

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.009

SRC-RC 竖向混合框架静力非线性分析

伍 凯¹, 薛建阳², 曹平周¹, 赵鸿铁²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为了解决 SRC-RC 竖向混合框架承载力和刚度的突变问题,避免形成薄弱层,共进行了 7 个工况的静力非线性计算,对 SRC-RC 竖向混合框架的抗震性能进行了分析.通过计算给出了 SRC-RC 竖向混合框架的基底剪力与顶点侧移曲线、极限层间侧移角及塑性铰分布.结果表明:SRC 结构层数与结构总层数的比值不应小于 1/3,以保证梁铰侧移机制得以实现;RC 结构部分底层容易因刚度与强度突变而成为结构的薄弱层,因此适当增加 RC 结构部分底层或底部数层的纵筋数量,或减小与 RC 柱邻接的 SRC 柱的配钢率,可保证楼层承载力和刚度逐级递减,改善 SRC-RC 竖向混合框架的抗震性能.

关键词:型钢混凝土 钢筋混凝土 混合结构 静力非线性分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)05-0523-05

混合结构与组合结构是有着密切联系的不同概念.2 种不同性质的材料组合成整体共同工作的构件称为组合构件,混合结构是由不同材料的构件共同组成的结构.型钢混凝土(SRC)构件由于配置有型钢,不仅强度、刚度明显增加,而且延性获得很大的提高,从而组成了抗震性能很好的 SRC 组合结构^[1-6].广义的混合结构是指组合不同材料构成的构件,且由该类构件形成的至少 2 种不同类型的结构(或子结构)复合而成的结构体系.目前的混合结构大多是指平面内并联而成的结构体系,更准确的应该称为平面混合结构.随着建筑科技的发展以及市场需求,出现了竖向串连的结构形式.由于竖向串连的结构形式在上部和下部楼层采用不同的结构体系,因此称之为竖向混合结构.下部采用 SRC 结构、上部为钢筋混凝土(RC)结构的框架结构称为 SRC-RC 竖向混合框架.本文对 SRC-RC 竖向混合框架进行了静力非线性分析,给出了基底剪力与顶点侧移曲线、极限层间侧移角及塑性铰分布.通过计算与分析,获得了 SRC-RC 竖向混合框架的基本抗震行为,研究了各种因素对抗震性能的影响,为其应用与推广提供理论基础与数据结果.

1 SRC-RC 竖向混合框架的震害与设计研究现状

20 世纪 50 年代, SRC-RC 竖向混合结构开始应用于日本的多层住宅,而近年来在国内部分高层和超高层建筑中也得到了应用,如 1998 年建成的广州汽车大厦的主楼^[7].在 SRC-RC 竖向混合结构中,最常见的结构形式是 SRC-RC 竖向混合框架. SRC-RC 竖向混合框架充分利用了 SRC 结构和 RC 结构各自的优点,综合考虑了工程的实际需要和客观经济因素的影响,对当代高层建筑的发展具有较强的适应性^[8-12].

20 世纪中期的 SRC-RC 竖向混合结构采用的过渡方式为整层过渡,如图 1 所示,型钢的截断位置选择在梁柱的节点处.1954 年日本建设省编辑了《高层公营住宅设计资料汇编》,将 3 层以下为 SRC 结构、3 层以上为 RC 结构的 12 层高层住宅作为标准设计刊出.在对混合结构的基本受力行为和抗震性能缺乏认识、尚未形成一套完善设计方法的情况下, SRC-RC 竖向混合结构开始应用于实际工程.在这样的历史背景下,采用 SRC-RC 竖向混合结构的建筑物在阪神地震中破坏较为严重.图 2 为具有代表性的破坏形态,破坏集中发生在 RC 结构和 SRC 结构的交接位置,强度和刚度的突变导致转换层坍塌、建筑物上下两部分产生相对侧移.

收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(50978217);中央高校基本科研业务费专项(2011B07714);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20096120110005);陕西省教育厅自然科学基金(09JK551);陕西省重点学科建设专项基金(E01003)

作者简介: 伍凯(1980—),男,陕西西安人,讲师,博士,主要从事钢与混凝土组合结构及混合结构的研究. E-mail: wukai19811240@yahoo.com.cn

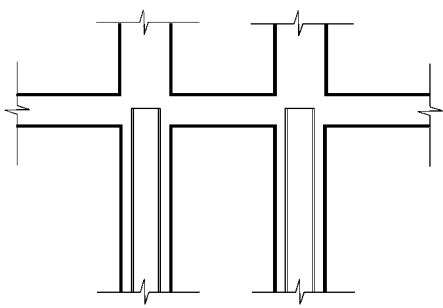


图 1 SRC-RC 整层过渡混合框架

Fig. 1 Transition of SRC-RC hybrid frame



图 2 SRC-RC 竖向混合结构的震害

Fig. 2 Seismic damage of SRC-RC hybrid frame

2 SRC-RC 竖向混合框架的静力非线性分析

静力非线性分析是基于性能评估现有结构和设计新结构的一种方法. Pushover 方法是对结构在罕遇地震作用下进行静力非线性分析的一种简化方法,本质上是一种静力方法. 具体说,就是在结构计算模型上施加按某种规则分布的水平侧向力,单调加载并逐渐增大;一旦有构件开裂或屈服即修正其刚度(或使其退出工作),进而修改结构的总刚度矩阵,再进行下一步计算,依次循环直到结构计算达到预想的效果,从而确定该结构是否满足相应的抗震能力要求.

Pushover 分析使用水平侧向力分布代表在地震设计值作用下结构层惯性力的分布,其分布模式直接影响 Pushover 分析的结果,因此水平侧向力分布模式的选取是 Pushover 分析中的一个关键问题. 常用的惯性力分布有倒三角分布、均匀分布、弹性反应谱多振型组合分布、考虑高度影响的等效侧向力分布,以及郑正昌博士提出的下部几层采用三角形分布、上部各层采用均匀分布的水平侧向力分布模式^[13]. 这些水平侧向力分布在整个加载过程中保持不变,被称为固定式侧向力模式.

2.1 模型的建立

应用分析软件 SAP2000 对一榀 3 跨、8 层 SRC-RC 竖向混合框架进行了静力非线性分析,并利用截面设计软件 SECTION BUILDER 进行截面设计及校核. 该框架层高 3 m,柱距 6 m,柱截面尺寸 500 mm×500 mm,梁截面尺寸为 400 mm×300 mm,结构布置如图 3 所示. 梁采用统一截面形式,柱的截面根据不同工况略有调整,底部数层采用 SRC 柱,上部楼层采用 RC 柱. 对于梁单元,仅考虑梁端受弯屈服产生的塑性铰(M3 铰);柱单元考虑轴力与弯矩的相关作用产生的 PMM 塑性铰. SAP2000 提供了 3 种内力重分配的方式:卸载整个结构、施加局部重分布、使用割线刚度重新开始. 本次分析采用卸载整个结构的内力重分配方式,水平侧向力采用倒三角形模式,整个计算过程考虑 $P-\Delta$ 效应, P 为结构承担的轴向压力, Δ 为结构的侧向位移.

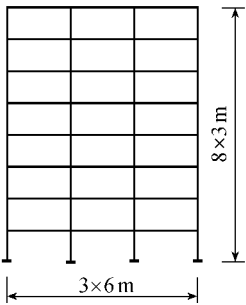


图 3 SRC-RC 竖向混合平面框架模型

Fig. 3 Plane model of SRC-RC hybrid frame

2.2 静力非线性分析

为了分析 SRC-RC 竖向混合框架抗震性能以及影响其抗震性能的主要因素,共进行了 7 个工况的计算. 变化参数包括底部 SRC 结构层数、SRC 柱的型钢配钢率以及 RC 柱纵筋配筋率,具体参数见表 1.

表 1 工况参数

Table 1 Parameters for conditions

工况	型钢配钢率/%	SRC 柱 型钢配钢率/%	RC 柱纵筋 配筋率/%	SRC 构件层数	侧向力 加载模式	水平承载力/kN	极限顶点 侧移/mm
RC			1.0		倒三角形	281	297
G1	4.3	1.0	1.0	1	倒三角形	312	328
G2	4.3	1.0	1.0	2	倒三角形	348	330
G3	4.3	1.0	1.0	3	倒三角形	378	365
G4	4.3	1.0	1.0	4	倒三角形	377	365
G5	4.3	1.0	2.0	2	倒三角形	380	397
G6	1.7	1.0	1.0	2	倒三角形	330	369

2.2.1 SRC 结构层数的影响

工况 G1 ~ G4 分析了 SRC-RC 竖向混合框架在倒三角形侧向力分布模式下的工作性能,并与纯 RC 框架(工况 RC)进行对比,用于分析 SRC 结构层数对 SRC-RC 竖向混合框架抗震性能的影响.图 4 为工况 RC, G1, G2 的底部剪力与顶点侧移的关系曲线.在框架处于弹性阶段时,型钢的作用尚没有得到发挥,因此 3 条曲线基本重合.随着框架各构件逐步进入屈服阶段,型钢对底部楼层的加强作用逐步得到发挥,延缓了底部楼层构件的屈服,更好地发挥了上部楼层各构件的强度和变形能力,一定程度上提高了框架的承载能力并延长了屈服平台,使结构的整体工作性能得到改善. SRC-RC 竖向混合框架工作性能优于 RC 框架,承载力与极限顶点侧移均有所提高,提高的幅度随着 SRC 结构层数的增多而增大(表 1),SRC 结构层数达到 3 层以后框架的承载力与极限顶点侧移趋于稳定.

虽然在底部楼层设置 SRC 柱延缓了 PMM 塑性铰的出现,改善了框架的抗震性能,但由于 SRC 柱与 RC 柱在强度和刚度两方面均存在较大的差异,因此容易导致薄弱层的出现.对于 SRC-RC 竖向混合框架,研究层间侧移角分布有助于确定结构是否存在薄弱层以及薄弱层出现的位置,图 5 为层间侧移角的分布情况. RC 框架的薄弱层出现在底层,底层柱的失效最终导致框架破坏.对于仅在底层设置 SRC 柱的工况 G1,虽然底层得到了加强,但 SRC 柱和 RC 柱的差异导致薄弱层上移,薄弱层出现在第 2 层.随着 SRC 结构楼层数的继续增加,底部楼层逐一得到加强,框架的破坏形式逐渐由柱铰失效过渡到梁铰侧移机制,工况 G3 已经没有明显的薄弱层,图 6 为工况 RC 和 G3 的塑性铰分布.

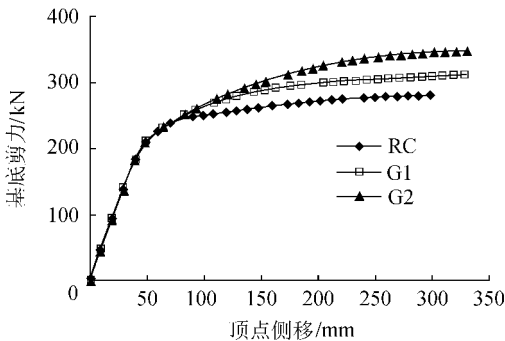


图 4 底部剪力与顶点侧移关系曲线
Fig. 4 Relationship between bottom shear force and displacement at top of frame

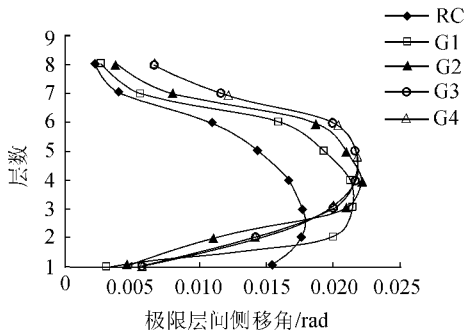


图 5 SRC 结构层数对极限层间侧移角分布的影响
Fig. 5 Effect of SRC story number on ultimate story displacement angle

值得注意的是,工况 G3 与 G4 具有相似的极限层间侧移角分布曲线,并且极限承载力与极限顶点侧移也相差不大,说明底部 3 层采用 SRC 柱能够使该 8 层 SRC-RC 竖向混合框架的性能趋于稳定,实现了梁铰侧移机制,继续增加 SRC 结构层数对混合框架的抗震性能影响不大.因此对于 SRC-RC 竖向混合框架, SRC 结构层数与竖向混合结构的总层数应该存在一个合理的比值,本文分析得到的合理比值约为 1/3,略高于《高层公营住宅设计资料汇编》的 1/4.

2.2.2 RC 柱纵筋配筋率的影响

除了规定合理的 SRC 结构层数,还可以考虑通过降低 SRC 柱与 RC 柱性能差异的方式避免在 SRC-RC 竖向混合框架中出现明显的薄弱层.由于 SRC 柱与 RC 柱的性能存在差异,混合框架的薄弱层往往出现在 RC 结构部分受力最不利的底层.为了缓解 SRC 柱与 RC 柱的性能差异,应适当增加 RC 结构部分底层或底部数层的纵筋数量,对可能出现薄弱层的位置适当加强,逐步实现截面强度和刚度从 SRC 结构到 RC 结构的分级递减.工况 G5 将 RC 柱配筋率增加到 2%,是工况 G2 的 2 倍.工况 G5 的极限承载力和极限顶点侧移由工况 G2 的 348 kN,330 mm 分别提高到了 380 kN,397 mm.图 7(a)为工况 G5 与 G2 的极限层间侧移角分布曲线.由于

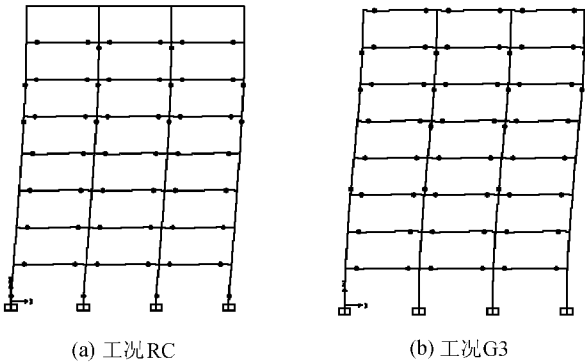


图 6 塑性铰分布
Fig. 6 Plastic hinge distribution

RC 柱纵筋数量的增加, SRC-RC 混合框架沿竖向承载力和刚度的突变问题得到缓解, 原本出现薄弱层的位置得到加强并延缓了塑性铰的出现, 使 SRC 结构层更多地参与到整个结构的抗震工作中, 混合框架没有出现明显的薄弱层.

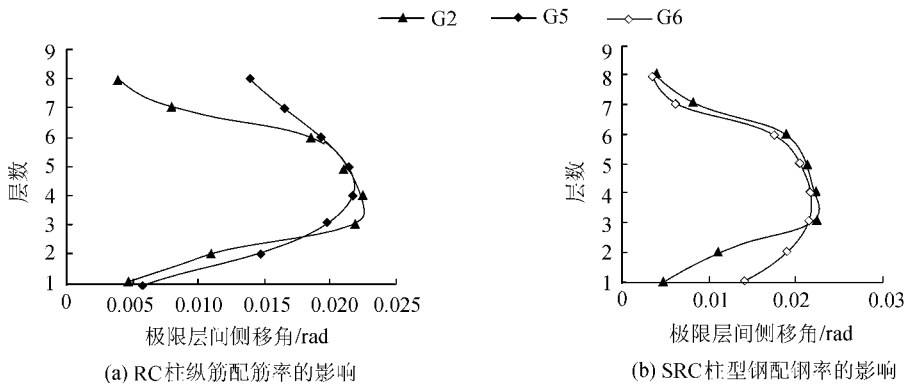


图7 极限层间侧移角分布

Fig. 7 Distribution of ultimate story displacement angle

2.2.3 SRC 柱型钢配钢率的影响

工况 G5 的 SRC 柱采用了更小的型钢截面, 配钢率由工况 G2 的 4.3% 降低到了 1.7%, 其极限顶点侧移较工况 G2 提升了约 10%, 2 个工况的极限层间侧移角分布如图 7(b) 所示. 楼层在水平力作用下的层间侧移为楼层的剪切位移与结构总体弯曲变形产生的侧移之和, 即:

$$\delta = \delta_s + \theta h$$

式中: δ ——楼层的层间侧移; δ_s ——由构件弯曲和剪切变形产生的层间侧移; θ ——下层楼面由于结构整体弯曲变形产生的转角; h ——楼层的层高.

虽然结构的整体弯曲增大了结构的 $P-\Delta$ 效应, 是影响结构稳定的一个重要因素, 但构件的破坏主要由 δ_s 引起, 可将其称为有害层间侧移. 虽然工况 G6 第 3 层层间侧移角与工况 G2 相差无几, 但由于型钢配钢率的降低, 其第 2 层的极限侧移角明显增大, 这在一定程度上减小了第 3 层的有害层间侧移, SRC-RC 混合框架此时并不存在明显的薄弱层. 为了实现从 SRC 柱到 RC 柱的合理过渡, 与 RC 柱邻接的 SRC 柱的型钢配钢率应适当降低. 美国钢结构学会规定 SRC 结构的型钢配钢率不得低于 4%; 日本规范以型钢配钢率 8% 作为用钢量的上限, 下限为 0.8%; 中国台湾规范要求不低于 2%; JGJ 138—2001《型钢混凝土组合结构技术规程》^[14] 规定配钢率不宜低于 4%, 且不宜高于 10%. 本文综合考虑不同规程、规范的要求, 并能够使 SRC 柱到 RC 柱的过渡易于实现, 建议与 RC 柱邻接的 SRC 柱的合理配钢率区间为 2% ~ 4%.

3 结 论

- 保证底部具有一定数量的设置 SRC 柱的楼层, 其层数与结构总层数的比值根据实际计算确定, 但不应小于 1/3, 使梁铰侧移机制得以实现.
- 应适当增加 RC 结构部分底层或底部数层的纵筋数量, 对可能出现薄弱层的位置适当加强并实现截面强度和刚度从 SRC 结构截面到 RC 结构截面的分级递减.
- 适当减小与 RC 柱邻接的 SRC 柱的配钢率, 使 SRC 柱到 RC 柱的过渡易于实现, 建议其合理配钢率区间为 2% ~ 4%.

参考文献:

[1] 薛建阳. 钢与混凝土组合结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
[2] 赵鸿铁. 组合结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
[3] 李俊华, 王新堂, 薛建阳, 等. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 11-18.
(LI Jun-hua, WANG Xin-tang, XUE Jian-yang, et al. Experimental study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 11-18. (in Chinese))
[4] 伍凯, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. SRC-RC 转换柱抗震性能及型钢最小延伸长度分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版,

- 2008,40(2):170-175. (WU Kai,XUE Jian-yang,ZHAO Hong-tie,et al. Analysis on seismic performance of SRC-RC transfer column and the anchoring length of shape steel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology :Natural Science Edition,2008,40(2):170-175. (in Chinese))
- [5] LI Jun-hua,XUE Jian-yang,ZHAO Hong-tie. Experimental study on slip behavior between shaped steel and concrete in SRC columns under cyclic reversed loading[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology :Natural Science Edition,2008,40(3):348-353.
- [6] XUE Jian-yang,ZHAO Hong-tie,YANG Yong,et al. Analysis on the behaviors of bond-slip between the shape steel and the concrete by push-out test[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology :Natural Science Edition,2007,39(4):320-326.
- [7] 刘大海,杨翠如. 型钢、钢管混凝土高楼计算和构造[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2003.
- [8] 杨勇,郭子雄,聂建国,等. SRC-RC 竖向混合结构过渡层抗震设计方法探讨[J]. 世界地震工程,2005,21(4):60-65. (YANG Yong,GUO Zi-xiong,NIE Jian-guo,et al. Study on seismic design of transition story of SRC-RC vertical hybrid structures[J]. World Earthquake Engineering,2005,21(4):60-65. (in Chinese))
- [9] 杨勇,郭子雄,聂建国. 型钢混凝土竖向混合结构过渡层抗震性能研究综述[J]. 工程抗震与加固改造,2006,28(5):78-86. (YANG Yong,GUO Zi-xiong,NIE Jian-guo. Review of studies on seismic design of transition story of steel reinforced concrete (SRC) vertical hybrid structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2006,28(5):78-86. (in Chinese))
- [10] 戴国亮,蒋永生,傅传国,等. 高层型钢混凝土底部大空间转换层结构性能研究[J]. 土木工程学报,2003,36(4):24-32. (DAI Guo-liang,JIANG Yong-sheng,FU Chuan-guo,et al. Experimental study on aseismic behaviors of transfer story with steel reinforced concrete in low stories of large space[J]. China Civil Engineering Journal,2003,36(4):24-32. (in Chinese))
- [11] 今野修,今泉隆之,山本宪一郎,等. 超高层建筑物における下层階へのSRC 构造适用に關する必聽的研究,その1SRC 柱の性能に關する必聽計画[C]//日本建筑学会学术讲演梗概集. 九州:日本建筑学会,1998:1029-1030.
- [12] 木村润一,新宫义信. 繰返しせん断を受ける混合部材の构造性能[C]//日本建筑学会大会学术讲演梗概集. 九州:日本建筑学会,1998:1067-1068.
- [13] 戴国莹,王亚勇. 房屋建筑抗震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2005.
- [14] JGJ 138—2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S].

Nonlinear static analysis of SRC-RC vertical hybrid frame

WU Kai¹, XUE Jian-yang², CAO Ping-zhou¹, ZHAO Hong-tie²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract : In order to solve the mutation of loading capacity and rigidity of SRC-RC vertical hybrid frames and to avoid the formation of weak layers, the seismic performance of SRC-RC vertical hybrid frames were studied through static nonlinear analysis of seven conditions. The relationship between the bottom shear force and the lateral displacement at the top of the frame was obtained. The ultimate story displacement angle and plastic hinge distributions were also obtained. The results show that the ratio of the SRC layers to the total layers should not less than 1/3 to ensure the realization of lateral displacement of beam hinge. The weak layer may occur at the bottom layer of RC structure adjacent to SRC layer due to the mutation of rigidity and strength, and hence an appropriate increase in the number of longitudinal reinforcement at the RC columns adjacent to SRC layer or the decrease of shape steel arrangement in SRC columns adjacent to RC layer can gradually decrease the loading capacity and rigidity of the story, and improve the seismic performance of SRC-RC vertical hybrid frames.

Key words : steel reinforced concrete ; reinforced concrete ; hybrid structure ; nonlinear static analysis