

文章编号:1671-6833(2015)05-0063-05

# 一种新型组合框架滞回性能及地震反应分析

周 奎, 潘梦阳, 林 杰

(上海理工大学 环境与建筑工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 在已有试验研究的基础上, 采用平面非线性软件 IDARC 2D 建立数值模型, 对一榀配置核心钢管的混凝土柱和钢筋混凝土梁新型组合框架进行滞回分析, 并与试验结果对比. 同时, 对此框架的套建增层改造实例进行地震反应时程分析. 研究表明: IDARC 2D 能较好地模拟组合框架在低周往复荷载作用下的受力过程, 为此类框架滞回性能的模拟提供了合适的方法; 此新型框架具有梁耗能, 延缓柱底出铰的特点, 抗倒塌能力较强.

**关键词:** 组合框架; 钢筋混凝土梁; 内置核心钢管混凝土柱; 滞回性能; 时程分析

**中图分类号:** TU398<sup>+</sup>.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.014

## 0 引言

套建增层技术较传统增层技术而言, 既能在原有房屋的基础上实现增层, 又避免将施工阶段的荷载传至原有房屋结构和基础, 具有显著的优势. 目前, 国内普遍采用型钢-混凝土组合框架来实现大跨度、高承载力要求的外套建框架. 近些年, 针对此类结构已有许多试验成果: 钟新谷等<sup>[1]</sup>和胡吉等<sup>[2]</sup>分别对钢箱和外包钢混凝土梁进行了弯曲性能试验; 温庆杰等<sup>[3]</sup>和黄琼等<sup>[4]</sup>对钢-混结构的收缩徐变效应进行了分析; 王琨、袁沈峰等<sup>[5-6]</sup>提出了两种新型组合框架并进行了低周往复荷载作用下的结构试验. 虽已有诸多成果, 但对此类问题的仿真模拟及滞回性能分析却较少. 笔者全程模拟了王琨、袁沈峰等人提出的一种以配置核心钢管的钢筋混凝土柱作为框架柱、以 H 型钢钢筋混凝土作为框架梁的新型套建增层框架结构, 并将其应用于实际工程, 同时进行了地震反应分析.

## 1 试验概况

### 1.1 配筋构造和材料性能

试验共设计制作了 2 榀单层单跨新型组合框架试件 SRCF 和 PSRCF, 其中试件 PSRCF 的钢筋混凝土梁上施加预应力. 两榀框架模型试件的框架梁均内置焊接 H 型钢, 框架柱内均置无缝圆钢管, 框架内部钢骨节点连接是参考相关规程, 在

外加强环板式节点基础上设计制作而成, 其他配筋构造以及实测材料性能详见文献[6].

### 1.2 试验简图和加载制度

SRCF 一榀框架和 PSRCF 一榀框架试件加载简图见图 1. 图 2 为试验加载制度, 其中水平加载采用荷载-位移混合控制的加载方法. 规定以向右加载为正向, 向左为负向. 以试验中荷载-位移曲线上出现明显拐点作为构件屈服点.

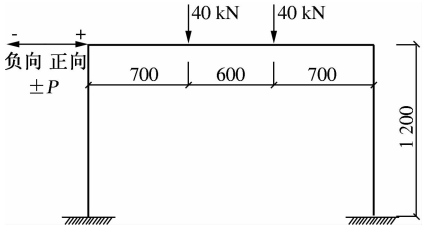


图 1 试件加载示意图

Fig. 1 Specimen loading diagram

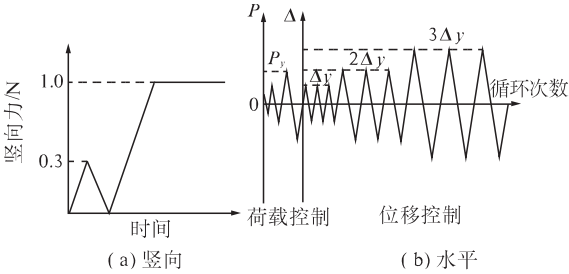


图 2 加载制度

Fig. 2 The loading system

## 2 滞回性能理论分析

假定框架梁、柱在受力过程中符合平截面假

收稿日期:2015-05-14; 修订日期:2015-07-10

作者简介:周奎(1970—),男,安徽铜陵人,上海理工大学副教授,博士,主要从事工程结构抗震、结构健康监测与损伤识别研究, E-mail:zhoukui\_sh@163.com.

定;节点不发生破坏;构件受弯破坏先于受剪破坏;不考虑混凝土收缩、徐变影响;钢筋、型钢与混凝土之间粘结可靠. 笔者采用平面非线性程序 IDARC 2D,对此新型钢骨混凝土组合框架试验进行低周反复荷载的全过程模拟.

2.1 计算模型的建立

采用杆系模型作为结构整体分析的力学模型. 由于框架试件受力明确,塑性铰分布可准确预估,因此采用集中塑性铰单分量模型作为单元模型,在可能出现塑性铰的位置设置单元节点. 型钢锚脚设置在距离柱顶部 170 mm 处,此范围内截面刚度较大,可以将其简化为刚域. 框架的分析简化模型如图 3 所示.

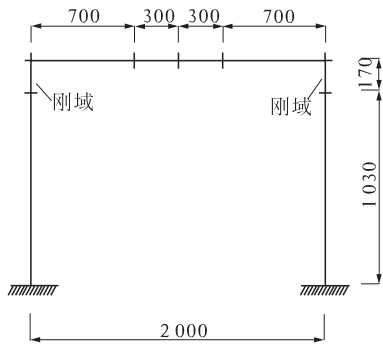


图 3 框架的分析模型  
Fig. 3 Analysis model of framework

2.2 材料的本构关系

钢筋及型钢的本构关系采用理想弹塑性模型. 混凝土以及预应力钢筋本构关系采用我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010). 其中,预应力钢筋本构关系表达式见式(1).

$$\sigma_p = \begin{cases} E_{py} \varepsilon_p, E_{py} = f_{py} / \varepsilon_{py} & (0 < \varepsilon_p \leq \varepsilon_{py}) \\ f_{py} + (f_{pu} - f_{py}) / (\varepsilon_{pu} - \varepsilon_{py}) (\varepsilon_p - \varepsilon_{py}) & (\varepsilon_{py} < \varepsilon_p \leq \varepsilon_{pu}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:钢筋的屈服强度表示为  $f_{py}$ ,对于无明显屈服点的钢筋,建议取  $f_{py} = 0.85f_{pu}$ , $f_{py}$  对应的应变为  $\varepsilon_{py}$ ;钢筋的极限强度  $\varepsilon_s$ ,极限应变  $\varepsilon_{pu}$ .

2.3 梁柱恢复力模型

2.3.1 模型的选取

采用 Park 恢复力模型<sup>[7]</sup>,如图 4 所示. Park 恢复力模型提供了一种顶点导向模式,根据钢材每次循环顶点的指向都与上次循环顶点的指向相同的规律,该模式假定每次循环的峰值与上次循环的峰值相同. 该模型须确定如下参数:初始刚度(EI)、开裂弯矩(PCP)、屈服弯矩(PYP)、屈服曲率(UYP)和极限曲率(UUP),刚度退化参数( $\alpha$ )、强度退化参数( $\beta_1\beta_2$ )以及滑移退化参数( $\gamma$ ). 在模拟过程中,笔者采用顶点导向模式的 Park 恢复

力模型.

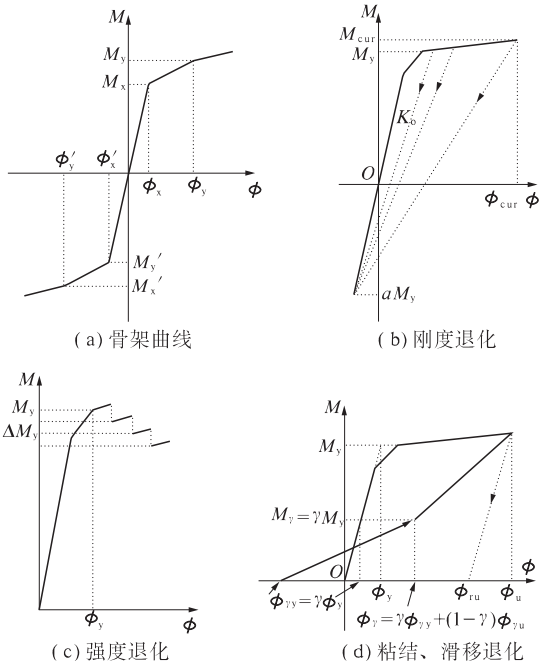


图 4 Park 顶点导向模型  
Fig. 4 Park vertex oriented model

2.3.2 构件参数的确定

规定 H 型钢受拉翼缘屈服则钢骨混凝土梁截面屈服,受拉钢管边缘屈服则钢管混凝土柱截面屈服. 笔者运用 Matlab 软件根据非线性有限元分析法,编制了梁柱截面的弯矩曲率计算程序,分别模拟了 H 型钢钢骨混凝土梁截面、预应力 H 型钢钢骨混凝土梁截面以及配置钢管核心钢筋混凝土柱截面的弯矩曲率图,如图 5 所示. 从中可获得截面的开裂弯矩(PCP)、屈服弯矩(PYP)、屈服曲率(UYP)以及极限曲率(UUP)参数,如表 1 所示.

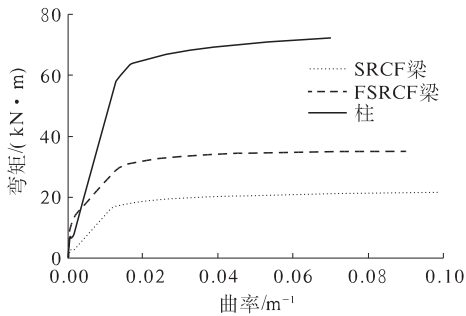


图 5 组合框架各截面弯矩曲率关系图  
Fig. 5 The sectional moment curvature diagram of the composite frame

对于滞回模型参数,目前还没有通用的方法. 笔者根据试验模拟经验以及构件滞回特点,综合考虑如下三点来确定滞回模型参数:①考虑不同参数滞回模型顶点与构件截面弯矩曲率骨架曲线

吻合程度;②考虑 IDARC Manual<sup>[8]</sup>中构件退化程度的推荐参数;③考虑相关文献[9-10]对于此类组合构件的建议参数.经过分析及反复修正,确定构件屈服后刚度退化参数( $\alpha$ )、强度退化参数( $\beta_1\beta_2$ )以及滑移退化参数( $\gamma$ ),如表 2 所示.

表 1 组合框架各截面弯矩曲率参数表

Tab.1 The sectional moment curvature parameters of the composite frame

试件类型	开裂弯矩/ (kN·m)	屈服弯矩/ (kN·m)	屈服曲率/ (1·m <sup>-1</sup> )	极限曲率/ (1·m <sup>-1</sup> )
SRCF 梁	3.23	17.70	0.015	0.099
PSRCF 梁	13.55	30.20	0.014	0.090
钢管砼柱	7.42	61.10	0.015	0.070

表 2 构件截面的退化参数表

Tab.2 The degradation parameters of components section

退化参数	钢骨混凝土梁	预应力钢骨混凝土梁	钢管混凝土柱
$\alpha$	4	3	6
$\beta_1$	0.01	0.30	0.30
$\beta_2$	0.01	0.35	0.15
$\gamma$	1.0	1.0	0.25

表 3 两种框架试验与模拟关键值对比表

Tab.3 The comparison of key values from test and simulation of two frames

		梁开裂 荷载/kN	柱开裂 荷载/kN	屈服点 荷载/kN	屈服点荷载 对应的位移 $\Delta_y$ /mm	破坏时的 最大位移/mm
SRCF	实验值	50.00	100.00	180.00	8.00	$7\Delta_y = 56.00$
	模拟值	39.48	75.39	161.70	6.55	$66.78 \approx 10.2\Delta_y$
PSRCF	实验值	100.00	100.00	160.00	7.00	$7\Delta_y = 49.00$
	模拟值	64.80	74.80	150.00	5.75	$39.57 \approx 6.9\Delta_y$

3 实例分析

新型套建框架存在头重脚轻、刚度沿房屋高度分布不均匀的现象,如何确保其“小震不坏,中

2.4 加载制度的修正

在模拟中,试件 SRCF 水平向右加载时,①当荷载达到 +39.48 kN 时,梁端首先开裂;②当荷载达到 +75.39 kN 时,左柱和右柱同时出现裂缝;③当荷载达到 +161.7 kN 时,荷载-位移曲线出现明显拐点,此时水平位移约为 6.55 mm(即  $\Delta_y = 6.55$  mm),此后加载改用位移控制;④当水平位移为 66.78 mm(即  $10.2\Delta_y$ )时,混凝土破坏严重,程序停止.此时,试验破坏时的最大位移为  $7\Delta_y = 56.00$  mm,具体表现为梁端部混凝土压碎,出现贯穿梁界面的斜裂缝,两柱端根部塑性铰区混凝土破坏严重.可见上述模拟关键值和与之对应的试验值存在差异.框架试验与模拟关键值对比见表 3.模拟中,以模拟关键值调整加载准则.

2.5 滞回曲线对比

采用 IDARC 2D 程序模拟得到了组合框架滞回曲线与试验结果对比如图 6、7 所示.分析可得:①模拟结果的初始刚度、加载刚度、卸载刚度以及屈服点与试验结果较为一致;②滞回曲线的峰值相差较小,其中模拟 PSRCF 的骨架曲线下降更为迅速,而 SRCF 则比试验平缓;③模拟构件与试验滞回环饱满,都具有较好的耗能能力;在加载初期,模拟结果耗能能力稍强,后期则与试验结果接近;这是由于初期残余变形模拟偏小造成的.

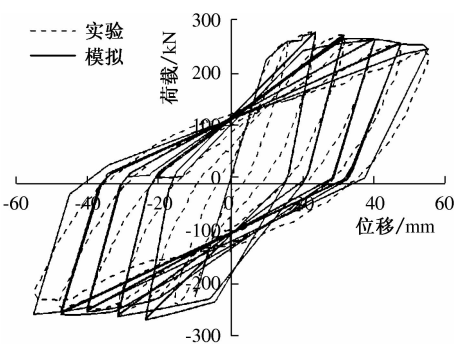


图 6 SRCF 框架试验与模拟滞回曲线对比图  
Fig.6 The comparison of the test and simulation in the hysteretic curve of SRCF

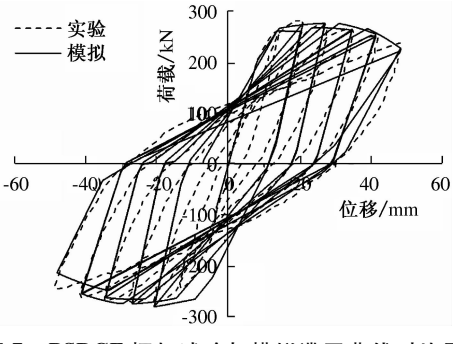


图 7 PSRCF 框架试验与模拟滞回曲线对比图  
Fig.7 The comparison of the test and simulation in the hysteretic curve of PSRCF

震可修,大震不倒”必须引起重视.笔者下面将根据此类钢骨混凝土框架工程实例,对这种新型的预应力钢骨混凝土框架进行弹塑性地震反应分析.

3.1 实例介绍以及建立模型

根据文献[11]的改造要求,采用笔者所提的新型钢筋混凝土组合框架进行套建增层改造设计.

哈尔滨南岗会堂于 2004 年扩建了 2 层砌体结构房屋,层高为 7.8 m. 现需将房屋由 2 层增至 5 层,并确保原建筑在施工过程中正常使用. 套建主框架采用配置核心钢管的混凝土柱和钢筋混凝土梁新型组合框架,次框架选用型钢混凝土梁和型钢混凝土吊柱,考虑预应力对梁徐变的影响,应对主框架梁施加预应力<sup>[12]</sup>. 套建设计框架基本参数具体见图 8. 套建框架各构件材料参数指标,如表 4 所示.

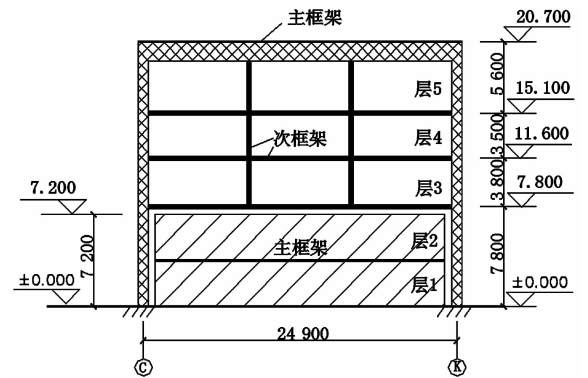


图 8 套建设计框架侧立面图

Fig. 8 The frame side elevation of jacketing design

表 4 套建框架各构件参数

		柱		梁	
主框架	尺寸	1 100 × 1 100		600 × 2 600	
	纵筋	2 × 8φ25		2 × 8φ25	
	型钢	钢管 φ351 × 8		H2400 × 400 × 30 × 30	
次框架	尺寸	600 × 600		500 × 500	
	纵筋	2 × 2φ25		2 × 2φ25	
	型钢	H400 × 400 × 13 × 21		H300 × 300 × 10 × 15	

根据以上构件参数,运用 Matlab 编程进行非线性有限元分析,得出截面的弯矩曲率关系. 再根据弯矩曲率参数运用二维平面框架分析软件 IDARC 2D 将这些特殊构件进行组合. 其中,模拟过程及参数选择参照本文第 2 节,不再赘述. 依据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》相关规定,黑龙江哈尔滨地区设防烈度为 6 度,抗震等级为四级.

3.2 倒塌机制判断准则

对于 H 型钢预应力混凝土组合框架梁,以 H 型钢受拉翼缘屈服作为梁铰出现的标志. 同时,配置核心钢管混凝土框架柱以受拉区钢管边缘屈服作为柱铰出现的标志. 当结构框架水平侧移(位

移角)超过抗震要求的弹塑性限值时,框架结构如出现沿水平方向的可变机构(塑性铰),则认为结构进入倒塌临界状态<sup>[13-14]</sup>.

3.3 弹塑性地震反应分析

笔者选取了 Taft 波和 El Centro 波,人工波根据哈尔滨当地地震基本信息拟合而成. 通过 IDARC 2D 计算得出,在 Taft 波、El Centro 波以及人工波作用下的层间位移角如图 9 所示. 在 3 种地震波作用下损伤情况近似,如图 10 所示.

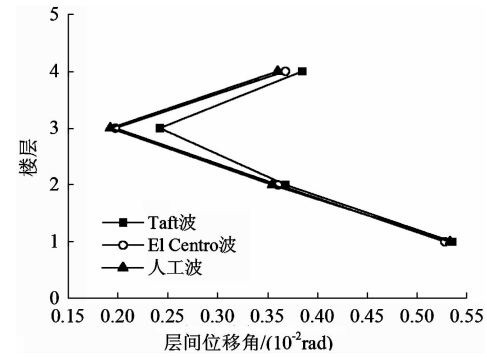
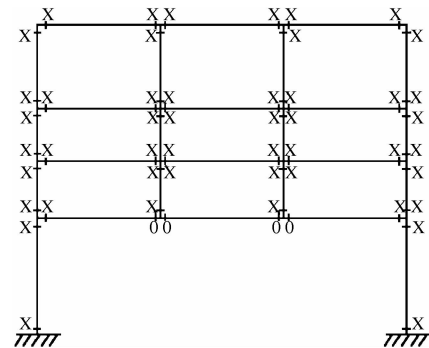


图 9 3 种地震波作用下框架的层间位移角

Fig. 9 The inter-story displacement angle of frame in three earthquake



注:0 表示塑性铰;X 表示开裂.

图 10 框架损伤情况示意图

Fig. 10 Schematic diagram of frame damage

经计算,3 种地震波得到的侧移(层间位移角)比较接近. 我国抗震规范并未规定此类钢混框架结构的层间位移角限制,但在《建筑抗震设计规范》中有弹塑性层间位移角最小值为 1/120. 由图 9 可知满足国家抗震规范构造要求. 由图 10 可知只有一层梁端出现了塑性铰,而柱未出铰. 这与文献[6]试验得出此框架能够实现梁铰耗能机制,可延缓柱底出铰的结论一致. 因此,新型组合框架结构能很好的避免倒塌机制.

4 结论

(1) 新型组合框架的滞回模拟与试验结果吻合较好,所采用的 IDARC 2D 程序能够很好地模拟此类自定义截面构件组合框架的滞回性能,程

序中所运用模型及参数设定较为合理。

(2)模拟与试验滞回曲线都呈饱满的梭形,具有较好的抗震性能。在加载初期,模拟残余变形偏小,导致模拟曲线耗能能力稍强,后期则与试验结果接近。

(3)在多遇地震作用下,新型组合框架结构并未出现水平方向可变机制。说明新型组合框架具有梁铰耗能,延缓柱底出铰的特点。因此,能使结构避免倒塌机制的出现。

## 参考文献:

- [1] 钟新谷,舒小娟. 钢箱-混凝土组合梁弯曲性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(1):71-76.
- [2] 胡吉,石启印. 外包钢-混凝土组合梁正截面受弯承载力试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,26(9):457-460.
- [3] 温庆杰,叶见曙. 钢-混凝土组合梁的收缩徐变效应分析[J]. 工业建筑,2006,36(21):492-495.
- [4] 黄琼,叶梅新. 钢-混凝土叠合板组合桥面的徐变和应力重分布研究[J]. 铁道科学与工程学报,2006(3):15-20.
- [5] 王琨. 套建增层预应力钢骨混凝土框架抗震性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院,2010.
- [6] 王琨,袁沈峰,曹大富,等. 配置核心钢管的钢筋混凝土柱-钢骨混凝土梁组合框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(6):103-112.
- [7] PARK Y J, REINHORN A M, KUNNATH S K. IDARC: Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures[R]. Technical Report NCEER - 87 - 0008. State University of New York at Buffalo. 1987.
- [8] VALLES R E, REINHORN A M, KUNNATH S K, et al. IDARC 2D Version 6.0: A program for the inelastic damage analysis of building[R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research. State University of New York. 1996.
- [9] 王琨,郑文忠. 套建增层预应力钢骨混凝土框架弹塑性地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(4):94-105.
- [10] 葛建国,王琨. 基于IDARC的型钢混凝土组合框架滞回性能理论分析[J]. 建筑科学,2012,28(1):5-8.
- [11] 郑文忠,王英,刘思嘉. 哈尔滨南岗会堂增层改造设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(6):45-50.
- [12] 王俊,赵静超,刘立新. 预应力度对梁徐变系数与徐变挠度系数数值关系的影响[J]. 郑州大学学报:工学版,2013,34(5):26-30.
- [13] 魏琰,王迪民,韦承基,等. 钢筋混凝土框架结构地震破坏机理探讨[J]. 工程抗震,1998(1):3-5.
- [14] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1999.

## Research on Hysteretic Behavior and Seismic Response Analysis of a New Composite Frame Structure

ZHOU Kui, PAN Meng-yang, LIN Jie

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In this study, a theoretical research on hysteretic behavior of a new composite frame composed of RC column encased steel-tube and steel reinforced concrete beam was proposed by using the plane nonlinear software-IDARC2D. The theoretical analysis results were compared with experiments. In addition, seismic response regarding to an outer-jacketing reconstruction example of composite frame was analyzed by means of time-history analysis. The research results showed that IDARC 2D could preferably simulate the entire loading process on the composite frame, and provide a suitable analytical method for hysteretic behavior. The emergence sequence of plastic hinges on this frame is ‘beam ends before and column bottoms after’, so that the anti-collapse ability of the structure was largely enhanced.

**Key words:** composite frame; steel reinforced concrete beam; RC column encased steel-tube; hysteretic behavior; time-history analysis