

文章编号:1671-6833(2016)03-0056-04

# SRC 柱-钢梁混合框架抗震性能研究

楚留声,崔中敏,张俊峰,赵 军

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:**对一榀 SRC 框架进行静力非线性分析,分析结果与试验吻合较好;在此背景下,通过对两跨三层的 SRC 柱-钢梁混合框架进行静力非线性分析,研究了 SRC 柱含钢率和梁柱线刚度比对混合框架抗震性能的影响.结果表明,SRC 柱-钢梁底层框架实现了“强柱弱梁”破坏模式,混合框架荷载-位移曲线经历了较长的塑性变形阶段,结构表现出良好的整体延性.随着梁柱线刚度比增加,框架破坏模式逐渐从整体“强柱弱梁”过渡为“强梁弱柱”破坏模式,结构延性下降明显,设计时可取 0.3~0.4 作为参考的界限梁柱线刚度比.

**关键词:**混合框架;SRC 柱-钢梁;抗震性能;静力非线性分析

**中图分类号:** TU398 **文献标志码:** A **doi:**10.10375/j.issn.1671-6833.2016.03.013

## 0 引言

型钢混凝土(Steel Reinforced Concrete,简称 SRC)柱与钢梁组成的混合框架是目前应用较多的由不同构件混合而成的结构形式之一. SRC 柱中型钢与外包混凝土共同工作,能够有效发挥钢材和混凝土材料的特性,经济耐用,而且能提供足够的刚度,是地震区常用的柱截面形式之一.同时,高层结构中框架通常柱距较大,现实实践中多采用钢梁与 SRC 柱混合来减小结构自重、控制梁跨中裂缝.因此, SRC 柱-钢梁混合框架近年来越来越多地被用于高层框架和混合框架-核心筒混合结构等体系中.

相对于 SRC 柱-钢梁混合框架结构在工程实践中的大量应用,其整体结构的抗震性能和研究方法的研究则处于起步阶段.现有的研究成果多侧重于构件和节点层次,对于常见的组合柱、组合梁以及组合节点,已经积累了大量的试验数据,同时建立了较为完善的设计理论与方法<sup>[1]</sup>.但是由于混合框架体系在地震作用下非线性行为的复杂性,构件层次上的研究成果不足以充分揭示整体受力特性;而在体系层次上设计人员更为关心的构件集成和体系优化问题,其理论研究远远滞后

于实际的工程实践.目前,尽管《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)<sup>[2]</sup>和《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》(CECS 230:2008)<sup>[3]</sup>对 SRC 柱-钢梁的构造和设计作出了说明和建议(后者明确将其定义为混合框架),但其条文主要是结合国内部分工程实践经验偏于安全的状态下确定的,大部分参考了钢筋混凝土结构或钢结构抗震要求,缺乏理论基础.

聂建国等<sup>[4]</sup>近年对方钢管混凝土柱-组合梁混合框架结构的受力性能进行了分析,并对其数值模拟方法进行了系列研究<sup>[5]</sup>,但以 SRC 柱为主要抗侧力构件的混合框架的抗震性能系统研究则未涉及.徐培福等<sup>[6]</sup>对 30 层的钢-混凝土混合结构(框架部分为 SRC 柱-钢梁混合框架形式)模型进行了拟静力试验,结果为框架部分 SRC 柱出现塑性铰,而未出现设计预期的“梁铰”破坏形式.笔者前期研究<sup>[7]</sup>了混合框架中容易出现的塑性铰分布形式,并论证了目前抗震规范在内力调整方面存在的不足.

上述研究在一定程度上涉及了混合框架“强柱弱梁”问题的研究,但对 SRC 柱-钢梁混合框架抗震性能和研究方法的研究尚未系统展开,对于结构“强柱弱梁”内力调整等关键问题的建议尚

**收稿日期:**2015-10-15;**修订日期:**2015-12-20

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51408556,51478438);河南省高校科技创新团队项目(15IRTSTHN026),河南省高等学校重点科研项目(15A560037,14A560019)

**作者简介:**楚留声(1980—),男,河南禹州人,郑州大学副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构研究,E-mail:cls981@163.com.

停留在定性的程度,并未给出明确的调整系数作为参考依据.在此背景下,笔者通过对两跨三层的 SRC 柱-钢梁混合框架进行静力非线性分析,研究了混合框架的破坏状态和抗震能力,并讨论了 SRC 柱含钢率和梁柱线刚度比对其影响.

1 试验及有限元模型参数

本文的 Pushover 分析模型中,钢梁采用 SAP2000 程序提供的基于 FEMA (356) 和 ATC-40 的默认 M3 铰,SRC 柱则采用 CSI 公司有限元通用软件计算得到的 PMM 铰,并结合相关文献[8]确定弯矩-曲率恢复力模型和  $N$ - $M$  相关曲线,塑性铰均分布在构件两端.按此方法对文献[9]两跨三层 SRC 框架模型对应的原尺寸模型进行了模拟.该框架跨度 6 m,底部层高 4.2 m,二、三层层高 3.6 m,混凝土采用 C35 等级.原模型中 2 mm 厚和 3 mm 厚钢板的屈服强度分别为 264 N/mm<sup>2</sup> 和 281.7 N/mm<sup>2</sup>,分析中取其平均值 273 N/mm<sup>2</sup> 作为型钢的屈服强度.表 1 为模型中 SRC 构件的几何尺寸.

表 1 算例 SRC 框架各构件几何尺寸  
Tab.1 member geometry size of SRC frame

构件	截面/mm	型钢/mm	纵筋
SRC 梁	600×320	320×160×16×16	4Φ18
钢梁	—	352×160×16×16	—
底层 SRC 柱	480×480	288×320×16×24	4Φ18
二、三层 SRC 柱	480×480	272×240×16×16	4Φ18

注:表中钢梁尺寸为后面混合框架中钢梁尺寸.

根据配重不足动力模型在弹性及塑性阶段的动力相似关系将 Pushover 分析结果转化,转化后的 Pushover 分析结果和试验值如图 1 所示.

由于 Pushover 分析中假设构件所有的塑性变形都发生在铰内,而且在塑性铰屈服点(面)被触动之前构件变形均为弹性变形,从图中可以看到,

Pushover 分析曲线存在较明显的屈服阶段,而试验曲线相对平缓,但两条曲线在总体趋势上吻合较好,曲线刚进入屈服阶段处试验值与 Pushover 曲线最大相差约 6.2%,由此表明笔者使用的铰属性参数对于 SRC 构件的弹塑性分析适用.

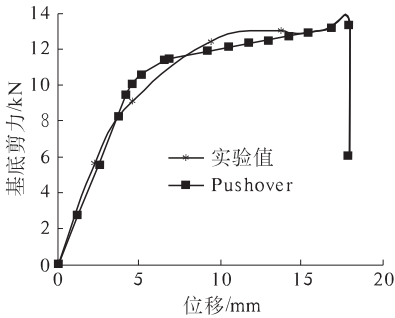


图 1 SRC 框架荷载-位移曲线  
Fig.1 Load-displacement curve of SRC frame

2 SRC 柱-钢梁混合框架抗震性能

对两跨三层 SRC 柱-钢梁混合框架进行了 Pushover 分析,分析模型在算例的基础上仅改变钢梁的尺寸(表 1).图 2 给出了该混合框架 Pushover 分析的荷载-位移曲线和构件塑性铰分布,限于篇幅,仅给出主要荷载步塑性铰情况.

从图 2(a)可以看出,在构件达到屈服荷载之前,曲线呈线弹性上升趋势.位移达到在 140 mm 左右时,曲线出现转折,此时梁端开始出现塑性铰(图 2(b)).此后,随着加载的继续,结构基底剪力值随着加载位移的增大而增加速度明显下降,梁端塑性铰进一步发展,底层和二层柱端开始出现塑性铰,但发展程度较轻.位移值达到 360 mm 时,结构承载力出现下滑趋势,表明结构开始进入塑性破坏阶段,此后塑性铰损伤程度进一步增加,但未出现新的塑性铰.分析结束时底层梁铰发展充分,框架最终以柱端塑性铰的过渡发展导致结构破坏.

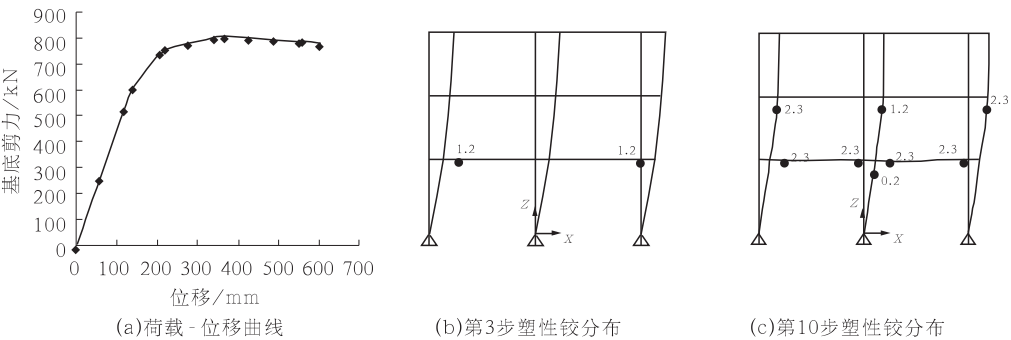


图 2 混合框架荷载-位移曲线和塑性铰分布  
Fig.2 Load-Zdisplacement curve and plastic hinge development of hybrid frame

由于该框架选用的钢梁三层尺寸均相同,同时二、三层 SRC 柱较小,故算例中二层梁未出现塑性铰,因此框架二层并不符合“强柱弱梁”设计原则.尽管如此,由于剪力最大的底层框架实现了“强柱弱梁”破坏模式,使整个混合框架荷载-位移曲线经历了较长的塑性变形阶段,结构仍表现出较好的整体延性.

3 SRC 柱-钢梁混合框架抗震影响因素

3.1 SRC 柱含钢率

依照《钢筋混凝土结构技术规程》(YB

9082—2006),型钢混凝土构件的最小含钢率为 2%,最大含钢率也不宜超过 15%;同时,型钢混凝土构件中钢板的厚度不能小于 6 mm.基于这些考虑,建立了 3 个含钢率不同的分析模型(含原模型),相应的型钢混凝土柱中型钢截面尺寸如表 2 所示.3 组框架 Pushover 分析的荷载位移-曲线和塑性铰分布如图 3 所示(MODAL0 塑性铰见图 2).

表 2 SRC 柱含钢率分析模型参数

Tab.2 Analysis model parameters of the SRC column with different steel ratios

模型	底层型钢尺寸/mm	其他层型钢尺寸/mm	底层型钢率/%	其他层含钢率/%
MODAL0	288×320×16×24	272×240×16×16	8.3	5.0
MODAL1	288×320×24×28	272×240×18×20	10.2	6.0
MODAL2	288×320×28×32	272×240×20×24	11.6	6.9

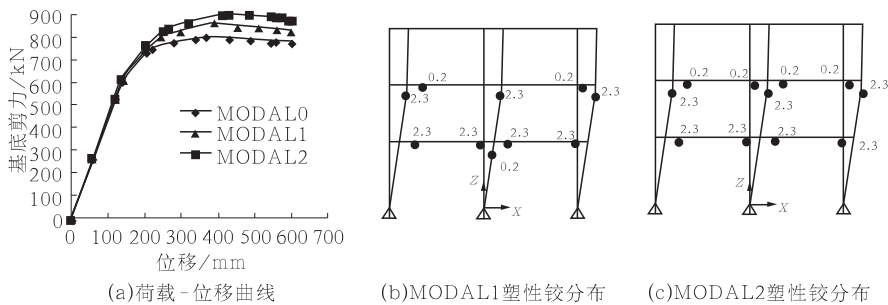


图 3 不同 SRC 柱含钢率的混合框架荷载-位移曲线和塑性铰分布

Fig.3 Load-displacement curve and plastic hinge development of hybrid frame with different steel ratio in SRC column

由图 3 可知,SRC 柱含钢率在弹性阶段对 SRC 柱-钢梁混合框架的抗侧承载力和变形基本没有影响.进入塑性阶段之后,其变形和延性与基本模型类似,但 SRC 柱含钢率越高明显表现为构件的极限承载力越大.同时,对比 3 个模型塑性铰发展状况可以发现,MODAL1 二层每道梁一侧均出现了塑性铰,而 SRC 柱含钢率更大的 MODAL3 二层梁不仅两端均出现了塑性铰,并且推覆结束时塑性铰的发展程度也更高.

可见,SRC 柱含钢率在在一定程度上影响了混合框架的破坏模式,通常 SRC 柱含钢率越高,SRC 柱-钢梁混合框架的塑性铰发展得越充分,结构的变形能力和耗能能力越强.

3.2 梁柱线刚度比

相比含钢率对破坏模式的影响,梁柱线刚度比  $i_b/i_c$  是混合框架设计时更常用的指标.为此,在基本模型的基础上通过改变钢梁几何尺寸来调整框架的刚度比  $i_b/i_c$ ,如表 3 所示,并以此来考察

梁柱线刚度比对结构破坏模式及承载能力的影响.

图 4 给出了各组模型的荷载-位移曲线,同时由于篇幅关系仅给出了 MODAL0、MODAL5 和 MODAL6 推覆结束时的塑性铰分布.

表 3 不同梁柱线刚度比模型参数

Tab.3 Analysis model parameters with different linear stiffness ratios of beam to column

模型	钢梁几何尺寸/mm	$i_b/i_c$	
		底层	其他层
0	280×140×12×16	0.077	0.080
1	300×160×12×16	0.102	0.105
2	352×160×16×16	0.156	0.161
3	400×160×16×16	0.212	0.218
4	400×180×16×18	0.249	0.257
5	400×200×16×20	0.291	0.300
6	400×300×16×20	0.411	0.424
7	500×300×16×24	0.779	0.803

注:表中 MODAL2 代表前文分析中的基本模型.

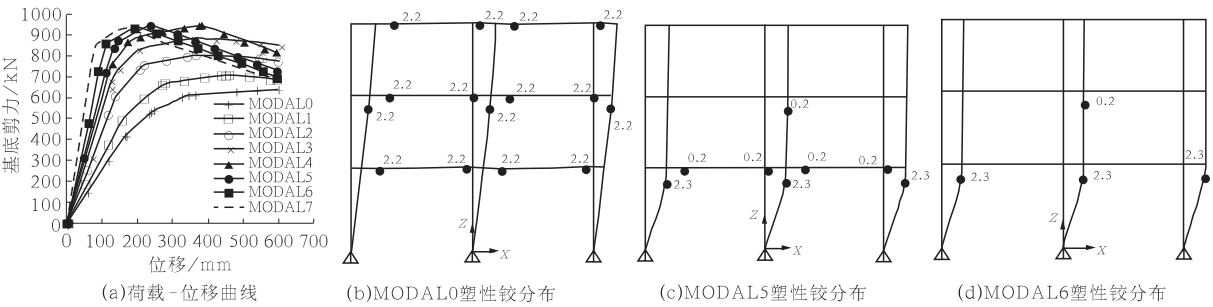


图 4 不同梁柱线刚度比的混合框架荷载-位移曲线和塑性铰分布

Fig. 4 load-displacement curve and plastic hinge development of hybrid frame with different linear stiffness ratio of beam to column

从图 4 可以看出,在梁柱线刚度比较小时,混合框架的荷载-位移曲线比较饱满,结构屈服后均有较长的屈服阶段,表现出较好的延性.底部两层均出现梁铰机制,推覆结束时梁端塑性铰发展比较充分,算例中 MODAL0 和 MODAL1 均呈现该破坏状态.随着梁截面增大,框架的承载力逐渐增加,尽管破坏时塑性铰发展程度不同,但混合框架整体延性并未较 MODAL0 和 MODAL1 出现明显的下降,框架的破坏模式逐渐呈现前述算例中的破坏状态,即仅底层梁铰机制,MODAL2 ~ MODAL5 均呈现此破坏形式.梁柱线刚度比继续增加,从 MODAL6 开始,混合框架底层也从梁铰机制转变为柱铰机制(图 4(d)).对应图 4(a)中,框架的承载力与 MODAL5 非常接近,但框架承载力达到最大之后下降趋势非常明显,框架的延性较之前的几个模型下降很快,结构整体上呈现“强梁弱柱”破坏模式.综合本文算例,结构破坏模式本质上的变化发生在梁柱线刚度比为 0.291 ~ 0.411 之间,设计时可取值 0.3 ~ 0.4 作为参考的界限梁柱线刚度比.

4 结论

- (1)对两跨三层 SRC 柱-钢梁混合框架 Push-over 分析结果表明,底层框架实现了“强柱弱梁”破坏模式,混合框架荷载-位移曲线经历了较长的塑性变形阶段,结构表现出良好的整体延性.
- (2)SRC 柱含钢率在一定程度上影响混合框架的破坏模式,通常 SRC 柱含钢率越高, SRC 柱-钢梁混合框架的塑性铰发展得越充分,结构的变形能力和耗能能力越强.
- (3)梁柱线刚度比较小时,本文算例中混合框架底部两层均实现了“强柱弱梁”破坏模式,结

构整体延性较好.随着梁柱线刚度比增加,框架破坏模式逐渐过渡为整体“强梁弱柱”破坏模式,结构延性下降明显.结构破坏模式本质上的变化发生在梁柱线刚度比为 0.291 ~ 0.411 之间,设计时可取值 0.3 ~ 0.4 作为参考的界限梁柱线刚度比.

参考文献:

- [1] 聂建国.高性能结构体系[C]// 科学发展战略基金委员会—中国科学院 2011—2020 学科发展战略研究专题报告集:建筑、环境与土木工程.北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] JGJ 3—2010.高层建筑混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] CECS 230:2008.高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [4] 聂建国,黄远.考虑楼板组合作用的方钢管混凝土组合框架受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(3):99-108.
- [5] 陶慕轩,聂建国.面向体系非线性分析的钢管混凝土柱-组合梁节点多尺度高效数值模型[J].土木工程学报,2014,47(9):57-69.
- [6] 徐培福,薛彦涛,肖从真,等.带转换层型钢混凝土框架-核心筒结构模型拟静力试验对抗震设计的启示[J].土木工程学报,2005,38(9):1-8.
- [7] 楚留声,高丹盈,赵更岐. SRC 柱-钢梁组合框架“强柱弱梁”破坏机制研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2009,30(4):26-29.
- [8] 楚留声,白国良.型钢混凝土框架 pushover 分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(2):51-56.
- [9] 薛建阳,赵鸿铁.型钢混凝土框架模型的弹塑性地震反应分析[J].建筑结构学报,2000,21(4):28-33.

(下转第 63 页)