。付焕昌等^[4]在装配节点处设置钢板阻尼器,分析评估了金属消能减震连接体系对框架抗震性能的影响。柳炳康等^[5]在装配式梁柱节点施加预应力,研究表明预应力的作用使得试件有很强的变形恢复能力。韩春等^[6]提出了一种新型全装配式预应力混凝土梁与高强钢筋约束混凝土柱端板螺栓连接节点形式,研究表明此类节点具有良好的抗震性能。王洪林等^[7]对一榀两层两跨预压装配式混凝土框架开展了低周反复荷载试验,研究表明该

框架的延性和耗能性能良好。综上所述,通过合理设计的装配式框架可以具有良好的受力性能。

爆炸、撞击等偶然荷载可能导致结构部分承重构件发生破坏进而引发结构的连续倒塌破坏。研究表明^[8-11],悬链线效应是框架结构倒塌后期的主要抗倒塌机制之一。由于装配式混凝土框架结构中受力钢筋通常不连续,框架梁中悬链线效应的形成和发展可能受到影响,进而影响装配式混凝土框架的整体抗倒塌性能;此外,装配式框架结构的构造措施多样,影响结构倒塌性能的因素复杂。因此,近年来针对装配式混凝土框架倒塌性能的研究逐渐增多。H.M.Elsanadedy等^[12]对2个采用牛腿连接的装配式混凝土梁柱结构进行了倒塌性能研究,表明在极端情况下此类结构极易发生连续倒塌破坏。潘毅等^[13]对一栋6层预应力装配框架进行了倒塌分析,分析表明在截面和配筋相同的条件下无粘结预应力装配式框架结构的抗连续倒塌性能优于现浇框架结构。周云等^[14]对2个全装配式框架子结构开展了倒塌试验,子结构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。袁鑫杰等^[15]对湿式连接装配式混凝土框架开展的静力倒塌试验表明,采用机械套筒时梁钢筋在套筒处集中断裂,试件在压拱机制和悬链线机制下的倒塌抗力均显著降低。

综上所述,目前针对预制装配式框架结构的倒塌性能研究多数采用静力倒塌试验或计算分析的方法,

对装配式混凝土框架动态倒塌响应的研究仍然较少。为更准确地掌握装配式混凝土框架结构的动态倒塌性能,本文设计了6个1/4缩尺比例的1层2跨的装配式混凝土框架结构模型,通过中柱失效情况下的动力倒塌试验对其在设计倒塌荷载作用下的动态倒塌响应开展研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

从某框架结构的底层取出一个梁柱子结构隔离体,如图1中虚线所围部分。参照此梁柱子结构加工6个1/4比例的框架结构试件,试件的设计参数见表1。试件S1为现浇混凝土构件;S2~S6为预制装配式试件,采用了分段预制拼装的加工方法(图2),每个试件由3个梁柱节段(节段1、3和5)和2个框架梁节段(节段2和4)组成。加工试件S6时,在3个梁柱节段的框架梁内距梁顶面35 mm的位置按直线型布置一根直径9.5 mm的1860级无粘结预应力钢绞线,并通过该钢绞线对框架梁施加预应力。需要说明的是,由于试件S6中预应力筋的总长度较小,锚固后产生了较大的预应力损失,实测的施加于3个预制节段框架梁上的有效预应力仅约 $0.2f_{ptk}$, f_{ptk} 为钢绞线的极限抗拉强度。6个试件的梁、柱截面尺寸均相同,柱的截面尺寸为200 mm×200 mm,梁的截面尺寸为200 mm×130 mm;框架柱和框架梁中的纵筋分别采用HRB400级直径16

mm和12 mm的变形钢筋,箍筋均采用HPB300级直径8 mm的光圆钢筋。图2为核心试件S3的尺寸和配筋细节。试件S1框架梁和柱内的配筋与S3完全相同;试件S2和S4中预制节段1、3和5与试件S3相同,仅根据梁的跨度调整了节段2和4的长度;与试件S3相比,试件S5的4个拼接节点均向相邻的框架柱移动200 mm;试件S6与S3的区别仅在于在上述3个梁柱节段的梁顶布置了预应力筋。各试件的框架梁从边柱向外延伸300 mm,外伸段预埋4根高强螺杆并与A字形反力架连接。实测的钢筋力学性能见表2。

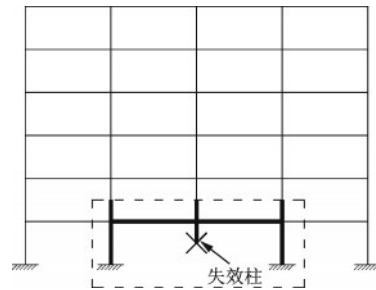


图1 原型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the prototype structure

各预制节段框架梁中的纵向钢筋弯折90°后通过手工电弧焊接于布置在梁端部的钢板上。在拼接节点位置,垂直该端板焊接4块拼接钢板,拼接钢板上设置螺栓孔,拼接钢板的尺寸如图3所示。各预制节段的装配通过拼接钢板实现,即相邻的拼接节段之间通过M8.8级直径10 mm的高强螺栓连

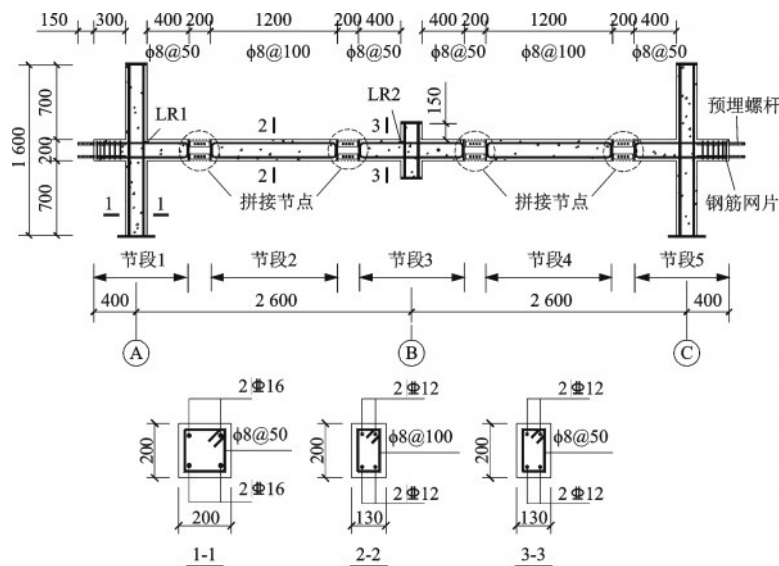


图2 试件S3的尺寸与配筋

Fig.2 Dimensions and reinforcement of the specimen S3

表 1 试件设计

Table 1 Design of the specimens

试件	l/mm	l_n/h_b	类型
S1	2 600	12.0	整体现浇
S2	2 300	10.5	
S3	2 600	12.0	
S4	2 900	13.5	预制装配
S5	2 600	12.0	
S6	2 600	12.0	

注： l 、 l_n 和 h_b 分别为框架梁的跨度、净跨和梁高

表 2 钢筋的力学性能

Table 2 Mechanical performance of the reinforcing bars

钢筋种类	直径/ mm	屈服 强度/ MPa	极限 强度/ MPa	弹性 模量/ MPa	伸长 率/%
HPB300	8	378.0	573.2	1.9×10^5	10.5
HRB400	12	443.2	593.6	2.0×10^5	12.4
HRB400	16	470.3	604.0	2.0×10^5	14.1

接。节点拼接区域长度为 200 mm,拼接完成后在拼接处后浇混凝土。拼接完成后节点示意如图 4 所示。预制构件混凝土和拼接区域后浇混凝土的轴心抗压强度实测值分别为 41.7 MPa 和 46.3 MPa。

1.2 加载方案

柱 A 和柱 C 的柱脚通过螺栓固定在钢梁底座上。试件在水平方向通过高强螺杆与 A 字形反力架相连,连接位置分别位于框架梁外伸端和边柱上层柱距框架梁顶面 450 mm 处。通过液压千斤顶在

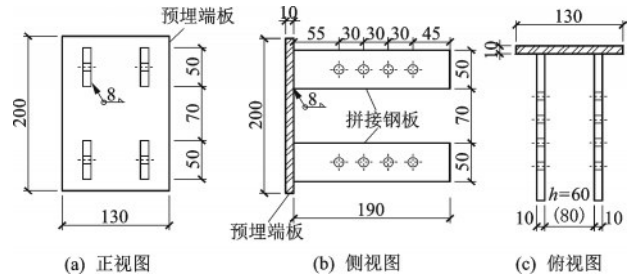


图 3 拼接钢板示意

Fig.3 Schematic diagram of the splicing steel plates

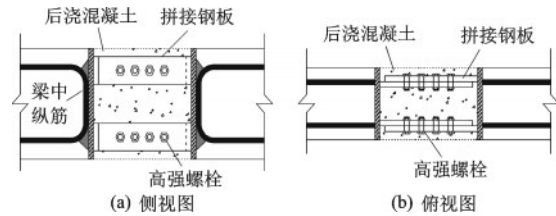


图 4 拼接节点示意

Fig.4 Schematic diagram of the splicing joints

两边柱的顶部施加轴向压力,轴压比取 0.5。参照原型结构并根据相似关系得到作用于试件框架梁上的线荷载为 10.0 kN/m,试验中将线荷载等效为分布于框架梁上的 6 份大小相同的集中荷载;集中荷载利用悬挂钢配重的方式施加,钢板配重分别悬挂于每跨框架梁的 4 分点处。悬挂钢配重前,在中柱 B 的下方设置临时钢支撑。当试件的跨度依次为 2 300、2 600、2 900 mm 时,施加在框架梁上的钢配重总重依次取 24.0、27.0、30.0 kN。试验开始时,用小钢梁撞击柱 B 下的临时钢支撑使其快速脱离试件,以达到模拟中柱突然失效的目的。试件的安装如图 5 所示。

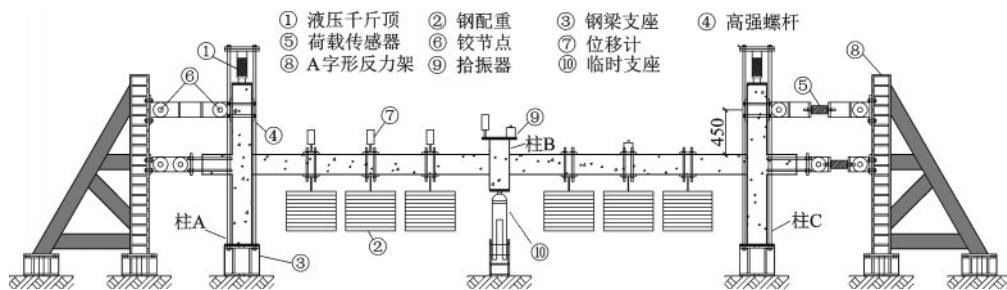


图 5 试件安装

Fig.5 Diagram of specimen assembly

1.3 测试方案

在试件的中柱以及框架梁上布置位移计以测量试件的动态位移响应;在中柱 B 及框架梁跨中位

置布置拾振器以测量结构的加速度、速度等动态响应。此外,在框架梁端顶部纵向钢筋上布置应变测点 LR1 和 LR2(图 2)以测量钢筋的动态应变;在抽柱前、后均采用敲击法测量试件的频率、周期和阻

尼比等动力特性。

2 主要试验结果及分析

2.1 试验现象

拆除柱B下的临时支撑后,试件均产生了较为明显的竖向振动。振动停止后,在各试件的框架梁端均观测到少量裂缝,裂缝主要集中于靠近中柱B的梁端下部以及靠近边柱的梁端上部;此外,在装配式框架拼接节点的后浇混凝土区域也有少量裂缝产生。与S3相比,由于在试件S6梁柱节段的框架梁中施加了预应力,框架梁上的裂缝较少且缝宽较小。抽除中柱后,核心试件S3的受力形态如图6所示。



图6 抽柱后试件S3受力形态

Fig.6 Mechanical pattern of the specimen S3 after column demolition

2.2 动态位移响应

各试件中柱处的动态位移时程曲线如图7所示。分别用 $\Delta_{d,max}$ 和 Δ_s 表示抽柱后中柱在振动过程中产生的最大竖向动态位移和振动停止后的静态位移,将 $\Delta_{d,max}$ 和 Δ_s 的比值定义为位移动力增大系数 DIF_Δ ,各试件的主要动态位移响应见表3。由表可知:(1)对于同一跨度的框架结构来说,试件S1中柱处的最大动态位移约为S3的68.0%,振动停止后的静态位移约为试件S3的53.1%,这说明现浇混凝土框架在倒塌荷载作用下的动态位移响应小于装配式框架结构。(2)在跨度、拼接节点位置相同的情况下,试件S6中柱处的 $\Delta_{d,max}$ 和 Δ_s 均明显小于试件S3,可见在各梁柱节段的框架梁中施加预应力有利于减小结构的动态位移响应;试件S6的 DIF_Δ 值大于S3,说明在梁柱节段中施加预应力后

装配式框架结构承受的倒塌荷载冲击作用更为显著。(3)与试件S3相比,由于拼接节点位置不同,试件S5中柱处的 $\Delta_{d,max}$ 和位移增大系数 DIF_Δ 均大于S3,这表明拼接节点位置靠近框架柱会增大框架结构的倒塌响应。(4)对比试件S2~S4可知,在相同的倒塌设计荷载作用下,随着跨高比的增大,试件的 $\Delta_{d,max}$ 和 Δ_s 均呈递增趋势;倒塌荷载对跨度较小的试件S2的动态冲击作用较试件S3和S4更为明显。

表3 动态位移响应

Table 3 Dynamic displacement responses

试件	$\Delta_{d,max}/mm$	Δ_s/mm	DIF_Δ
S1	17.9	12.7	1.41
S2	16.2	12.7	1.27
S3	26.3	23.9	1.02
S4	63.6	60.0	1.06
S5	31.5	22.7	1.39
S6	17.4	13.1	1.33

2.3 钢筋动态应变响应

框架梁端上部纵向钢筋的应变测点LR1和LR2处的应变时程曲线如图8所示。由图可知:(1)抽柱后与边柱相邻的框架梁端的上部纵向钢筋受拉,与中柱相邻的梁端上部纵向钢筋受压;(2)在整个振动过程中测点LR1处的拉应变明显大于LR2处的压应变;(3)对比S3和S6可知,在框架梁的跨度及拼接节点位置相同的情况下,预应力的存在能够显著降低梁端纵筋LR1和LR2处的应变值。

用 ϵ_{max} 表示抽柱后测点LR1处的最大应变值, ϵ_s 表示振动停止后的静态应变,将 ϵ_{max} 与 ϵ_s 的比值定义为钢筋应变动力增大系数 DIF_ϵ 。各试件在测点LR1处的 ϵ_{max} 、 ϵ_s 和 DIF_ϵ 见表4,由表可知,(1)在跨度相同的情况下,LR1处的最大动态应变响应 ϵ_{max} 由大到小依次为S1、S5、S3和S6;梁柱节段的框架梁中施加预应力将明显降低梁端纵向钢筋的最大应变。(2)试件的 DIF_ϵ 值由大到小依次是S1、S6、S5和S3,说明倒塌荷载对现浇框架试件和预应力装配式框架试件的动力冲击作用更为明显;随着各预制节段的拼接节点向边柱靠近,倒塌荷载对结构的动力冲击作用也随之增大。(3)对比S2、S3和S4可

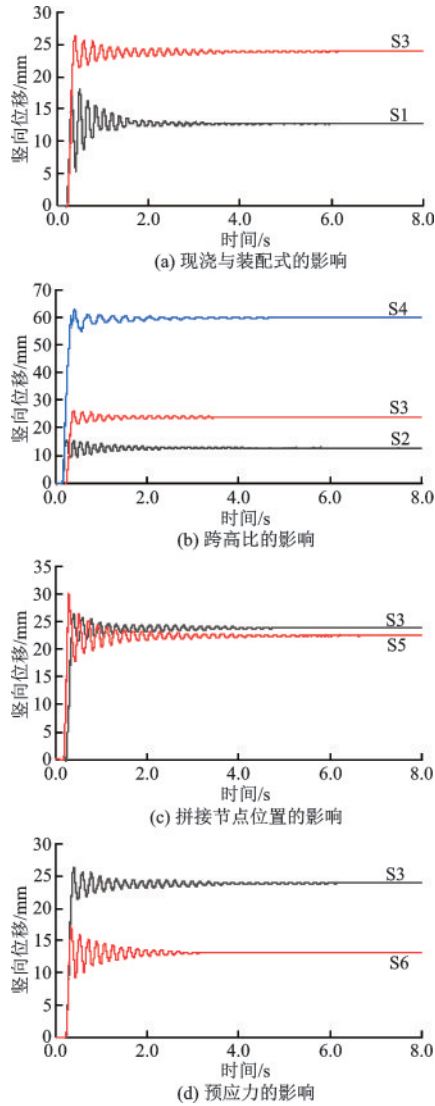


图7 中柱处竖向位移时程曲线

Fig.7 Time history curves of vertical displacement at the middle column

知:随着跨高比的增加, DIF_{ϵ} 呈降低趋势, 即随跨高比的增加倒塌荷载对结构的动力冲击作用呈降低趋势。(4) 钢筋的动态应变增大系数 DIF_{ϵ} 均大于相应试件的位移增大系数 DIF_{Δ} 。

表4 LR1处的钢筋动态应变响应

Table 4 Dynamic strain responses of reinforcing bars at LR1

试件	$\epsilon_{\max} \times 10^{-6}$	$\epsilon_s \times 10^{-6}$	DIF
S1	1 650	876	1.88
S2	1 876	1 327	1.41
S3	1 367	1 157	1.18
S4	2 018	1 710	1.18
S5	1 392	942	1.48
S6	909	560	1.62

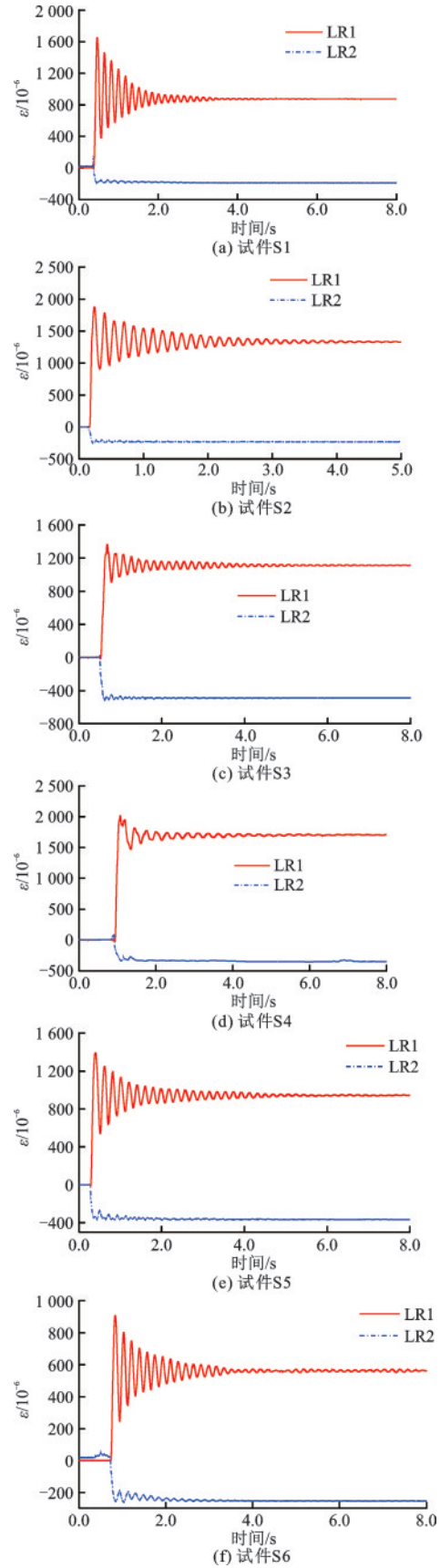


图8 纵向钢筋应变时程曲线

Fig.8 Time history curves of strain in the longitudinal reinforcing bars

2.4 加速度响应

各试件中柱处的竖向加速度时程曲线如图9所示,其中加速度向上为正。由于S4的试验数据不理想,图9中未列出其加速度时程曲线。各试件的最大加速度见表5。根据图9和表5可知:(1)试件S5的负向加速度约为试件S3的2.45倍,即拼接节点位置越靠近梁柱节点,中柱失效时荷载对试件的冲击作用将越大,这与中柱位移和钢筋应变响应的规律一致;(2)试件S6的负向加速度约为S3的1.13倍,说明对框架梁施加预应力后倒塌荷载对结构的冲击作用有所增强;(3)在跨度和设计荷载相同的情况下,装配式试件S3的正、负两个方向的最大加速度均明显小于现浇试件S1,倒塌荷载对现浇混凝土结构的动力冲击作用更明显。

表5 中柱加速度特性

Table 5 Characteristic values of acceleration at the middle column 单位:g

试件	正向最大值	负向最大值
S1	2.43	-2.98
S2	1.52	-2.33
S3	1.26	-1.52
S5	2.34	-3.72
S6	1.19	-1.71

2.5 动力特性

表6列出了通过敲击法测得的试件在拆柱前、后的基频和阻尼比,由表可见:(1)抽柱前装配式构件S3的基频与现浇构件S1相差不大,说明两者的整体初始刚度无明显差别;抽柱后,装配式框架结构的基频下降更为明显,表明装配式框架产生的结构损伤更为显著。(2)在框架梁跨高比相同的情况下,拼装节点的位置和梁内预应力对抽柱后装配式框架结构的阻尼比影响明显。

3 结论

(1)抽柱过程结束后,6个框架子结构均发生了不同程度的损伤,主要表现为在靠近柱的梁端和拼接节点后浇混凝土区域产生了少量裂缝;抽柱后所有试件的基频均降低,拼接节点位置和预应力对装配式框架结构的阻尼比影响明显。

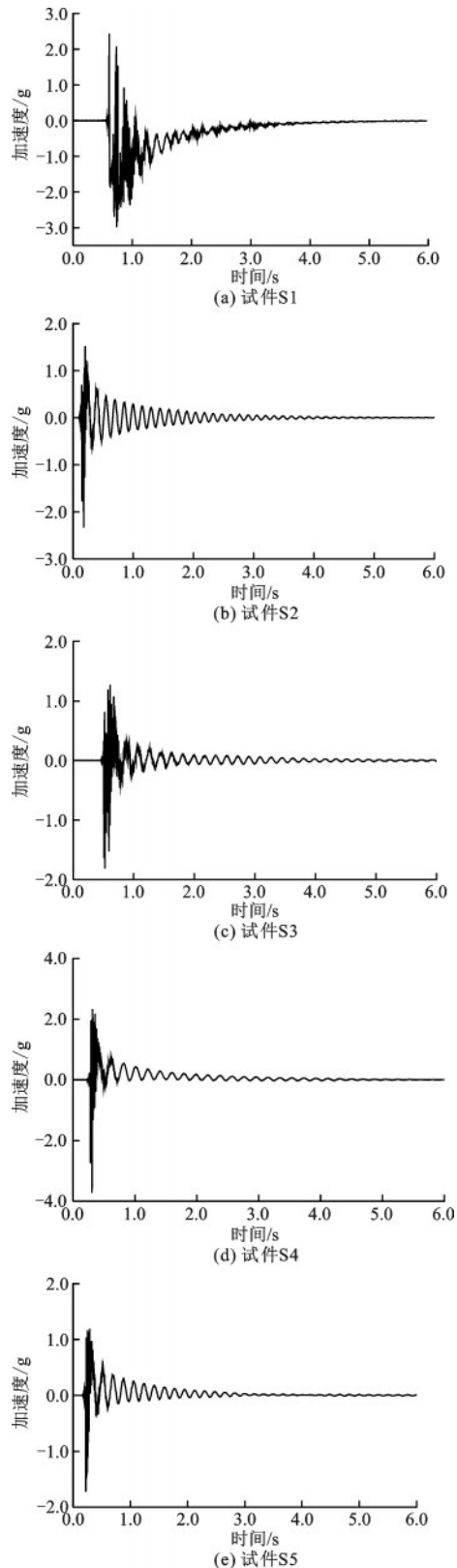


图9 竖向加速度时间曲线

Fig.9 Time history curves of vertical acceleration

(2)在跨度相同的情况下,现浇混凝土框架在倒塌荷载作用下的最大动态位移响应小于装配式

表6 试件基频和阻尼比

Table 6 Fundamental frequency and damping ratios of the specimens

试件	基频/ Hz		阻尼比	
	抽柱前	抽柱后	抽柱前	抽柱后
S1	15.4	7.0	0.014	0.016
S2	20.6	7.0	0.012	0.015
S3	16.8	5.9	0.008	0.014
S4	16.6	3.9	0.011	0.020
S5	17.8	5.4	0.011	0.031
S6	18.3	6.2	0.011	0.031

框架结构;在预制节段的框架梁中施加预应力将增强倒塌荷载对结构的动力冲击作用,但结构的动态位移和边柱梁端的钢筋应变等动态响应反而有所减少。

(3) 与现浇混凝土框架相比,抽柱后装配式框架结构的频率下降更为明显,这表明中柱失效时装配式框架产生的结构损伤更大;当各预制节段的拼接节点位置向框架柱靠近时,中柱失效情况下倒塌荷载对框架试件的冲击作用将增大。

(4) 对于所研究的装配式框架试件,位移动力增大系数 DIF_{Δ} 不大于 1.39,钢筋应变动力增大系数 DIF_{ϵ} 不大于 1.62,且 DIF_{Δ} 一般情况下小于 DIF_{ϵ} 。在进行静力倒塌分析时,上述系数可为装配式混凝土框架结构倒塌荷载动力增大系数的取值提供参考。

参考文献:

- [1] 李忠献,张雪松,丁阳. 装配整体式型钢混凝土框架节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(4): 32-38.
- Li Z X, Zhang X S, Ding Y. Seismic behavior of joints of prefabricated steel reinforced concrete integral frame [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 32-38. (in Chinese)
- [2] Parastesh H, Hajirasouliha I, Ramezani R. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation [J]. Engineering Structures, 2014, 70: 144-157.
- [3] 程蓓,苗小燕,徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 94-98.
- Cheng B, Miao X Y, Xu J W. Experimental study on a new type of column-to-beam joints in assembled reinforced concrete frame structures [J]. Industrial Construction, 2015, 45(12): 94-98. (in Chinese)
- [4] 付焕昌,吴从晓,张玉凤,等. 预制装配式混凝土框架结构金属消能减震连接体系抗震性能分析研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(1): 89-98.
- Fu H C, Wu C X, Zhang Y F, et al. Seismic performance study on connection system of prefabricated concrete structure with metallic damper [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(1): 89-98. (in Chinese)
- [5] 柳炳康,张瑜中,晋哲锋,等. 预压装配式预应力混凝土框架接合部抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 60-65, 116.
- Liu B K, Zhang Y Z, Jin Z F, et al. Experimental study on seismic behavior of prestressed fabricated PC frame connections [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 60-65, 116. (in Chinese)
- [6] 韩春,李青宁,姜维山,等. 装配式预应力混凝土梁与高强钢筋约束混凝土柱连接节点抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 248-254.
- Han C, Li Q N, Jiang W S, et al. Tests for aseismic behavior of prestressed fabricated precast concrete beam-column joints subjected to cyclic loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 248-254. (in Chinese)
- [7] 王洪林,柳炳康,黄慎江,等. 两层两跨预压装配式混凝土框架整体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(增2): 145-149.
- Wang H L, Liu B K, Huang S J, et al. Experimental study of seismic performance of two floor double-span prestressed fabricated concrete frame [J]. Building Structure, 2011, 41(Sup2): 145-149. (in Chinese)
- [8] 杨涛,陆艺. 建筑结构连续倒塌性能研究进展[J]. 力学与实践, 2016, 38(6): 612-618.
- Yang T, Lu Y. Research advances of progressive collapse of building structures [J]. Mechanics in Engineering, 2016, 38(6): 612-618. (in Chinese)
- [9] Yang T, Han Z Q, Deng N C, et al. Collapse Responses of concrete frames reinforced with bfrp bars in middle column removal scenario [J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4436.
- [10] Yang T, Chen W Q, Han Z Q. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete

- frames after the loss of middle column[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(5): 8219712.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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): 162-170.
- Pan Y, Chen X H, Yao Y Y, et al. 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)
- [14] 周云, 陈太平, 裴熠麟, 等. 全装配式混凝土框架结构抗连续倒塌破坏机理研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39(5): 40-51.
- Zhou Y, Chen T P, Pei Y L, et al. Failure mode research of fully assembled precast concrete frame structure under progressive collapse test[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(5): 40-51. (in Chinese)
- [15] 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): 46-56.
- Yuan X J, Li Y, Lu X Z, et al. Static progressive collapse test on prefabricated concrete frames with wet connections[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(12): 46-56. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)



(上接第 68 页)

- [16] 史晓军, 陈隽, 李杰. 层状双向剪切模型箱的设计及振动台试验验证[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(2): 254-261.
- Shi X J, Chen J, Li J. Design and verification of dual-direction shear laminar box for shaking table test[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(2): 254-261. (in Chinese)
- [17] 郝敏, 谢礼立, 李伟. 基于砌体结构破坏损伤的地震烈度物理标准研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(5): 27-32.
- Hao M, Xie L L, Li W. Study on physical measure of seismic intensity based on damage to masonry structures [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(5): 27-32. (in Chinese)
- [18] Riddell R, Eeri A M. On ground motion intensity indices [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 147-173.
- [19] Akkar S, Özen Ö. Effect of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2005, 34(13): 1551-1571.
- [20] Neumann F. A broad formula for estimating earthquake forces on oscillators [C] // *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo: Science Council of Japan, 1960: 849-862.
- [21] Harp E L, Wilson R C. Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: evidence from the whittier narrows and superstition hills earthquake strong motion records [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85(6): 1739-1757.
- [22] Arias A. A measure of earthquake intensity [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press, 1970.
- [23] Housner G W. Spectrum intensities of strong motion earthquakes [C] // *Proceedings of 1952 Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures*. Los Angeles: Earthquake Engineering Research Institute, 1952: 20-36.
- [24] Rathje E M, Faraj F, Russell S, et al. Empirical relationships for frequency content parameters of earthquake ground motions [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(1): 119-144.