

# 冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙延性试验结果分析

李耕勤

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 通过5片以冷轧带肋钢筋焊接网作为分布筋、按《建筑抗震设计规范》GB50011-2001设置约束边缘构件的矩形、工形和T形截面剪力墙在反复荷载作用下的试验,研究了在中、高轴压比下的冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙的延性、变形能力及截面的应变分布;由极限破坏时截面应变分布的试验结果,计算剪力墙沿高度的位移分布,所得结果与试验结果比较验证了计算方法的合理性。结果表明,冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙具有较大的延性和变形能力,为冷轧带肋钢筋焊接网作为剪力墙分布筋的推广应用提供了试验依据。

**关键词:** 冷轧带肋钢筋焊接网; 剪力墙; 约束边缘构件; 延性

**中图分类号:** TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0103-05

## Experimental Study on Ductility of Shear Walls with Cold-rolled Ribbed Welded Steel Fabric

Li Geng-qin

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Pseudo-static experiment of five solid shear wall specimens with cold-rolled ribbed welded steel fabrics as the distributed reinforcements are simply introduced in this paper. The specimens are rectangular section, I section and T section respectively. The confined boundary elements of the specimens are designed according to "Code for Seismic Design of Buildings" (GB50011-2001). Behaviors of shear wall such as deformation capacity, ductility and section strain distribution are investigated. The displacement distribution along wall height was calculated by means of related formulae based on the tested bar strains. The rationality of the calculation way was verified by the comparison between the analytical results and experimental results. The research indicates that shear walls have better ductility and deformation capacity, and experimental basis for shear walls with cold-rolled ribbed welded steel fabrics as the distributed reinforcements is obtained.

**Key words:** cold-rolled ribbed welded steel fabric; shear wall; confined boundary element; ductility

### 0 引言

冷轧带肋钢筋焊接网与手工绑扎的普通热轧钢筋相比,具有强度高、钢材省、施工方便、施工速度快、施工质量高、综合经济效益好等优点。在国外,钢筋焊接网已广泛应用于工业与民用建筑的楼屋盖、墙体、薄壳、挡土墙、混凝土路面等混凝土结构中。我国冷轧带肋钢筋焊接网也正在得到广泛、快速的推广应用,一些设计、施工单位已积累了一定经验。但冷轧带肋钢筋没有屈服平台,变形性能差。剪力墙采用冷轧带肋钢筋焊接网作为分布钢筋时,如何保证其具有足够大的延性和变形能力,还需大量的试验研究。

本文在文献[2]的基础上,进一步对其试验结果进行分析,研究中、高轴压比冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙的延性性能及截面的应变分布;由破坏时截面应变分布的试验结果,计算剪力墙沿高度的位移分布,并与试验结果比较,验证计算方法的合理性。

收稿日期:2003-02-26.

作者简介:李耕勤(1966~),女,硕士,讲师;主要研究方向:防灾减灾工程、结构工程。

## 1 试验情况简介

为探讨中高轴压比、截面形式等因素对冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙延性性能的影响,通过五片剪力墙试件(其中,CW-1~CW-3为矩形截面,CW-4为工字形,CW-5为T形)进行恒定轴力,反复水平荷载作用下的试验。

五片墙都按《建筑抗震设计规范》<sup>[1]</sup>GB50011-2001(以下简称《规范》)设置约束边缘构件:约束边缘构件的纵筋采用变形性能好的HRB335级热轧钢筋;矩形端约束边缘构件长 $0.2h_w$ ( $h_w$ 为墙截面高度),翼墙端约束边缘构件长 $0.15h_w$ ,约束边缘构件配箍特征值约为0.2,但由于CW-1的混凝土实际强度低于设计值,使其配箍特征值大于《规范》规定值较多,CW-3约束边缘构件的长度小于《规范》规定值,以研究减小约束边缘构件的长度的影响;试件的高宽比为1.9(以水平加载位置计则高宽比为2.0),试件为中高剪力墙;冷轧带肋钢筋焊接网作为分布筋,计算试件的承载力时,考虑其作用。

在纵向分布筋和约束边缘构件纵筋距底截面20mm处布置了应变片;沿试件中线距底面330mm,660mm,1000mm,1450mm和1850mm的高度位置布置了5个电子位移计,以量测相应高度的水平位移。轴向荷载、水平荷载分别采用两个600kN的轮辐式测力计量测。

试验在静力试验台座上进行,在施加水平荷载前,先将竖向荷载加到预定值,水平荷载则分级反复施加,最外侧纵筋受拉屈服前采用荷载控制,屈服后采用位移控制。所有数据用计算机采集、记录。

## 2 延性试验结果及分析

### 2.1 滞回特性

图1为试件的水平力-顶点位移滞回曲线。可以看出,五个试件滞回曲线的形状比较接近。在试件屈服前,试件已表现出非线性性能,但卸载后的残余变形较小;试件屈服后,残余变形增大。总体上,试件的滞回曲线所包围面积较大,捏拢现象不严重,有较大的耗能能力。

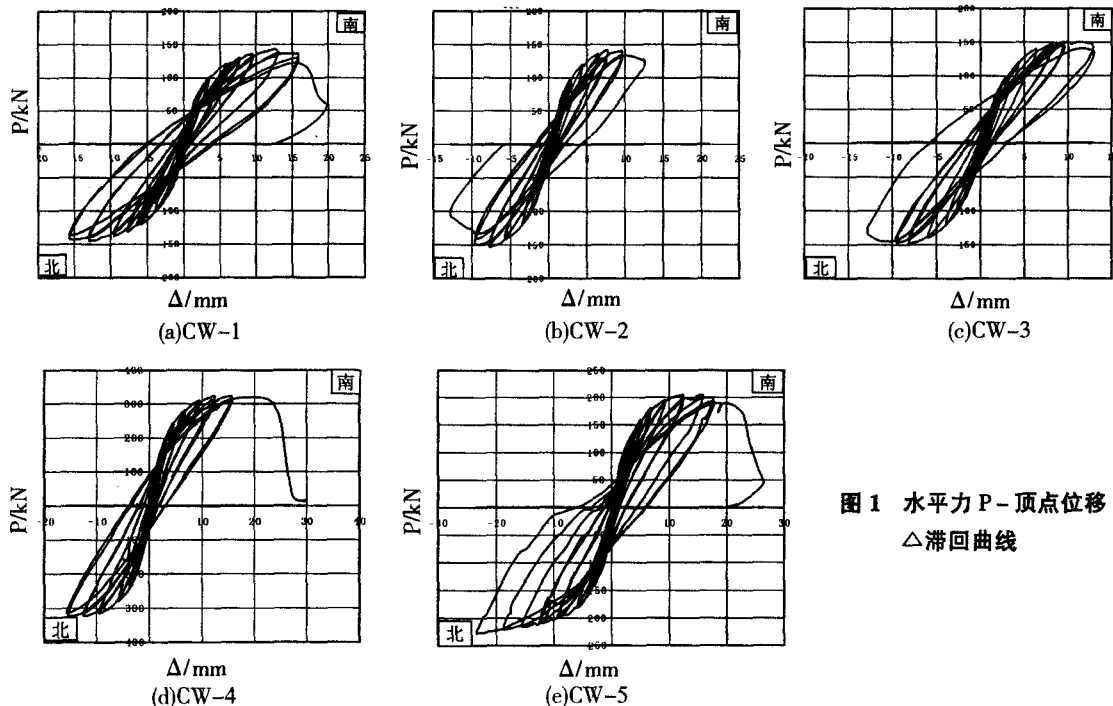


图1 水平力P-顶点位移 $\Delta$ 滞回曲线

### 2.2 延性及变形能力

图2为试件CW-1~CW-5的水平力P-顶点位移 $\Delta$ 滞回曲线的包络线。包络线为同一方向各加载循环最大荷载点的连线。试件的屈服点和极限点可由P- $\Delta$ 滞回曲线包络线确定,用几何作图法<sup>[3]</sup>确定试件的屈服点,极限点取水平力下降至最大水平力的85%所对应的点,试验过程中常因为各种原因,P-

△曲线无下降段或水平力没有下降至最大水平力的 85%, 则取试验达到的最大位移点为极限点. 主要试验结果列于表 1.

表 1 主要试验结果

试件编号及加载位置	$n$	$P_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$P_{max}$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$\mu$	$\theta$
CW-1	南	107.6	4.09	138.2	17.5	4.28	1/106
	北	-118.8	-4.92	-144.7	-15.7	3.20	1/118
CW-2	南	120.3	4.53	141.3	12.6	2.79	1/147
	北	-127.4	-4.19	-152.5	-11.1	2.65	1/167
CW-3	南	125.3	4.91	150.9	12.9	2.63	1/143
	北	-123.4	-4.31	-146.9	-12.9	2.99	1/144
CW-4	南	254.4	5.20	322.2	22.2	4.27	1/83
	北	-256.3	-4.51	-317.1	-15.7	3.48	1/118
CW-5	南	155.0	5.00	201.2	20.2	4.04	1/92
	北	-170.5	-5.02	-221.3	-22.9	4.56	1/81

注:  $n$ —轴压比试验值,  $n = N/(f_c A)$ ,  $N$  为试验时的实际轴向力,  $A$  为试件截面面积,  $f_c$  取  $0.76f_{cu}$ ;  $P_y$ 、 $\Delta_y$ —屈服荷载和屈服位移;  $P_{max}$ —最大水平荷载;  $\Delta_u$  试件达到的最大水平位移或承载力下降 15% 所对应的水平位移;  $\mu$ —位移延性系数,  $\mu = \Delta_u/\Delta_y$ ;  $H$ —位移测点高度, 即 1 850 mm;  $\theta$ —极限位移转角,  $\theta = \Delta_u/H$ .

需要说明的是: CW-1 南加载时北端混凝土压坏, 北加载时试件出平面破坏, 可认为南加载达极限变形能力. 工字形截面试件 CW-4 南加载破坏, 即北端翼缘混凝土受压破坏, 已不能继续北加载, 即南端翼缘混凝土尚未破坏; T 形截面试件 CW-5 也是南加载破坏, 即矩形端混凝土受压破坏, 已不能继续北加载, 即南端翼缘混凝土尚未破坏. 表 1 中给出的 CW-4 和 CW-5 北加载的试验结果, 为南端翼缘尚未破坏时的结果.

CW-1 ~ CW-5 的位移和延性的试验结果可归纳为:

一字形剪力墙(包括 T 形截面剪力墙矩形端受压破坏(即 CW-5 南加载)的情况): 轴压比试验值为 0.353、0.406(换算成设计值为 0.67、0.76)的试件(CW-2、CW-3), 位移延性比为 2.6 ~ 3.0, 极限位移角为 1/150 左右; 轴压比试验值为 0.264(设计值为 0.5)的试件(CW-1), 位移延性比为 4.28(南加载)和 3.2(北加载), 极限位移角为 1/106(南加载)和 1/118(北加载); 轴压比试验值为 0.176(设计值为 0.34)的试件(CW-5 南加载), 位移延性比为 4.04, 极限位移角为 1/92.

工字形剪力墙(包括 T 形截面剪力墙翼缘端受压的情况): 轴压比试验值为 0.353(设计值为 0.67)的试件, 位移延性比和极限位移角分别为 4.27 和 1/83(CW-4 南加载破坏的数值); 轴压比试验值为 0.176(设计值为 0.34)的试件 CW-5, 翼缘端受压但尚未破坏时, 位移延性比和极限位移角已分别为 4.56 和 1/81(北加载).

### 2.3 试件截面的应变分布

图 3(a) ~ (e) 分别为试件 CW-1 ~ CW-5 在开裂、屈服、极限破坏三个时刻沿截面高度的应变分布图. 其中开裂时刻为试验过程中出现第一条可见水平裂缝的时刻; 屈服时刻指按作图法确定屈服点所对应的时刻(细线表示)或指最外侧受拉钢筋达到屈服应变的时刻(粗线表示); 极限破坏时刻为 2.2 部分延性和变形能力中所定义的时刻. 结果表明:

- 1) 竖向钢筋应变沿截面高度大致线性分布;
- 2) 约束边缘构件最外侧钢筋达到屈服时的截面各个测点的应变大于用作图法确定的屈服状态各点应变;
- 3) 达到极限破坏状态时, 一字形墙混凝土压应变最大达 0.015, 端部纵筋拉应变最大达 0.01; 工字型墙混凝土压应变最大达 0.011, 端部纵筋拉应变最大达 0.016;

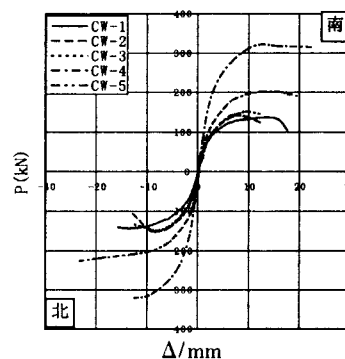
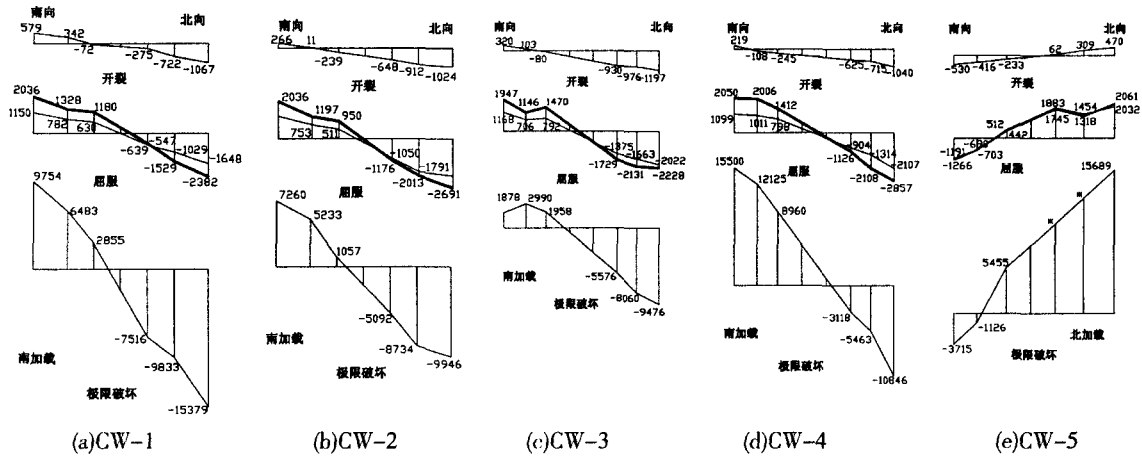


图 2 水平力-顶点位移  
滞回曲线的包络线

4) 达到极限状态时,冷轧带肋竖向分布钢筋的最大拉应变不大于0.01,而由静力材料力学性能测试知,550级 $\phi 6$ 的冷轧带肋钢筋对应极限应力时的极限应变为0.03,因此,竖向分布钢筋不会被拉断,这与观察到的试验现象相符。



(\*表示未获得部分钢筋的应变)

图3 试件开裂、屈服、极限破坏时截面应变分布图( $\times 10^{-6}$ )

2.4 试件沿高度的水平位移研究

根据前述试验结果,应变沿截面高度的分布在变形后基本保持线性.假定剪力墙的应变符合平截面假定.由极限破坏时截面应变分布的试验结果,采用一些计算模式,计算剪力墙沿高度的位移 $\Delta_u$ 分布,并与试验结果比较.计算步骤如下:

- 1) 由极限破坏时的应变分布试验结果确定受压区高度 $x_n$ 及受压混凝土边缘极限压应变 $\epsilon_{cu}$ .
- 2) 计算极限曲率 $\varphi_u$

表2 试件屈服曲率试验值 $\varphi_{yt}$ 与式(2)计算值 $\varphi_{yc}$

$$\varphi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{x_n} \quad (1)$$

- 3) 计算屈服曲率 $\varphi_y$

$$\varphi_y = \frac{2\epsilon_y}{h_w} \quad (2)$$

此式引自文献[5],经计算,本次试验数据较符合此式,对比结果如表2.

- 4) 计算塑性变形对应的曲率 $\varphi_i$

$$\varphi_i = \varphi_u - \varphi_y \quad (3)$$

- 5) 计算屈服时的位移 $\Delta_y$

采用如图4所示的沿墙高度方向上的曲率分布模型(UBC-94<sup>[6]</sup>).可以得到任意高度处 $H'$ 的屈服位移 $\Delta_y$ .

$$\Delta_y = \frac{1}{6} \varphi_y H'^2 \left(3 - \frac{H'}{H}\right) \quad (4)$$

式中, $H$ 为墙的高度, $H'$ 为计算位移的高度.

- 6) 计算剪力墙截面塑性铰长度 $L_p$

取新西兰规范建议的表达式:

$$L_p = \left(0.2 + 0.044 \frac{H}{h_w}\right) h_w \quad (5)$$

式中, $h_w$ 为墙的截面高度.

- 7) 计算塑性变形对应的位移 $\Delta_i$

试件编号	$\varphi_{yt} (\times 10^{-6})$	$\varphi_{yc} (\times 10^{-6})$	$\left  \frac{\varphi_{yt} - \varphi_{yc}}{\varphi_{yt}} \right  \times 100\%$
CW-1	3.81	4.07	6.8
CW-2	3.68	4.07	10.6
CW-3	3.89	4.07	4.6
CW-4	4.11	4.07	1.0
CW-5	4.23	4.07	3.8

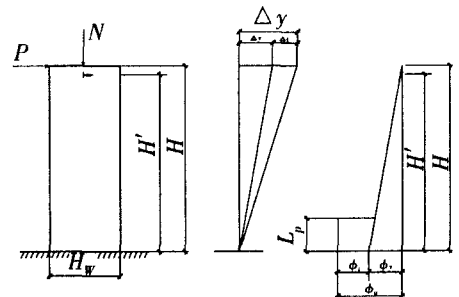


图4 曲率分布模型

$$\Delta i = L_p \varphi_i \left( H' - \frac{L_p}{2} \right) + \frac{1}{2H} I_p^2 \varphi_y \left( H' - \frac{2}{3} L_p \right) \quad (6)$$

8) 求总位移 $\Delta u$

$$\Delta u = \Delta_y + \Delta_i \quad (7)$$

用以上步骤计算试件 CW-1 ~ CW-5 高度分别等于 1 850 mm, 1 450 mm, 1 000 mm, 660 mm, 330 mm 处的位移 $\Delta u$ , 并与试验结果比较, 如图 5(a) ~ (e) 所示。可以看出, 计算结果与试验结果较接近, 说明采用的屈服曲率计算式、曲率分布模型、塑性铰长度计算式较为合理。

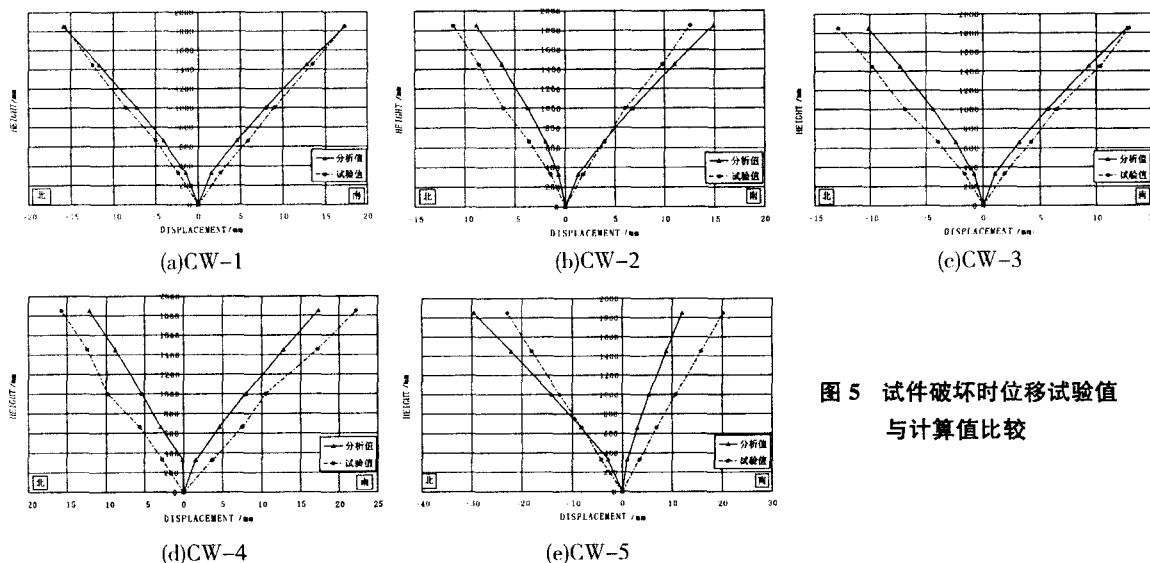


图5 试件破坏时位移试验值与计算值比较

### 3 结语

1) 试验结果表明, 按《规范》要求设置约束边缘构件的冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙, 在轴压力和水平力共同作用下破坏时, 一字形墙的轴压比设计值为 0.5 时, 其位移延性比不小于 3.2, 极限位移角可达到 1/120; 工字形墙的轴压比设计值为 0.67 时, 其位移延性比和极限位移角可分别不小于 4.0 和 1/90。

2) 约束边缘构件的长度和配箍特征值分别相同或接近时, 轴压比小的剪力墙试件的位移延性比和极限位移角大于轴压比大的试件, 翼缘端受压试件的位移延性比和极限位移角大于矩形端受压的试件。

3) 采用有关规范、文献建议的剪力墙屈服曲率 $\varphi_y$ 近似计算式、塑性铰长度 $L_p$ 表达式、破坏时曲率沿高度分布模式, 用本文试验实测的剪力墙试件极限破坏时墙底截面钢筋应变, 计算试件破坏时位移沿高度分布, 所得结果与试验结果符合良好, 验证了计算方法的合理。

4) 合理设置端部约束边缘构件, 纵筋采用延性好的普通热轧钢筋, 冷轧带肋钢筋焊接网作为分布筋的剪力墙具有较大的延性和变形能力。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 GB50011-2001[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2001.
- [2] 李耕勤, 钱稼茹, 顾万黎, 等. 冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙的抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 29 ~ 33.
- [3] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 294 ~ 295.
- [4] 李耕勤. 冷轧带肋钢筋焊接网剪力墙的抗震性能研究: [硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2002.
- [5] M. J. N. Priestley. Performance Based Seismic Design[S]. 12WCEE, 2000.