

# 预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能试验研究

柳炳康, 宋满荣, 蒋亚琼, 黄慎江, 周 安  
(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:**对一榀二跨二层预应力装配式混凝土框架进行了拟动力和拟静力试验,采用不同加速度峰值的 El Centro 地震波激励加载,并以拟动力试验的屈服位移为加载起点施加低周反复荷载,得到了不同加载工况下框架时程曲线、恢复力-位移滞回曲线。研究了预应力混凝土装配整体式框架的破坏机制、变形性能、刚度退化及耗能能力等抗震性能。研究表明:试验框架梁端率先出现塑性铰,节点核心区有着较强的刚性,提高了框架整体抗侧刚度,在层间位移角达到 1/42 时,框架梁、柱未产生较严重破坏。采用分析程序 DRAIN-2DX 对模型结构进行弹塑性动力分析,有限元计算位移值略小于实测位移值。

**关键词:**预应力装配式框架;拟动力试验;拟静力试验;抗震性能

**中图分类号:**TU378.4 TU317.1 **文献标志码:**A

## Experimental study on seismic performance of post-tensioned precast prestressed concrete frame

LIU Bingkang, SONG Manrong, JIANG Yaqiong, HUANG Shenjiang, ZHOU An  
(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Pseudo-dynamic and pseudo-static test were conducted on tow storey double-span post-tensioned precast prestressed concrete model frame. The frame was first subjected different peak acceleration based on the El Centro ground motion, and then subjected to cyclic loading at starting point of yield displacement. The displacement-history curves and hysteresis curves of restoring force-displacement of experiment under different load condition were recorded and analyzed. The main parameters investigated were the failure mechanism, deformation properties, rigidity degradation and energy dissipation capacity of the frame under seismic action. The results indicate that the plastic hinge first appeared at the end of beam and post-tensioned prestressed beam have strong deformation recovery capabilities. The connections of frame on bi-direction compression enhanced joint stiffness to improve the frame lateral rigidity. The beam and column do not result in more serious damage at story drifts of 1/42. The results obtained from analysis using DRAIN-2DX are compared with the test results, indicating that the displacement of the analytical models is lower than that of the test structure.

**Keywords:** prestressed fabricated frame; pseudo-dynamic test; pseudo-static test; seismic performance

基金项目:国家自然科学基金项目(50778060)。

作者简介:柳炳康(1952—),男,安徽凤阳人,教授。E-mail:liubingkang@hfut.edu.cn

收稿日期:2009年8月

# 0 引言

预制装配式结构可以提高机械化水平,加快施工进度,降低劳动强度,有利于环境保护。由于装配式结构节点连接可靠性差,难以满足地震作用下的受力要求,在地震区的使用受到限制。国内外关于预制装配式混凝土结构的研究主要集中在构件节点连接方式、接合部受力性能以及不同连接方式下装配式结构的整体抗震性能方面。

连接方式是预制装配式混凝土结构的核心技术,预制混凝土结构的试验研究和震害调查表明,只要预制构件的接合部位有可靠的连接,则预制混凝土结构有良好的抗震性能<sup>[1-3]</sup>。为改善预制装配式结构接合部抗震性能,探索新的节点连接方式,已有研究提出了预制构件接合部穿连并张拉预应力筋的连接方式。美国学者 Brad 等进行了9层预应力装配式双肢剪力墙体系拟动力试验<sup>[4]</sup>,双肢剪力墙由两片预制墙体通过预制联系梁装配而成,每层连梁截面中部和剪力墙相应位置预留孔道穿连后张拉预应力筋,实施预应力张拉连为整体;通过试验了解了不同连梁宽度和预应力筋面积对连接节点耗能能力的影响,并运用有限元程序 DRAIN-2DX 和 ABAQUS 对试件进行弹塑性动力分析。日本在20世纪90年代研究开发了预制装配式结构“压着工法”施工技术<sup>[5]</sup>,采用工厂生产的预制柱和预制预应力梁,运至现场安装就位后,在节点两侧梁端穿连预应力钢筋,实施张拉预压,形成预制预应力混凝土装配整体式结构。该技术已应用于日本横滨竞技场等20余栋建筑结构中。土耳其学者 Kaya 等采用后张法对预制梁、柱进行张拉连接,通过试验分析在不同的预应力水准下连接节点的强度衰减、刚度退化,并用三维解析模型的非线性有限元建模进行受力分析<sup>[6]</sup>。

作者前期已进行了预压装配式框架节点组合体和单层平面框架试验研究<sup>[7-8]</sup>,分析表明预压装配式框架节点具有良好的抗震性能,可应用于整体装配式框架中。在此基础上本文通过多层框架拟动力和拟静力试验研究和弹塑性动力分析,了解装配式多层框架结构体系的受力状态、延性特征和抗震性能,进一步探索预制装配式预应力框架结构设计方法。

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

试验框架为二跨二层预制装配式框架(KJ-3),框架梁、柱配筋及节点详图见图1。框架梁、柱试件在工地现场预制,养护至28d龄期,运至实验室进行

安装,框架安装就位后,将预应力筋穿过梁柱预留孔道,并将梁柱节点处拼装缝用环氧树脂水泥浆密封结硬后进行预应力筋张拉,张拉采用应力-应变双控,张拉应力通过油压表读数控制,同时校核预应力筋实际伸长值。预应力钢绞线的张拉控制应力  $\sigma_{con} = 0.75f_{pt}$  ( $f_{pt}$  为预应力钢筋抗拉强度标准值),锚具采用 OVM 单孔锚具。钢筋张拉完毕后实施孔道压力灌浆,当孔道灌浆达到28d龄期后进行试验加载。

在制作构件的同时,分批次制作了4组150mm×150mm×150mm的标准混凝土试块,并与框架梁柱构件在同等条件下进行养护。试件实测混凝土立方强度  $f_{cu,k} = 44.5\text{N/mm}^2$ ,轴心抗压强度  $f_{ck} = 29.78\text{N/mm}^2$ ,混凝土弹性模量  $E_c = 3.36 \times 10^4\text{N/mm}^2$ ;预应力钢筋每孔采用1束7Φ15低松弛钢绞线,预应力钢筋屈服强度  $f_{py} = 1811\text{N/mm}^2$ ,极限强度  $f_{pt} = 1974\text{N/mm}^2$ ,预应力钢筋弹性模量  $E_s = 1.95 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ,延伸率为5.0%,非预应力钢筋采用HRB335级热轧钢筋,箍筋采用HPB235级热轧钢筋。

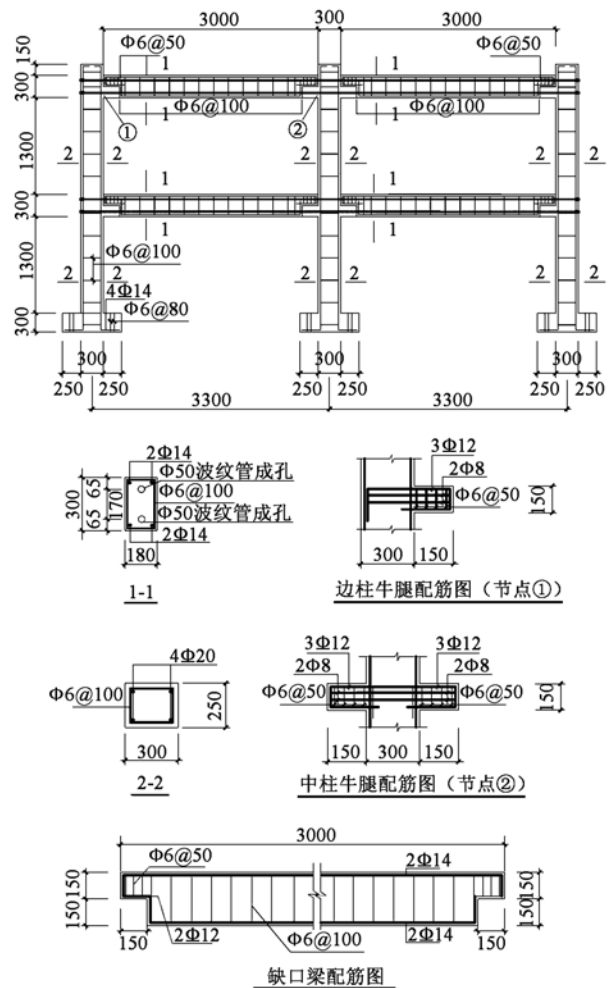
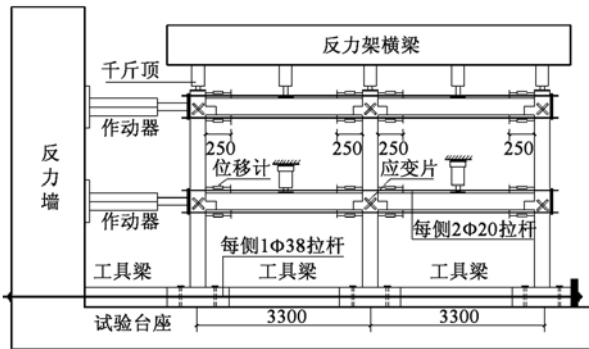


图1 试验框架(KJ-3)梁柱尺寸和配筋图  
Fig.1 Reinforcement details of precast beam and column of test frame(KJ-3)

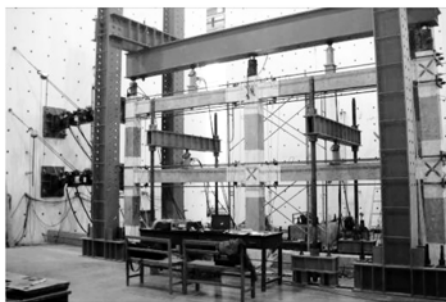
## 1.2 加载装置与加载方案

试验在合肥工业大学结构实验室 MTS 电液伺服加载系统上完成,试验加载装置见图 2。试验时将预应力装配式框架柱脚穿连螺栓固定于试验台座,柱脚间填放工具梁,再由 2 根  $\Phi 38$  精轧螺纹钢拉杆与反力墙拉结(图 2a),以平衡加载水平力,并防止柱脚移位。一层和二层梁端安放夹具,通过 4 根  $\Phi 20$  钢拉杆与作动器拉结(图 2a),以保证水平拉压反复荷载的有效传递。

框架横向水平力通过固定于反力墙的 2 台电液伺服作动器对框架分层施加。试验时首先在柱顶和梁跨中施加竖向荷载,并稳载,然后利用作动器对框架分层施加水平地震作用。柱竖向荷载通过安放在柱顶的 3 个千斤顶施加,由钢反力架横梁提供反力,柱轴压比为 0.2,每个柱顶作用的轴压力为 446.7kN。梁跨中竖向荷载由安放在梁上的 4 个千斤顶施加,每跨梁作用的竖向荷载为 80kN。试验加载现场照片见图 2b。



(a) 加载装置示意及测点布置



(b) 试验加载现场照片

图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test set-up

试验分为拟动力试验和拟静力试验两阶段<sup>[9]</sup>,先对框架进行水平加载拟动力试验,控制输入地震波强度使其处于弹性状态;然后再对框架进行水平反复加载推覆试验,采用位移控制加载。

通过框架弹塑性时程分析,地震波峰值加速度控制在 320gal 以内,框架顶点最大位移在 25mm 左右,框架即将进入屈服。拟动力试验加载地震波选

用 El Centro 波(1940NS)并取其前 10s 的地震记录,地震波峰值加速度分别取 110gal、220gal、320gal 三种试验工况。拟静力试验采用位移控制,以屈服位移为加载起点,二层和一层的加载位移比为 1.00/0.55,两层同步加载,每级荷载循环 3 次,保持相同时间间隔,每次加载稳载 2min 后采集数据。

## 1.3 测点布置及量测内容

试验主要测量以下几项内容:①采用梁端上下安置的位移传感器测量塑性铰区域的弯曲变形、梁端转角;②在梁的跨中布置了应变片用于测量张拉预应力筋时混凝土预压力及弹性阶段梁的应力变化;③在梁柱节点核心区布置应变仪,用于测量节点核心区混凝土应变。

拟动力试验数据由液压伺服器的数据采集系统采集;拟静力试验数据采集系统由传感器、数据采集仪和计算机组成,试验时可以连续测量和自动记录。

## 2 试验现象

### 2.1 拟动力试验

工况 1 地震波峰值加速度为 110gal,加载过程中框架二层顶部最大位移达 6.81mm,一、二层柱上没有出现可见裂缝,框架梁两端与柱面拼接处未见拉脱裂缝,卸载时结构变形完全恢复,框架处于弹性工作状态。

工况 2 地震波峰值加速度为 220gal,加载过程中框架二层顶部最大位移达 16.82mm,底层柱根部出现微裂缝,卸载后裂缝完全闭合。框架梁在跨中竖向荷载作用下,梁两端受到负弯矩的作用,正、反向水平加载产生的负弯矩与竖向荷载负弯矩叠加后,在一层梁端上部与柱面拼接处出现拉脱裂缝,裂缝宽度在 0.1~0.2mm 之间;一层梁端下部受压区牛腿和缺口梁出现水平向细小裂缝,卸载后由于预应力筋的作用,裂缝完全闭合。二层梁端上部受拉区未见拉脱裂缝,下部受压区未见微裂缝。框架仍处于弹性工作状态。

工况 3 地震波峰值加速度为 320gal,加载过程中框架二层顶部最大位移达 33.41mm,底层根部柱面出现可见裂缝,卸载后裂缝闭合。梁端在叠加的负弯矩作用下,一层梁端上部与柱面拼接处出现斜向微裂缝。卸载后由于预应力钢筋的预压作用,梁端裂缝闭合,其变形能够恢复;柱变形不能完全恢复,呈现塑性性能,框架尚未屈服。

### 2.2 拟静力试验

拟静力试验通过低周反复加载的方法来实现,试验框架在拟动力加载的最后循环已接近屈服,以屈服位移为加载起点,采用位移控制加载。框架水

平力通过作动器施加,框架顶点水平位移加至 25mm 时,荷载和位移曲线斜率大致呈直线变化,框架整体处于弹性工作阶段。框架顶点水平位移加至 35mm 左右时,一层柱底出现斜向微裂缝,卸载后裂缝闭合。在跨中竖向荷载和水平力共同作用下,一层框架梁端下部受压区出现平缓斜向裂缝,梁底局部混凝土保护层有剥落趋势,卸载后梁端裂缝不能完全闭合;一层梁端上部受拉区柱面处拉脱裂缝,宽度达 0.5~0.8mm,由于预应力筋的作用,卸载后裂缝可以闭合,框架进入弹塑性工作阶段。

框架顶点水平位移加至 60mm 时,框架柱出现拉脱裂缝,宽度在 0.2~0.4mm 之间,与裂缝相交的预应力筋接近屈服;一层梁端底部受压区牛腿和缺口梁出现水平向或斜向裂缝。二层梁端上部受拉区出现细小拉脱裂缝,下部受压区出现水平和斜向裂缝,卸载后不能完全闭合。随着施加在框架上的位移持续增大,一层框架梁端下部受压区混凝土达极限压应变,梁端受压区牛腿拼接处混凝土开始剥落,二层框架梁端下部受压区已出现水平状斜向裂缝并进一步扩展,裂缝宽度加大。由于预应力钢筋的预压作用,一、二层框架梁端上部受拉区拉脱裂缝卸载后均可闭合。框架顶点水平位移加至 70mm,因柱脚锚固螺栓处混凝土局部破坏未能继续加载至框架达到承载力极限状态。

框架一、二两层梁端和节点破坏状况见图 3,由图可见,框架梁在跨中竖向荷载和水平力的共同作用下,梁两端受到叠加的负弯矩作用,使得梁端上部受拉出现拉脱裂缝,梁端下部受压局部混凝土压坏。在水平力作用下,一层梁端的弯矩大于二层,加载过程中一层梁端损伤重于二层,一层框架梁端首先出

现塑性铰。框架节点在竖向轴压力和水平预应力力作用下处于双向受压状态,节点核心区未出现肉眼可见裂缝。预应力装配式框架可满足“强柱弱梁”、“强节点”的设计要求。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 框架时程曲线

将拟动力试验获得数据进行整理,得到框架一层、二层水平位移时程曲线(图 4)和一层、二层恢复力-位移滞回曲线(图 5)。

由于 El Centro 波在前 10s 的地震记录中峰值加速度出现在 2.12s、4.48s 前后,试验所得不同工况下框架位移时程曲线峰值出现在 2.28s、4.56s 附近,结构位移反应的最大值与输入地震波加速度的最大值不发生在同一时刻,位移峰值略滞后于加载峰值。这是由输入波的频谱特征与结构的自振周期决定的,只有当结构的自振周期与输入波的频谱接近时,其位移反应才会在相近时段达到最大值<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 拟动力滞回曲线

在 110gal、220gal 加载工况下,二层恢复力-位移滞回曲线呈直线分布(图 5a、5b),框架处于弹性工作状态,结构耗能很小。在 320gal 加载工况下,滞回曲线略有弯曲(图 5c),卸载后变形基本恢复,结构仍处于弹性工作阶段。

2 台电液伺服作动器对框架各层施加的为随机地震波,加载过程中控制二层位移,两者位移不同步,一层位移受到二层位移的制约,一层恢复力-位移滞回曲线较为零乱(图 5d~5f),但卸载后仍具有较强的变形恢复能力,说明框架处于弹性工作范围。

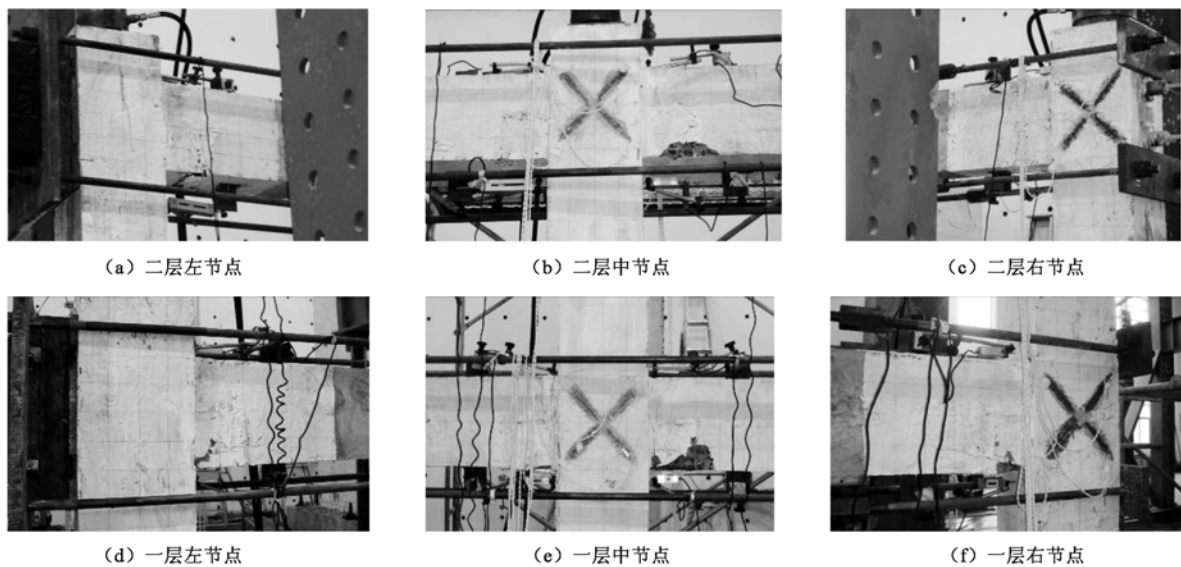


图 3 框架梁端和节点破坏状况

Fig. 3 Damaged of beam end and connection core area

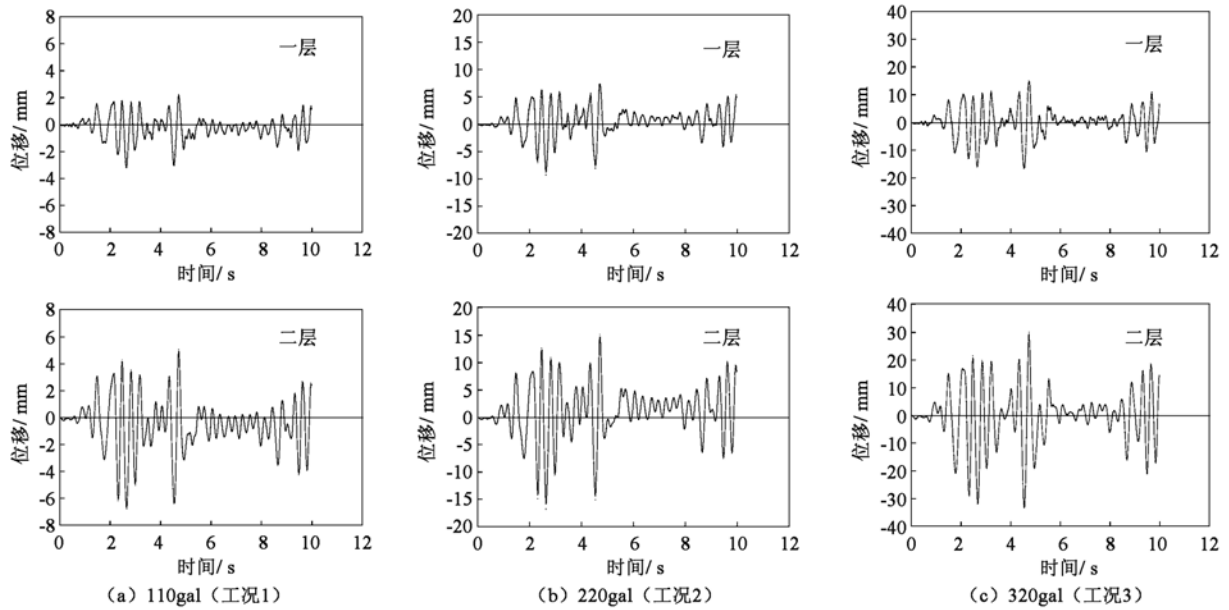


图4 部分试验工况位移时程曲线

Fig. 4 Displacement-history curves under experimental cases

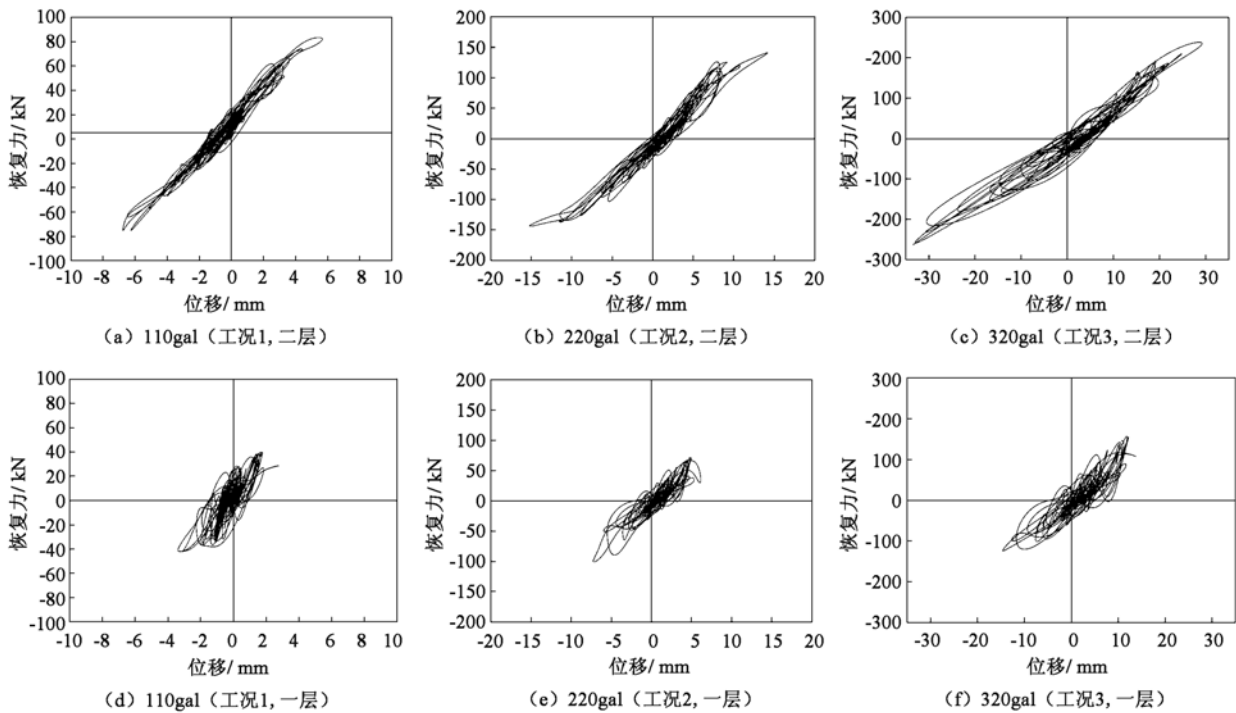


图5 部分试验工况恢复力-层位移曲线

Fig. 5 Curves of restoring force-displacement under experimental cases

在水平荷载作用下,结构变形主要发生在梁端接合部,构件的耗能能力与钢筋屈服变形发挥和截面损伤程度密切相关,框架梁端截面未配置普通钢筋屈服耗能,截面转动时仅靠预应力钢筋吸收地震能量,框架整体耗能能力较混合配筋的预应力结构差。由于梁端施加了预应力,构件具有很强的变形恢复能力,卸载后残余变形很小,截面损伤程度不大。

### 3.3 拟静力滞回曲线

对框架施加低周反复荷载,测得每级荷载下一

层和二层水平位移,可作出框架恢复力-位移滞回曲线(图6)。从图中可以看出滞回环较丰满,说明预应力装配式框架具有良好的耗能能力。滞回曲线呈捏拢状,是因为框架在加载过程中,梁端率先出现塑性铰,柱刚度尚未出现明显的退化,由于预应力钢筋具有较强的恢复变形能力,卸载后梁的变形基本恢复,残余变形不大,滞回曲线向原点靠拢。

加载的前几个循环曲线呈线性变化,框架开裂后曲线偏离原来的直线状态,倒向变形轴,呈曲线

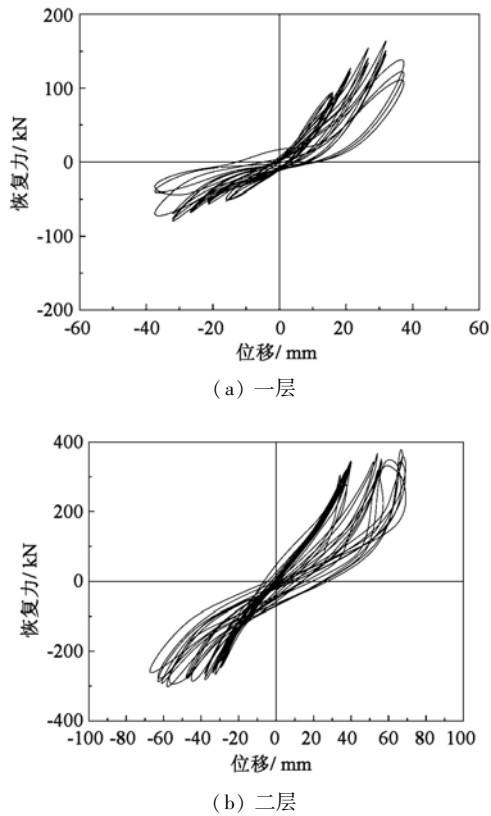


图6 框架恢复力-位移关系曲线  
Fig. 6 Restoring force-displacement curves of frame

形。每次加载过程中,曲线的斜率随荷载的增大而减小,且减小的程度逐渐加快,说明反复荷载作用下框架梁的刚度不断退化。比较各次卸载曲线,初始加载时曲线陡峭,恢复变形很小,荷载减小后曲线趋向平缓,出现变形恢复滞后现象。曲线斜率随反复卸载次数增大而减小,表明框架卸载刚度不断退化。

### 3.4 变形能力

拟动力试验过程中,可得不同工况下框架各层位移和各层施加的作用力,进而可求得框架层间位移、层间剪力和层间位移角(表1)。表中数据均取其最大值,但不一定在同一时刻出现<sup>[11]</sup>。220gal 工况下最大层间位移角为 1/173,满足小震不坏的要求;320gal 工况下最大层间位移角为 1/86,说明试件已呈现塑性性质,满足中震可修的要求。

表1 不同工况下框架层间位移、层间转角和层间刚度

Table 1 Story displacement, drifts and rigidity of frame under experimental cases

加载 工况	加载 方向	一层		二层		层间剪力 V/kN		层间刚度 K/kN·mm <sup>-1</sup>	
		层间位移/mm	层间位移角	层间位移/mm	层间位移角	一层	二层	一层	二层
110gal	正向	3.07	1/505	3.00	1/552	115.4	75.1	37.60	25.03
	反向	3.48	1/460	3.33	1/480	122.2	79.6	35.11	23.90
220gal	正向	6.33	1/253	8.90	1/180	233.0	148.2	36.80	16.65
	反向	7.56	1/212	9.26	1/173	255.5	151.0	33.79	16.31
320gal	正向	15.22	1/105	14.77	1/108	382.4	242.1	25.12	16.39
	反向	14.81	1/108	18.60	1/86	412.6	294.5	27.86	15.83

图7为峰值加速度与层最大位移关系曲线,在110gal、220gal 工况时,输入的峰值加速度与层最大位移成线性关系;在320gal 工况时,位移变化幅度比输入的峰值加速度变化幅度要快一些,表明试件已呈现塑性状态。

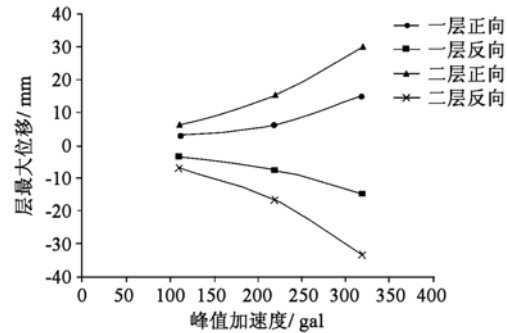


图7 层最大位移-峰值加速度关系曲线  
Fig. 7 Curves of displacement-peak acceleration

试验过程中可得不同工况下框架层间位移和层间剪力,用层间剪力除以层间位移,可计算出框架层间割线刚度。由层间刚度-峰值加速度关系曲线(图8)可以看出,随着输入加速度峰值的增大,框架开裂、损伤,层间刚度逐步退化。加载至峰值加速度320gal 时,层间刚度约为加载至110gal 时的70%左右。在一、二层柱高、柱截面相同的情况下,由于一层框架柱底部受到嵌固作用,框架底层刚度大于二层刚度,框架底层刚度约为二层刚度的1.5倍。

加载至峰值加速度320gal 时,框架底层柱出现可见裂缝,卸载后裂缝仍能闭合。梁柱节点处于双

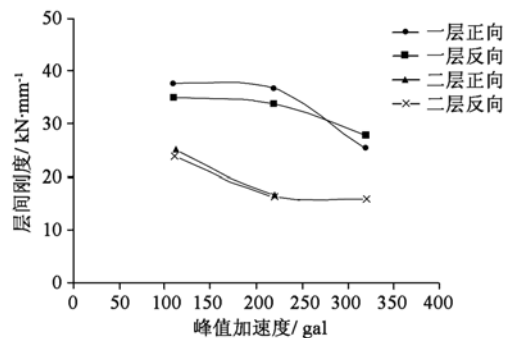


图8 层间刚度-峰值加速度关系曲线  
Fig. 8 Curves of rigidity-peak acceleration

向受压状态,节点核心区未见细微裂缝,处于弹性工作状态。框架梁跨中已预加竖向荷载,梁两端在叠加的负弯矩作用下,梁端底部受压区混凝土局部开裂,导致框架整体刚度有所下降。由于预应力的存在,卸载后梁的残余变形很小。

### 3.5 延性

拟静力试验过程中,可实测框架各层屈服位移和极限位移,进而求得框架层间位移、层间位移角和延性系数。位移延性系数 $\mu_{\Delta}$ 是指在保持结构或构件的基本承载力的情况下,最大位移 $\Delta_u$ 和屈服位移 $\Delta_y$ 的比值。由于框架加载至顶点位移70mm时,柱脚锚固螺栓处混凝土局部破坏,未能继续加载至框架梁、柱达到极限状态,计算位移延性系数时,极限变形 $D_u$ 取加载后期最大位移;屈服位移采用能量等值法确定。试验实测的框架正、反向加载位移延性系数分别为2.15、2.36(表2),该延性系数对应的框架破坏状态见图3。构件的延性性能与截面损伤程度相关,若能加载至框架梁、柱达到极限状态,延性系数将大于此值。

加载后期一、二层层间最大位移角分别为1/42、1/50(表2),基本满足GB 50011—2008《建筑抗震设计规范》<sup>[12]</sup>罕遇地震作用下层间弹塑性位移角限值,而此时框架梁、柱未达到极限状态,构件损失亦不严重,说明预应力装配式结构具有良好的抗震性能。

## 4 预应力装配式框架地震反应分析

### 4.1 分析模型

为了进一步了解预应力装配式框架的地震反应

特性,从承载力和变形两个方面判断其抗震性能,采用平面结构弹塑性动力分析程序DRAIN-2DX,对预应力装配式框架进行弹塑性时程分析。

选用DRAIN-2DX程序中纤维(条带)梁-柱单元(fiber beam-column element)建立分析模型,模拟试验框架的受力过程。该单元可以用来模拟具有非线性不规则截面的钢筋混凝土梁柱构件。单元模型及条带(fiber)组合如图9a所示,每个单元内的变形部分可以分成若干个节段(segment),每个节段内的横截面材料特性不变,由该节段中心切片(slice)的截面特性控制,每个节段之间可以有不同的材料特性。

为了确定截面的力学性能,需给每个条带赋予材料的单轴应力-应变关系、条带面积、条带中心距离等参数。钢筋本构模型见图9b,钢筋材性在程序中默认拉、压应力-应变关系相同,由多折线定义,纵坐标 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 分别对应钢筋比例应力、屈服应力、强化应力。混凝土的本构模型见图9c,计算程序中仅考虑“只压”混凝土应力-应变关系,也由多折线定义,纵坐标 $S_{1c}$ 、 $S_{2c}$ 、 $S_{3c}$ 分别对应混凝土弹性应力、极限应力、残余应力。卸载系数在0~1.0变化,0代表按初始刚度卸载,1.0代表向原点卸载。

### 4.2 计算结果

为方便与试验比较,选取与试验相同的El Centro波,将峰值加速度调整为110gal、220gal和320gal,截取地震波前10s作为输入数据,计算时步长取0.02s。对模型结构进行弹塑性动力分析,不同工况下框架计算位移时程曲线见图10,位移计算值见表3。

不同工况下框架位移计算值与实测值比较见表

表2 框架各层位移与层间位移角

Table 2 Displacements and ductile factors of frame

楼层	加载方向	楼层屈服位移 $\Delta_y$ /mm	楼层最大位移 $\Delta_u$ /mm	位移延性系数 $\mu_{\Delta}$	层间屈服位移 /mm	层间屈服 位移角	层间最大位移 /mm	层间最大 位移角
一层	正向	22.3	38.0	—	22.3	1/72	38.0	1/42
	反向	19.8	38.0	—	19.8	1/81	38.0	1/42
二层	正向	32.5	70.0	2.15	10.2	1/157	32.0	1/50
	反向	29.7	70.0	2.36	9.9	1/162	32.0	1/50

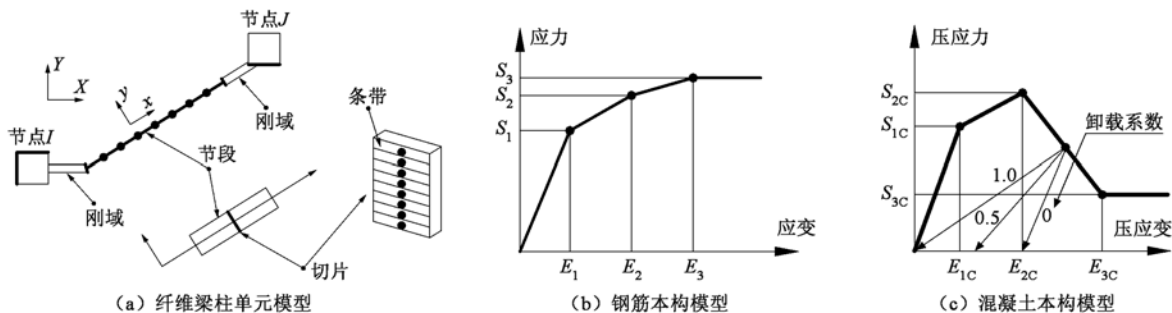


图9 单元模型和材料本构关系

Fig.9 Element model and constitutive relations of materials

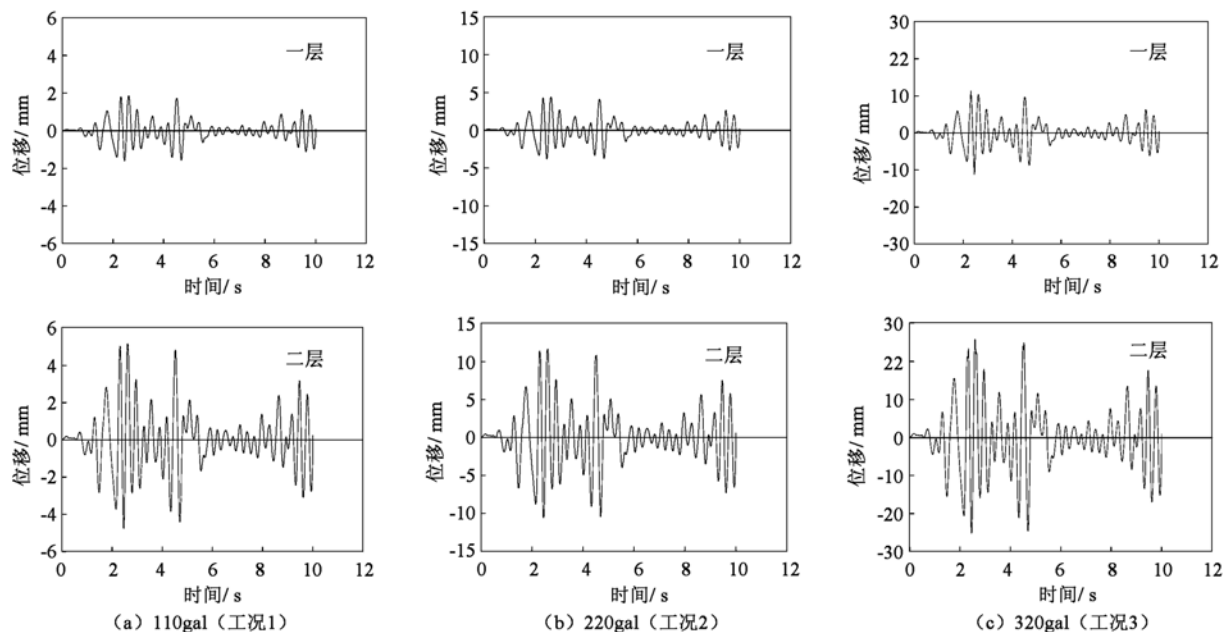


图 10 部分工况计算位移时程曲线

Fig. 10 Displacement-time history curves of calculation under loading conditions

表 3 不同工况下框架位移计算值与实测值比较

Table 3 Comparison displacement between calculation and experiment on different cases

加载 工况	加载 方向	一层			二层		
		$\Delta_{uc} /$ mm	$\Delta_{uc} /$ mm	$\Delta_{uc} / \Delta_{uc}$	$\Delta_{uc} /$ mm	$\Delta_{uc} /$ mm	$\Delta_{uc} / \Delta_{uc}$
110gal	正向	1.84	3.07	0.60	5.25	6.07	0.86
	反向	1.73	3.48	0.50	4.94	6.81	0.73
220gal	正向	4.34	6.33	0.69	11.90	15.23	0.78
	反向	4.05	7.56	0.54	10.71	16.82	0.64
320gal	正向	12.27	15.22	0.81	27.02	29.99	0.90
	反向	12.70	14.81	0.86	25.61	33.41	0.77

注:  $\Delta_{uc}$ 、 $\Delta_{uc}$  分别为计算值和实测值。

3,两者存在差异。在相同工况下,动力分析软件计算位移值比试验位移值小,这主要是因为计算模型的误差和混凝土材料的离散性。另外,在加载前期,由于试件制作和安装精度不够,试件和加载装置之间存在缝隙,位移实测值偏大。在加载后期,梁端上部与柱面拼接处出现拉脱裂缝,梁端底部受压区牛腿和缺口梁端出现细小裂缝,柱底出现水平向或斜向微裂缝,卸载后柱变形基本恢复,计算模型中未能考虑上述因素。

## 5 结论

通过一榀二层二跨预应力混凝土装配式框架拟动力试验研究,分析了预应力混凝土装配式框架的破坏机制、变形能力、刚度退化等抗震性能,得到以下结论:

(1)在竖向和水平力的共同作用下,框架梁端在

叠加的负弯矩作用下率先出现塑性铰,梁端接合部上部受拉区与柱面拼接处出现拉脱裂缝,预应力钢筋屈服;下部受压区牛腿拼接处出现水平和斜向裂缝,混凝土压坏,预应力装配式框架可实现“强柱弱梁”的破坏模式。

(2)框架梁柱节点在轴压力和预应力作用下,处于双向受压状态,增强了节点核心区刚度,节点区域未见细微裂缝,处于弹性工作状态。预应力装配式框架可满足“强节点”的设计要求。

(3)试验框架在加载过程中刚度不断退化,由于预应力钢筋的存在,框架梁具有很强的变形恢复能力,卸载后残余变形很小,框架梁的良好变形恢复性能和节点刚性制约了柱的变形,提高了框架整体抗侧刚度。

(4)框架层间位移角达到 1/42 时,节点核心区基本完好,柱未见明显损伤,框架梁没有产生较严重破坏,表明预应力装配式框架具有良好变形能力和抗倒塌能力。

(5)采用分析程序 DRAIN-2DX 对模型结构进行弹塑性动力分析,并与试验结果进行了比较,两者存在差异,计算模型和参数选取有待改进。

## 参 考 文 献

- [1] 范力,吕西林,赵斌. 预制混凝土框架结构抗震性能研究综述[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 90-97. (FAN Li, LU Xilin, ZHAO Bin. Summary of investigation on seismic behavior of precast concrete frame structures[J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 90-97. (in Chinese))
- [2] 种迅,孟少平,潘其健,等. 部分无黏结预制预应力混



- 凝土框架及其节点抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(4): 56-60. (CHONG Xun, MENG Shaoping, PAN Qijian, et al. Research on seismic behavior of partially unbonded precast prestressed concrete frames and beam-column subassemblies [J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 27(4): 56-60. (in Chinese))
- [3] Brian G Morgen, Yahya C Kurama. Seismic design of friction-damped precast concrete frame structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007, 133(11): 1501-1511.
- [4] Brad D Weldon, Yahya C Kurama. Coupling of concrete walls using post-tensioned precast concrete beams [DB/OL]. [2006-10-01]. <http://www.ascelibrary.org>
- [5] 张瑜中, 藤本一郎. PCプレストレストコンクリートのPC压着工法 システムによる二次応力と歪みについての研究 [C] // 日本建築学会大会学術講演梗概集. 东京: 日本建築学会, 1995.
- [6] Kaya M, Arslan A. Analytical modeling of post-tensioned precast beam-to-column connections [J]. Materials and Design, 2009(30): 3802-3811.
- [7] 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. (LIU Bingkang, ZHANG Yuzhong, JIN Zhefeng, et al. Experimental study on seismic behavior of prestressed fabricated PC frame connections [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 60-65. (in Chinese))
- [8] 柳炳康, 田井锋, 张瑜中, 等. 低周反复荷载下预压装配式 PC 框架延性性能和耗能能力 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 74-81. (LIU Bingkang, TIAN Jingfeng, ZHANG Yuzhong, et al. Behavior of ductility and energy dissipation of prestressed fabricated PC frame under low-cyclic reversed loading [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 74-81. (in Chinese))
- [9] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程 [S]. (JGJ 101—96 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. (in Chinese))
- [10] 吕西林, 范力, 赵斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 58-65. (LU Xilin, FAN Li, ZHAO Bin. Pseudodynamic test on a reduced scale jointed precast concrete frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 58-65. (in Chinese))
- [11] 程浩德, 房贞政. 有粘结预应力混凝土和无粘结预应力混凝土扁梁框架拟动力试验研究和有限元分析 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 850-856. (CHENG Haode, FANG Zhenzheng. Pseudodynamic experiment study and finite element analysis on bonded prestressed concrete flat beam frame and unbonded prestressed concrete flat beam frame [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2008, 36(6): 850-856. (in Chinese))
- [12] GB 50011—2008 建筑抗震设计规范 [S]. (GB 50011—2008 Code for seismic design of buildings [S]. (in Chinese))