# 轻钢构架钢骨混凝土剪力墙抗震性能试验

钱稼茹<sup>1</sup>, 黄勤翼<sup>1</sup>, 侯建群<sup>2</sup>, 任宝双<sup>2</sup>, 赵作周<sup>1</sup> (1清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室,北京 100084; 2清华大学建筑设计研究院,北京 100084)

[摘要] 为研究轻钢构架钢骨混凝土剪力墙的破坏形态、滞回特性、承载能力及变形能力等抗震性能,完成了 8 个 剪跨比为 2. 25 试件的拟静力试验。结果表明:试件的破坏形态为压弯破坏,轴压比高的试件墙底混凝土破坏的程 度比轴压比低的试件严重;顶点水平力-位移滞回曲线比较饱满,具有较长的峰值承载力稳定段;轴力作用下的受 弯承载力试验值大于计算值;极限位移角大于 1/100,变形能力随轴压比的增大而减小,边缘构件配箍特征值大的 高轴压比墙,同样具有大的变形能力。轻钢构架钢骨混凝土剪力墙的受弯承载力可按钢筋混凝土剪力墙计算,钢 骨用等面积钢筋代替,并可考虑轻钢构架 C 形钢和竖向钢筋的作用。

[关键词] 轻钢构架;钢骨混凝土剪力墙;抗震性能;轴压比;拟静力试验 中图分类号:TU375 文献标识码:A 文章编号:1002-848X(2011)02-0017-05

Tests on seismic behavior of lightweight-steel framework steel reinforced concrete shear walls

Qian Jiaru<sup>1</sup>, Huang Qinyi<sup>1</sup>, Hou Jianqun<sup>2</sup>, Ren Baoshuang<sup>2</sup>, Zhao Zuozhou<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Architectural Design and Research Institute of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study seismic behavior of lightweight-steel framework steel reinforced concrete (SRC) shear walls, quasistatic tests of 8 specimens with shear span ratio of 2.25 were carried out. The test results indicate that the specimens fail in compression-bending mode. Damage of concrete at the bottom of the wall is much serious for the specimens with high axial load ratio than the specimens with low axial load ratio. The top lateral load-displacement hysteretic loops are plump, and the peak lateral load keep stable with a large lateral displacement increment. The ultimate drift ratios of the specimens are larger than 1/100, and the deformation capacity of the specimens decreases with increasing of the axial load ratio. The walls with high axial load ratio have great deformation capacity when the boundary elements of the wall have a large value of stirrup characteristic ratio. The flexural strength of the lightweight-steel framework SRC shear walls can be calculated by the flexural strength formula of the RC shear walls, and the C type lightweight-steel and the vertical distributed reinforcements can be taken into account.

Keywords:lightweight-steel framework; SRC shear wall; seismic behavior; axial load ratio; quasi-static test

0 引言

轻钢构架混凝土剪力墙结构是一种新型的工业 化住宅建筑体系,其现浇剪力墙采用轻钢构架和固 模作为免拆模板,轻钢构架和固模在工厂预制、现场 安装,从而实现工业化生产。轻钢构架以轻型薄壁 U形钢、L形钢或C形钢(简称轻型钢)为竖向骨 架,以扁钢、圆钢或轻型钢等为水平拉条,通过铆接、 焊接或卡固,形成格构式钢架;固模为固定在轻钢构 架两侧的免拆面板或钢板网。

目前,对于多层住宅建筑轻钢构架混凝土剪力 墙结构的抗震性能、设计方法等已有比较系统的研 究<sup>[1-3]</sup>,并且已经建造了一栋4层轻钢构架混凝土剪 力墙住宅建筑。轻钢构架混凝土剪力墙结构用于高 层建筑时,其边缘构件内纵向钢筋在每层楼面位置 的连接有一定困难,解决的方法之一是用钢骨代替 边缘构件内的纵向钢筋,成为轻钢构架钢骨混凝土 剪力墙。钢骨的长度与层高相同,在每层楼面以上 适当高度采用焊接连接。对于普通钢骨混凝土剪力 墙的抗震性能等已经有一些试验研究<sup>[4-8]</sup>。通过 8 个剪跨比为 2.25 的轻钢构架钢骨混凝土剪力墙在 不同轴压比和往复水平力作用下的拟静力试验,研 究其破坏形态、变形能力和抗弯承载能力等抗震性 能,为这种免拆模板、现浇混凝土的工业化剪力墙住 宅体系在高层建筑中的应用提供试验依据。

- 1 试验概况
- 1.1 试件设计

8 个轻钢构架钢骨混凝土剪力墙试件的编号为 W01~W08,均为矩形截面,外形尺寸相同,墙高 2 800mm,截面长1 300mm,截面厚 160mm。试件高 宽比为 2.15,截面高厚比为 8.13。墙顶设置加载用 钢筋混凝土梁,墙底设置地梁,与剪力墙浇筑成整 体。试件立面见图 1。试验加载装置见图 2。

作者简介:钱稼茹 教授 ,Email:qianjr@ tsinghua.edu.cn。



试件的轻钢构架由竖向6道带圆孔的C形钢、 水平向4道15mm×15mm×1.0mm的槽钢组成,两 者之间点焊连接。C 形钢外形如图 3 所示,其尺寸 列于表1。

18

В	b	R	t	L	A
31.1	9.3	56.9	1.5	85.1	203.7

注: t 为厚度 A 为截面面积 / mm<sup>2</sup> ,其余符号含义见图 3。

试件的主要变化参数 为约束边缘构件内配置的。 槽钢、约束边缘构件的配 箍特征值以及试件轴压 比。 W01, W03, W05 和 图3 C 形钢外形示意图

Η 100.4



表1

W07 两端边缘构件内各配置一根 6 号槽钢; W02, W04,W06和W08两端边缘构件内各配置一根10 号槽钢;槽钢中心点距墙的近端为120mm。试件的 竖向钢筋为 12 根中 8 钢筋 ,W01 ~ W04 两端边缘构 件内各2根,另外8根为竖向分布筋;W05~W08两 端边缘构件内各4根,另外4根为竖向分布筋。 W01~W04 两端约束边缘构件距墙底1 300mm 范围 内配置箍筋中 8@ 100,1 300mm 以上配置箍筋中 8 @150;W05~W08两端约束边缘构件距墙底1300 mm 范围内配置箍筋中 10@ 100 ,1 300mm 以上配置 篩節 中 10@ 150。 试件按强剪弱弯设计,水平分布 筋为中 12@150 配置在轻钢构架外侧。8 个试件的 主要参数列于表2。轻钢构架示意及墙体截面尺寸 与配筋见图45。





图 5 墙体截面尺寸与配筋

试件参数									
试件	$A_s/mm^2$	ξ/%	$l_{\rm c}/{ m mm}$	λ,	$f_{\rm cu}/{ m MPa}$	N/kN	n <sub>t</sub>	$n_{\rm d}$	
W01	845	2.51	210	0.172	37.5	650.3	0.105	0.2	
W02	1 274	3.79	210	0. 183	35.3	611.5	0.105	0.2	
W03	845	2.51	210	0.161	40.3	1 395.7	0.211	0.4	
W04	1 274	3.79	210	0.171	37.8	1 395.7	0.211	0.4	
W05	845	2.03	260	0.330	36.7	1 591.2	0.263	0.5	
W06	1 274	3.06	260	0.300	40.3	2 097.7	0.316	0.6	
W07	845	2.03	260	0.307	39.5	2 052.3	0.316	0.6	
W08	1 274	3.06	260	0.306	39.6	1 714.3	0.263	0.5	

注:A。为边缘构件内配置的槽钢截面面积; <>>> 为钢骨配钢率 ,为配置的槽 钢截面面积与边缘构件截面面积之比; l。为约束边缘构件长度; λ、为约束边 缘构件距墙底1 300mm 范围内配箍特征值的试验值;f\_,,为实测混凝土立方体 抗压强度; N 为施加的轴压力; n, 和 n, 分别为轴压比试验值和设计值,计算 时 fc 分别取 0.76fcn和 0.5fcn,轴压力分别取 1.0N 和 1.2N。

### 1.2 加载制度与量测内容

试验方法为轴压力作用下施加往复水平力的拟 静力试验。首先施加轴压力,试验过程中保持不变, 施加轴力的千斤顶可以随试件水平位移而移动;然 后施加往复水平力,先加推力(为正向加载),后加 拉力(为反向加载)。水平力加载位置距墙底截面 2 920mm,试件剪跨比为 2.25。试件屈服前按力控 制加载,每级荷载循环一次;试件屈服后为位移控 制,每级位移循环两次。

试验量测内容包括:施加的轴压力和水平力,沿 试件高度的水平位移,钢骨纵向应变,C形钢纵向应 变 墙内竖向钢筋应变 地梁预埋插筋应变。试验过 程中,观察记录裂缝的出现、发展及混凝土破坏等。

- 试验结果与分析 2
- 2.1 破坏过程

低轴压比和中高轴压比试件的破坏过程不完全 相同。图6为试件破坏后裂缝分布和照片。轴压比 设计值为 0.2 的 W01 和 W02 的破坏过程为:水平 力为150kN前后,墙底截面出现第1条水平裂缝; 水平力为 250kN 时,墙底部出现多条较短水平裂 缝,试件屈服;水平位移为 20mm 左右时,墙根水平



图 6 试件破坏后的裂缝分布和照片

裂缝连通,受压侧出现竖向裂缝,水平裂缝高度达到 1/2 墙高,水平力接近峰值;此后,墙体上部水平裂 缝基本不发展,底部通缝随着水平位移的增大而加 宽;水平位移达到 60mm 左右,水平力无明显下降, 受压侧混凝土压碎不严重,试件底部已形成通缝,试 验结束。

轴压比设计值为 0.4 0.5 和 0.6 的 W03 ~ W08 的破坏过程为:水平力为 200 ~ 300kN 左右时,墙底 截面出现第 1 条水平裂缝;水平力为 300 ~ 500kN 时 墙底部出现少量水平裂缝,试件屈服;水平位移 为 20 ~ 25mm 左右时,水平力接近峰值;随位移的增 大,墙底截面的水平裂缝连通,墙体水平裂缝基本出 齐,腹板形成交叉斜裂缝,受压裂缝增加,墙根部混凝土压酥崩落,同时,墙体腹板沿C形钢出现通长竖向裂缝;水平位移达40~50mm时,受压区混凝土 大面积压坏崩落,混凝土破坏延伸到受压腹板,C形 钢与插筋压屈现象明显,试件水平力下降到最大值的85%,试验结束。

试件的破坏形态为压弯破坏。轴压比设计值为 0.2的 W01 与 W02,混凝土压坏的范围小;轴压比 设计值为 0.4 0.5 和 0.6 的 6 个试件,混凝土压坏 的范围大,且破坏严重。

## 2.2 滞回曲线

8 个试件的顶点水平力-位移滞回曲线见图 7。 滞回曲线比较饱满,没有明显捏拢现象,具有较长的 峰值承载力稳定段。轻钢构架钢骨混凝土剪力墙的 滞回曲线与普通 SRC 剪力墙<sup>[9]</sup>类似。

2.3 承载能力

定义剪力墙最外侧钢骨屈服为试件的屈服点。 试件的屈服水平力 *F*,和峰值水平力 *F*,见表 3。结 果表明:承载能力随着轴压比的增大、边缘构件内钢 骨面积的增加而增大。

计供的承书能力和亦形能力

城市功承维能力和受形能力 衣											
试件	加载	屈服			峰值			极限			
编号	方向	$F_y/kN$	$\Delta_y/\mathrm{mm}$	$\theta_y$	$F_{\rm p}/{ m kN}$	$\Delta_{ m p}/ m mm$	$\theta_{\rm p}$	$\Delta_{\rm u}/{ m mm}$	$\theta_{\mathrm{u}}$	$\mu_{\Delta}$	
W01	+	271.8	9.92	1/294	314.9	28.45	1/103	58.04	1/50	5.85	
	-	279.7	11.92	1/245	316.3	28.15	1/104	58.30	1/50	4.89	
woo	+	313.5	15.43	1/189	355.4	29.13	1/100	57.88	1/50	3.75	
W02	-	331.5	12.49	1/234	363.8	29. 77	1/98	60.71	1/48	4.86	
W03	+	401.5	11.58	1/252	433.7	23.61	1/124	48.77	1/60	4.21	
	-	396. 9	10.06	1/290	435.4	22.88	1/128	45.81	1/64	4.55	
WOA	+	397.3	11.58	1/252	462.6	24.15	1/121	48.64	1/60	4.20	
W 04	-	419.8	12.05	1/242	464.3	23.63	1/124	44.68	1/65	3.71	
W05	+	421.4	10.79	1/270	443.1	22. 79	1/128	48.20	1/61	4.47	
w 05	-	380.0	9.32	1/313	451.8	23.55	1/124	45.07	1/65	4.84	
WOO	+	490.3	13.75	1/212	576.3	18.21	1/160	38.14	1/77	2.77	
w 00	-	467.5	14.80	1/197	554.4	18.91	1/154	38.51	1/76	2.60	
W07	+	439.2	12.12	1/241	482.3	22.56	1/130	35.90	1/81	2.96	
WU/	-	436.6	12.04	1/242	497.4	24.13	1/121	36.13	1/81	3.00	
WOP	+	439.5	8.48	1/344	503.6	29.50	1/98	45.77	1/64	5.40	
w 08	-	463.6	9.81	1/297	517.1	24.02	1/122	42.77	1/68	4.36	

注:+为推,-为拉。

表4列出了试件在轴力作用下的受弯承载力试验值 *M*<sub>4</sub>和计算值 *M*<sub>6</sub>。试验值取推拉最大水平力的平均值与加载点高度的乘积;计算值按《高层建筑 混凝土结构技术规程》(JGJ3—2002)<sup>[10]</sup>钢筋混凝土 剪力墙受弯承载力的公式计算,边缘构件内的钢骨 用等面积的钢筋代替,材料强度取实测值,*M*<sub>61</sub>和 *M*<sub>62</sub>分别为考虑及不考虑 C 形钢和竖向钢筋作用的 计算值。结果表明:考虑 C 形钢和竖向钢筋对承载 力的作用,低轴压比试件受弯承载力提高约 15%,

≠ **2** 



图 7 试件顶点水平力-位移滞回曲线

受弯承载力计算值与试验值比较/kN•m 表4

试件编号	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08
M <sub>t</sub>	922	1 050	1 269	1 353	1 306	1 650	1 430	1 490
$M_{c1}$	939	989	1 281	1 335	1 319	1 556	1 464	1 448
$M_{c2}$	788	859	1 129	1 205	1 166	1 426	1 311	1 318

中高轴压比试件受弯承载力提高约 10%;钢骨为 6 号槽钢的试件, $M_1$ 比 $M_{e1}$ 小约 1%~2.4%;钢骨为 10 号槽钢的试件, $M_1$ 大于 $M_{e1}$ ;8个试件的 $M_1$ 都大 于 $M_{e2}$ 。可见,轻钢构架钢骨混凝土剪力墙在轴力 作用下的受弯承载力可按钢筋混凝土剪力墙计算, 钢骨用等面积钢筋代替,并可考虑 C 形钢和竖向钢 筋的作用。

## 2.4 变形能力

试件屈服、峰值和极限时的顶点水平位移( $\Delta_y$ ,  $\Delta_p$ ,  $\Delta_u$ )与位移角( $\theta_y$ ,  $\theta_p$ ,  $\theta_u$ )、位移延性系数  $\mu_{\Delta}$  见表

3。定义顶点位移角  $\theta = \Delta/H \Delta$  为顶点水平位移 H为测点高度,即2925 mm;定义位移延性系数 $\mu_{\Lambda}$ =  $\Delta_{u}/\Delta_{v}$ 。 屈服位移为试件达到屈服点时的顶点水平 位移;极限位移为试件达到极限点时的顶点水平位 移,定义水平力下降至0.85峰值水平力时为极限 点。结果表明:轴压比设计值为 0.2 的试件 W01, W02,其边缘构件配箍特征值约为 0.17 和 0.18,峰 值位移角和极限位移角均值均分别约为 1/100 和 1/50;轴压比设计值为 0.4 的试件 W03, W04, 其配 箍特征值约为 0.16 和 0.17,峰值位移角和极限位 移角均值均分别约为 1/124 和 1/62;轴压比设计值 为 0.5 的试件 W05, W08, 其配箍特征值约为 0.3, 峰值位移角和极限位移角均值均分别约为 1/118 和 1/65;轴压比设计值为 0.6 的试件 W06, W07, 其配 箍特征值约为 0.3,峰值位移角和极限位移角均值 均分别约为1/141 和1/79。可见,试件的变形能力 随轴压比的增大而减小;边缘构件配箍特征值大的 高轴压比墙,同样具有大的变形能力;钢骨含钢率的 影响不明显。

2.5 钢构件的应变

图 8 给出了 W07 代表性钢构件应变编号,图 9 为 W07 的实测水平力--钢骨应变、C 形钢应变和钢 筋应变关系曲线,其他试件的水平力--应变关系曲线 与其类似。

在距墙底截面约400mm 处,竖向分布筋的应变 与 C 形钢的应变基本一致,可见 C 形钢能够起到抗 弯的作用,见图9(b)。插筋在地梁顶面即剪力墙底 截面的应变大于竖向分布钢筋距墙底截面约 400mm 处的应变,这是因为墙底截面的弯矩大,同 时也说明了通过搭接,可以有效传递钢筋应变(应 力),见图9(c)。由图9(d)可知,地梁顶面相同高 度位置的插筋和钢骨的应变总体上比较接近。图9 (e),(f)表明,埋置在地梁内的钢骨,靠近地梁顶的 应变远大于靠近地梁底的应变,钢骨上围焊钢筋对 于钢骨的锚固作用显著。



图 8 W07 钢构件应变片编号

3.1 结论

由 8 个剪跨比为 2.25 的轻钢构架钢骨混凝土



图 9 W07 主要钢构件应变图

剪力墙的拟静力试验,可以得到以下结论:

(1)试件的破坏形态为压弯破坏,轴压比设计 值为0.2的试件墙底混凝土压坏的范围小,轴压比 设计值为0.4 0.5 和0.6的试件墙底混凝土压坏的 范围大,且压溃严重。

(2)顶点水平力-位移滞回曲线比较饱满,且具 有较长的峰值承载力稳定段。

(3) 试件的极限位移角都大于 1/100; 变形能力 随轴压比的增大而减小; 边缘构件配箍特征值大的 高轴压比墙,同样具有大的变形能力。

(上接第48页)

- [5]卫星,李俊,强士中.网壳结构铸钢球节点弹塑性分析及试验研究[J].建筑结构学报,2005,26(1):45-51.
- [6]邓开国,李巧.重庆袁家岗体育中心体育场网壳铸钢
   节点设计[J].建筑结构,2005,35(8):52-56.
- [7] HAN Q H, LIU X L. Ultimate bearing capacity of the welded hollow spherical joints in spatial reticulated structures [J]. Engineering Structures, 2004, 26(1): 73-82.
- [8]汤安民,汪静.几种金属材料断裂形式变化规律的试

3.2 建议

(1)轻钢构架钢骨混凝土剪力墙轴力作用下的 受弯承载力可按钢筋混凝土剪力墙计算,钢骨用等 截面面积的钢筋代替;轻型钢及竖向分布钢筋与预 埋插筋有可靠搭接时,可将边缘约束构件内部轻型 钢按照最小截面计入钢骨面积,计算剪力墙的压弯 承载力;计算延性相关系数时则不应考虑在内。

(2) 轻钢构架钢骨混凝土剪力墙的轴压比设计 值不宜大于 0.5 不应超过 0.6。

#### 参考文献

- [1] 冯鹏,初明进,侯建群,等.钢网构架混凝土复合结构
   多层住宅足尺模型抗震性能试验研究[J].建筑结构
   学报,2009,30(3):1-10.
- [2]初明进,冯鹏,侯建群,等.钢网构架混凝土复合结构 多层住宅墙体抗震性能试验研究[J].土木工程学报, 2009,40(7):36-45.
- [3]邓超,陈忠范.钢网构架混凝土复合墙体的试验研究[J].江苏建筑,2006(5):17-19.
- [4] 王志浩,方鄂华,钱稼茹. 钢骨混凝土剪力墙的抗弯性
   能[J]. 建筑结构,1998,28(2):13-16.
- [5] 乔彦明, 钱稼茹, 方鄂华. 钢骨混凝土剪力墙抗剪性能的研究[J]. 建筑结构, 1995, 25(8):3-7.
- [6]魏勇.外钢框架-混凝土核心筒结构抗震性能及设计方 法研究[D].北京:清华大学 2006.
- [7]武敏刚,吕西林. 钢骨联肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 结构工程师,2004,20(5):52-56.
- [8]吕西林,董宇光.截面中部配置型钢的混凝土剪力墙 抗震性能研究[J].地震工程与工程振动,2006,26 (6):101-107.
- [9] 钱稼茹,魏勇,赵作周,等.高轴压比钢骨混凝土剪力 墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2008,29 (2):43-50.
- [10] JGJ3-2002 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 2002.

验分析 [J]. 实验力学, 2003, 18(4):440-444.

- [9] RICE J R, TRACY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(2): 201-217.
- [10] 郑长卿. 金属韧性破坏的细观力学及其应用研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [11] 杨卫. 宏微观断裂力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [12]张建强,张富巨,赖荆平.应力状态对16Mn钢焊接 接头断裂行为的影响[J].武汉水利电力大学学报, 1998,31(2):51-55.