

文章编号: 1673-5196(2007)04-0126-05

半刚接钢框架-内填RC剪力墙结构试件设计与分析

方有珍^{1,2}, 顾强¹, 颜鹏³

(1. 苏州科技学院 土木系, 江苏 苏州 215011; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘要: 基于已有的SRCW结构体系的研究成果,选择半刚性连接钢框架(柱弱轴)-RC剪力墙结构作为研究对象.结合相关结构设计规范,选择试件原结构方案.进行原结构设计时首先考虑竖向荷载组合对纯钢框架进行初步设计,进行地震作用组合下的验算时,剪力墙部分采取“等效板带”进行代换处理,利用有限元程序加以弹性分析,确保设计的合理性.进一步利用结构相似性原理,将原结构底部2层通过1/3缩放得到试验试件.

关键词: SRCW结构; 半刚接; 等效板带; 有限元

中图分类号: TU 318.2; TU 398.2 **文献标识码:** A

Design and analysis of specimen of composite steel frame with PR connected-RC infill wall structural system

FANG You zhen^{1,2}, GU Qiang¹, YAN Peng³

(1. Dept. of civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 3. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the available research achievements of SRCW structural system, a composite steel frame (weak axis of column) reinforced concrete infill shear wall structural system was taken as the subject to be investigated. Combined with the relevant structural design specification, a prototype structure was selected. While the prototype structure was being designed, firstly the gravity load combination was used to size the bare steel frame. Then the seismic load combination was adopted to check it. Where the shearing wall was replaced by "equivalent strut" and the program of FEM was utilized to conduct elastic analysis to assure its rationality. Moreover, the specimen of two story one bay was derived, which represented the bottom two stories of the prototype structure with about one third scale. Finally, some conclusions and suggestions were made for relevant research and design.

Key words: SRCW structure; semi rigid connection; equivalent strut; the finite element method

实际震害和工程抗震研究成果均表明,为了使结构具有良好的抗震性能,应使相应构件具有较大的变形能力,同时保证结构的整体侧向刚度,从而确保结构的正常使用.多年以来我国一直以砖混结构、钢筋混凝土结构作为主要的建筑结构形式.随着经济的发展,人们对建筑物的抗震性能要求越来越高.钢结构本身具有较好的抗震性能,加上钢结构轻质高强,结构构件尺寸较小,结构的整体侧移刚度偏低,常规钢结构设计中采用斜向支撑构件等措施来

满足要求,导致结构用钢量较大、造价较高^[1,2].随着人们对不同结构形式的特点认识的不断深入,钢-钢筋混凝土组合^[3]这一新型结构形式随之诞生,它充分发挥钢结构和混凝土结构各自的优点,在地震区具有较好的应用与发展前景.

Northridge地震(1994年)的震害结果分析表明,纯抗弯钢框架结构体系出现了意料不到的问题,特别在结构中的连接区域(FEMA, 2000)^[4].刚性连接的梁柱翼缘部位的焊缝,由于节点转动能力不足而产生了脆性裂纹,有的裂纹甚至渗透到柱的翼缘和腹板中,致使结构的震后修复工作规模大、费用昂贵.为了减少类似问题的出现,提出了系列措施,其中有:(1) 移除焊接衬板或对在焊接衬板和柱翼缘实

收稿日期: 2006-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(50378058)

作者简介: 方有珍(1972-),男,安徽望江人,博士,副教授.

施补焊等;2)对梁端部局部截面进行削弱处理,即相对加强节点,使得梁的塑性铰出现在节点域以外的梁截面削弱处,例如“狗骨式”节点作法,直接加强节点以保证建筑抗震要求的“强节点弱构件”^[5],例如在连接处的梁翼缘加盖板或梁腋.采用处理措施改进后的传统节点在塑性转动性能方面仍达不到设计要求,而“狗骨式”节点、焊接盖板节点、焊接梁腋节点能满足要求,但施工工艺复杂、造价较高.一种新的设计理念(即在钢框架连接避免使用全刚性节点)随之产生,可以降低钢框架对节点抗震性能的要求.这一理念促进了组合钢框架-内填RC(reinforced concrete)剪力墙结构体系(SRCW)的发展.

截止目前,SRCW结构方面的静力和循环荷载下的研究^[6~26]除了Xiangdong Tong等人1999年进行的试验^[25]按照钢框架柱强轴与RC剪力墙体垂直并采用半刚性连接(PR)之外,其他试验基本上采用梁截面全焊的刚性连接(FR)方式.选择钢框架柱弱轴垂直RC剪力墙体平面的布置方式和外伸端板的半刚性连接方式的SRCW结构进行循环荷载下滞回性能试验研究,进一步丰富了SRCW结构的试验研究成果,为这一结构体系在国内的工程应用提供了技术储备.

1 试验原结构方案

SRCW结构体系通常在大跨结构中采用,试件模型的原结构方案基于Shahrooz等人1996年^[22]和Tong等人1999年^[25]试验原结构方案,依据研究目的和我国的建筑结构的特点进行相应修改,具体平面布局详见图1.从图中看出其中纵向有4榀钢框架内填RC剪力墙(每榀RC剪力墙上留有较大的门洞),横向有类似的3榀钢框架.由这几榀钢框架所围成的区间用于电梯间或楼梯间.钢框架-内填

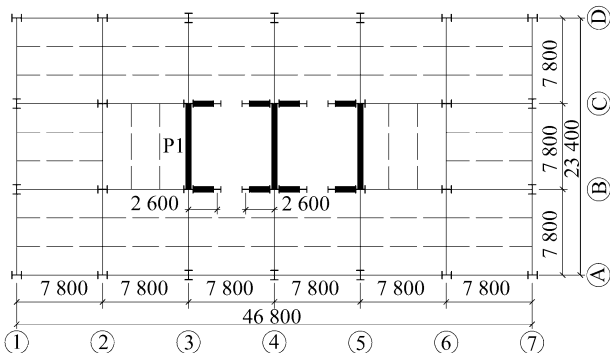


图1 弱轴钢框架内RC填充剪力墙结构的平面布置

Fig. 1 Plane layout of composite steel frame (weak axis of column) reinforced concrete infill shear wall structure

RC剪力墙作为整个结构的水平抗力体系,其它部分钢框架仅承担结构的竖向荷载.

参照国外的已有成果和结合国内的条件,选择所研究的结构体系为6层,层高为3.9 m,假定结构位于抗震设防烈度为8度地区.取图1中P1榀作为研究对象来进行二维平面分析与设计,根据SRCW结构的受力特点,初定P1榀承担结构总水平水平地震作用的1/3.

2 结构计算与设计

2.1 静力荷载设计

根据已有的研究成果:试件模型的原结构体系中结构的竖向荷载基本由钢框架承担.采用荷载组合(1.2D+1.4L)^[27,28],利用PKPM软件对纯钢框架部分进行内力分析和构件截面(选择组合截面)验算,以保证构件截面满足设计要求,构件截面尺寸见表1.

表1 原结构钢框架截面尺寸

Tab. 1 Dimensions of steel frame in prototype structure mm

层数	柱梁				钢材型号
	腹板 $b_w \times t_w$	翼缘 $b_f \times t_f$	腹板 $b_w \times t_w$	翼缘 $b_f \times t_f$	
底层	400×20	360×25	322×10	300×14	Q 345
2层					
3层	418×12	350×16	322×10	300×14	
4层			276×10	250×12	
5层	422×12	280×14	276×10	250×12	
6层			226×8	250×12	

注: $b_w t_w$ 为腹板宽度和厚度; $b_f t_f$ 为翼缘宽度和厚度.

2.2 水平地震作用验算

2.2.1 剪力墙等效宽度计算

根据相关的研究成果^[6,7,10,12,26],得到相应的剪力墙等效计算方法.将混凝土剪力墙等效为斜压板带(strut),斜压板带的等效宽度计算公式:

$$\lambda_h = \left[\frac{E_c t h^3 \sin^2 \theta}{4 E_s I} \right]^{1/4} \quad (1)$$

$$b = \frac{0.86 h \cos \theta}{\sqrt{\lambda_h}} \leq 0.45 h \cos \theta \quad (2)$$

式中: E_c 为内填充材料的弹性模量; E_s 为钢框架材料的弹性模量; t 为内填充墙的厚度; h 为层高; I 为钢框架柱的截面惯性矩; θ 为混凝土墙对角线与梁轴线夹角.计算结果见表2.

2.2.2 有限元分析

利用自己编制的平面刚架有限元程序对原结构在地震作用组合1.2G+1.3E作用^[5]下进行构件承载能力的弹性有限元分析验算.

1) 计算模型(图2).

表 2 各层剪力墙的等效斜压板带宽度寸

Tab. 2 Width of equivalent diagonal strut of RC wall in various stories mm

层数	底层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
墙厚/mm	250	200	200	200	200	200
λ_h	6.434	6.085	6.950	7.040	8.603	8.713
b	1 095.5	1 126.5	1 054.1	1 059.5	958.4	963.5

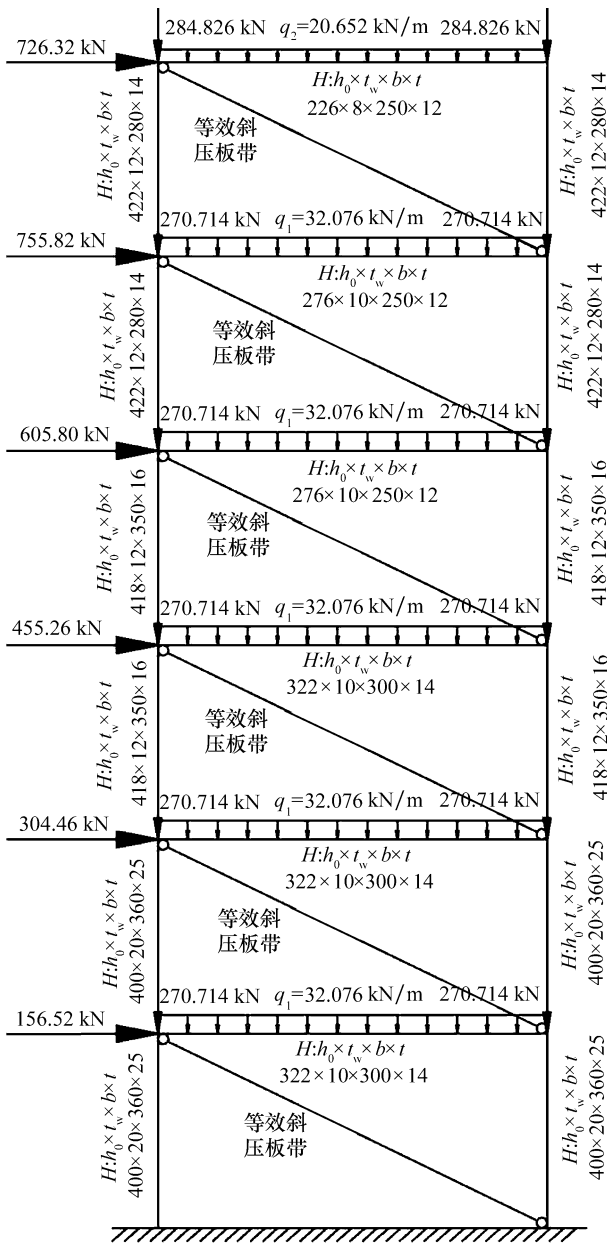


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Computation model of finite element

2) 计算结果与分析.

根据有限元程序计算结果, 绘制结构的 M (由于跨中 M 不大于端部较大的值, 而未标注)、N 图, 见图 3, RC 剪力墙与钢框架之间的水平剪力和抗倾覆弯矩分配关系, 分别见图 4、5.

从图 4、5 可以看出: ① RC 剪力墙承担的水平剪力为结构总水平的剪力 95% 以上, 与 Tong 等人

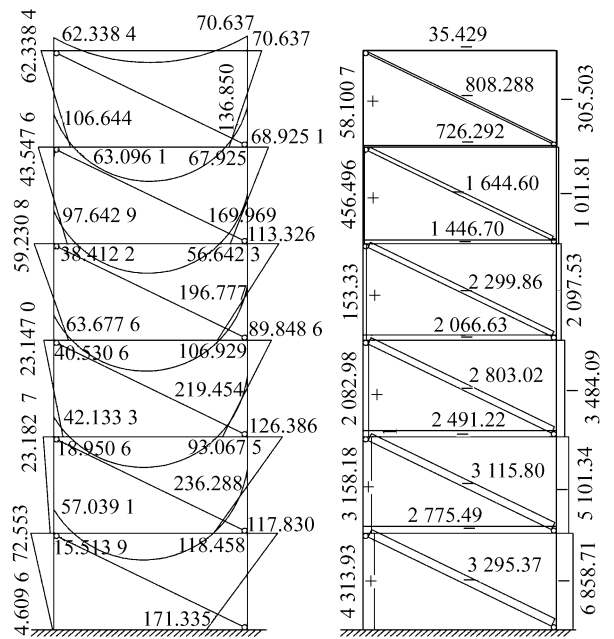


图 3 有限元计算结果

Fig. 3 Computation results with finite element method

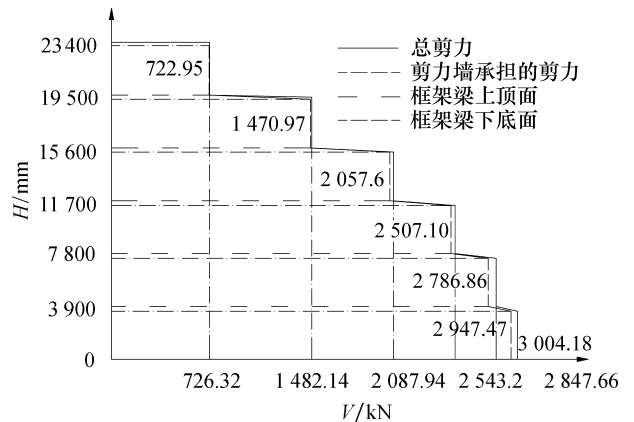


图 4 RC 剪力墙分担剪力与总剪力的关系

Fig. 4 Shear distribution between RC wall and structure

1999 年试验结果吻合; ② RC 剪力墙分担的结构总抗倾覆弯矩随着结果层数的增加而减小, 而通过内 RC 剪力墙简化算法计算得到底层的结果 (11.61%) 与国外的有限元理论分析 (约 30%) 和试验结果 (约 20%) 均存在较大的偏差, 经初步理论分析, 产生偏差的原因在于等效板带宽的简化算法是针对非整体钢框架内填充墙结构而言, 未考虑整体钢框架-RC 剪力墙结构钢框架与 RC 剪力墙较好的连接性能造成.

2.2.3 剪力墙设计

原结构分析采用等效斜板带代替剪力墙的作用. 根据有限元分析结果, 由于底层剪力墙分担的内力最大, 取底层相应内力, 再考虑剪力墙按承担大约

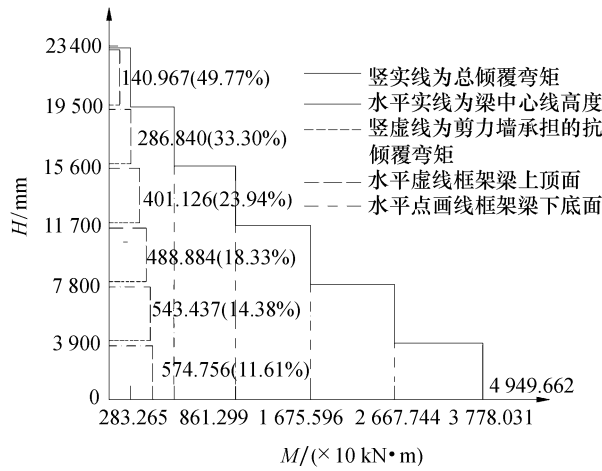


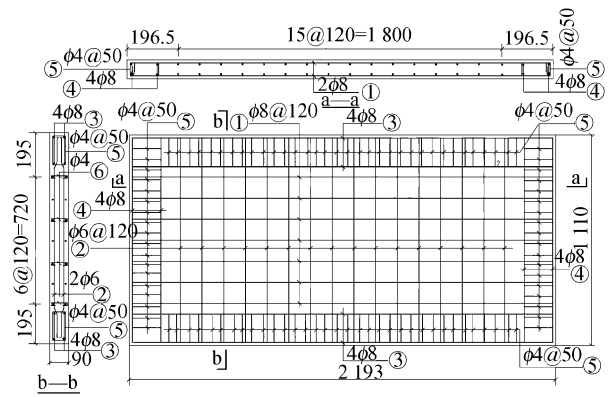
图 5 RC 墙体分担抗倾覆弯矩

Fig. 5 Distribution of the overturning moment to RC wall

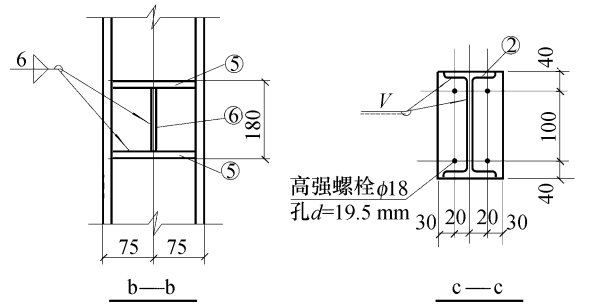
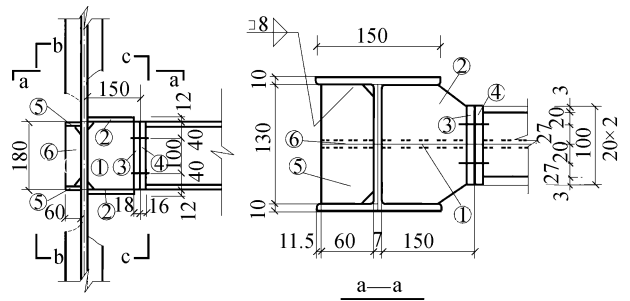
20% 的倾覆弯矩,按照《混凝土结构设计规范》^[30]进行剪力墙设计,混凝土等级取 C35,墙厚 250 mm,双层分布钢筋(竖向 $\phi 10@200$,水平抗剪 $\phi 14@200$,拉接筋 $\phi 6@400$),剪力墙周边设置暗柱、暗梁 250×400 (纵向 $6\phi 16$,箍筋 $\phi 8@200$)。

3 试件设计

将试件模型的原结构底部 2 层按照相似关系按 1 : 3 比例缩放得到试验试件,并根据相关规范^[27,30]分别对梁柱连接、连接面剪力钉和剪力墙进行设计。钢框架柱为热轧 HW150 型材,梁选择热轧 I 18 型材,梁柱钢材原型结构为 Q345,试件钢材选择 Q235,即 $S_e = 1.44 : 1$;剪力墙混凝土等级为 C35,所有钢筋均 HRB235 级,试件尺寸及构造见图 6;梁柱连接采用外伸端板的半刚性连接;剪力钉材性等级为 4.6 级, $d = 13 \text{ mm}$,梁墙连接面布置每边 17 个,间距 110 mm,柱墙每个连接面 7 个,间距 110 mm。



(b) 剪力墙配筋



(c) PR 连接构造

图 6 试件大样及结构构造

Fig. 6 Layout of specimen and construction details

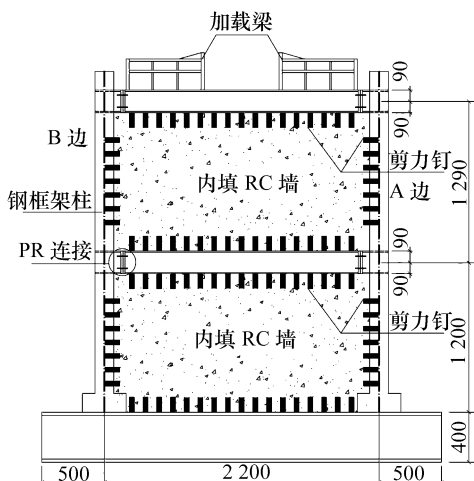
4 结论

根据以上设计,通过变化有限元计算模型中的设计参数(包括梁柱连接节点的简化和梁的截面尺寸)进行系列简化计算分析,得出以下结论:

1) SRCW 结构体系中,钢框架承担结构总倾覆弯矩的 80% 以上,与 Tong 等人 1999 年试验结果吻合。

2) SRCW 结构体系中,RC 剪力墙承担结构总水平剪力的 90% 以上,也与 Tong 等人 1999 年试验结果吻合。

3) 将梁柱连接节点从完全刚接改为铰接,试件模型的原结构侧移和内力变化不太明显,这有利于 SRCW 结构中梁柱连接节点采用半刚性连接方式。对连接要求有一定的刚度主要是为了保证结构在大震时能维持整个结构必要的强度和整体性。



(a) 试件大样

4) 对梁截面尺寸进行变动, 试件模型的原结构规律变化不大. 主要原因在于梁上下边均受 RC 剪力墙约束, 其主要作用是传递水平力.

5) 在小高层结构中采用 SRC W 结构, 钢框架的柱截面和内填 RC 剪力墙的厚度的选择, 应满足相应规范^[5, 27, 28, 29]中对此类结构的层间相对侧移和建筑物顶部总侧移的要求. 如果柱脚的内力过大, 以至采用常规基础作法难以满足要求, 而对基础进行处理将会提高造价, 为此, 建议采用如下处理措施:

- ① 在楼层位置梁增加外伸悬挑部分来降低抗倾覆弯矩和减小层间相对侧移;
- ② 通过改变结构平面布局以降低单跨 SRC W 结构的要求.

参考文献:

[1] 方有珍. 半刚接钢框架(柱弱轴)-内填 RC 剪力墙结构的滞回性能 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.

[2] 陈绍蕃. 钢结构设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[3] New England College. Proceedings of engineering foundation concrete [C]. New York: ASCE, 1987.

[4] Federal Emergency Management Agency. Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings. FEMA 350 [R]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[5] 中华人民共和国建设部. GB 50011-2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[6] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19: 473-478.

[7] ASCE. Proceedings of the ASCE [C]. New York: ASCE, 1966.

[8] MALLICK D V, SEVERN R T. Dynamic characteristics of infilled frames [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1968, 39: 261-288.

[9] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear strength of stud connectors in light weight and normal weight concrete [J]. Engineering Journal, ASCE, 1971, 8(2): 55-64.

[10] LI AU W T C. Test on multistory infilled frames subject to dynamic lateral loading [J]. ACI Journal, 1979, 76(4): 551-564.

[11] IAEE. Proceeding of the seventh world conference on earthquake engineering [C]. Michigan: University of Michigan Press, 1980.

[12] RORDER C W. Composite and mixed construction [M]. New York: ASCE, 1984.

[13] Architecture Institute of Japan. Synopses of the conference of architecture institute of Japan [C]. Tokyo: AIJ, 1985: 1 335-1 336.

[14] LI AU W T C, KWAN K H. Static and cyclic behavior of mul-

tistory infilled frames with different interface conditions [J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 99(2): 275-283.

[15] Architecture Institute of Japan. Synopses of the conference of architecture institute of Japan [C]. Tokyo: AIJ, 1986.

[16] Architecture Institute of Japan. Synopses of the conference of architecture institute of Japan [C]. Tokyo: AIJ, 1987.

[17] ACI. ACI special publication SP 103-4 [C]. Detroit: ACI, 1987.

[18] Architecture Institute of Japan. Synopses of the conference of architecture institute of Japan [C]. Tokyo: AIJ, 1994.

[19] KWAN A K H, XIA J Q. Shake table tests of large scale shear wall and infilled frame models [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 1995, 110(1): 66-77.

[20] MEHRABI A B, SHING P B, SCHULLER M P, et al. Experimental evaluation of masonry infilled RC frames [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 123(3): 228-237.

[21] NEGRO P, VERZELETTI G. Effect of infills on the global behavior of R/C frames: energy considerations from pseudodynamic tests [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(8): 753-773.

[22] SHAHROOZ B M, GONG B, ARNOL J. Seismic behavior and design of composite coupling beam [R]. Cincinnati: University of Cincinnati, 1996.

[23] MOSALAM K M, WHITE P N, GERGELY P. Static response of infilled frames using quasi static experimentation [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(11): 1 462-1 469.

[24] NAJAI A, KIRKY P. Collapse of infilled steel frames with semi rigid connections [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1998, 128: 103-111.

[25] TONG Xiangdong, SCHULTZ A E, HAJJAR T F, et al. Seismic behavior of composite steel frame reinforced concrete infill wall structural system [R]. Minneapolis: University of Minnesota, 2001.

[26] STAFFORDS B, CARTER C A. Method of analysis for infilled frames [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1969, 44: 31-48.

[27] 中华人民共和国建设部. GB 50017-2003 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

[28] 中国建筑技术研究院. JGJ 99-98 高层民用建筑钢结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[29] STAFFORDS B, CARTER C A. A method of analysis for infilled frames [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1969, 44: 31-48.

[30] 中华人民共和国建设部. GB 50010-2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.