

文章编号:1673-2049(2006)03-0007-07

# 竖向荷载作用下冷弯薄壁型钢墙架柱的承载力

周绪红<sup>1,2</sup>, 李艳敏<sup>1</sup>, 石 宇<sup>1</sup>, 刘永健<sup>3</sup>, 庄 轶<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**采用有限元法对冷弯薄壁型钢住宅墙架柱在竖向荷载作用下的承载力进行了分析。通过对不带墙板墙架柱和一面石膏板、一面定向刨花板墙架柱试验试件在竖向荷载作用下的承载力、破坏模式和变形分析,验证了有限元法的正确性。采用有限元法分析了墙板厚度、柱间距、螺钉间距等参数对墙架柱承载力的影响。结果表明,当墙板厚度在 11 mm 以上时,增大墙板厚度不能提高墙架柱的轴向承载力;当墙架柱间距由 400 mm 增大到 600 mm 时,轴向承载力略有提高;当中间螺钉间距大于 600 mm 时,减小螺钉间距可显著提高墙架柱轴向承载力;当中间螺钉间距小于 600 mm 时,继续减小螺钉间距对轴向承载力的提高不明显。分析了冷弯薄壁型钢住宅中常用墙架柱在竖向荷载作用下的承载力,给出了这种墙架柱轴向承载力的设计建议。

**关键词:**冷弯薄壁型钢;墙架柱;轴向承载力;参数分析;有限元法;竖向荷载

中图分类号:TU392.1

文献标志码:A

## Bearing Capacity of Cold-Formed Thin-Walled Steel Wall Stud Under Vertical Load

ZHOU Xu-hong<sup>1,2</sup>, LI Yan-min<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, LIU Yong-jian<sup>3</sup>, ZHUANG Yi<sup>1</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Authors adopted finite element method(FEM) to study the bearing capacity of the studs of cold-formed thin-walled steel residence under vertical load. By the analysis for bearing capacity, failure mode and deformation of different studs unlined and those with plasterboards on one side and orient stand board on the other side, the accuracy of the FEM was validated. The influence of the parameters, including thickness of sheathings, studs spacing and screws spacing on the bearing capacity of studs was analyzed by FEM. The results show that when the thickness of sheathing is above 11 mm, the increase of thickness of sheathing can not enhance the axial bearing capacity of studs; when the studs spacing increase from 400 mm to 600 mm, the bearing capacity increases slightly; when the middle screws spacing is larger than 600 mm, the decrease of the screws spacing can increase the axial bearing capacity significantly; when the middle screws spacing is shorter than 600 mm, the increase of the axial bearing capacity since the decrease of screws spacing is not salient. The bearing capacity of the studs which was often used in cold-formed steel residential under vertical load, and the suggestion of design of the axial bearing capacity of such studs were presented.

收稿日期:2006-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50578013);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050710004)

作者简介:周绪红(1956-),男,湖南南县人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:zxh@lzu.edu.cn.

**Key words:** cold-formed thin-walled steel; wall stud; axial bearing capacity; parameter analysis; finite element method; vertical load

## 0 引言

冷弯薄壁型钢住宅体系是一种新型的住宅结构体系,其中组合墙体是冷弯薄壁型钢住宅体系的主要承重构件。典型的冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体由 C 形(卷边槽形截面墙架柱)和 U 形(普通槽形截面顶梁和底梁)冷弯薄壁型钢构件和石膏板、定向刨花板(OSB 板)经自攻螺钉连接而成。

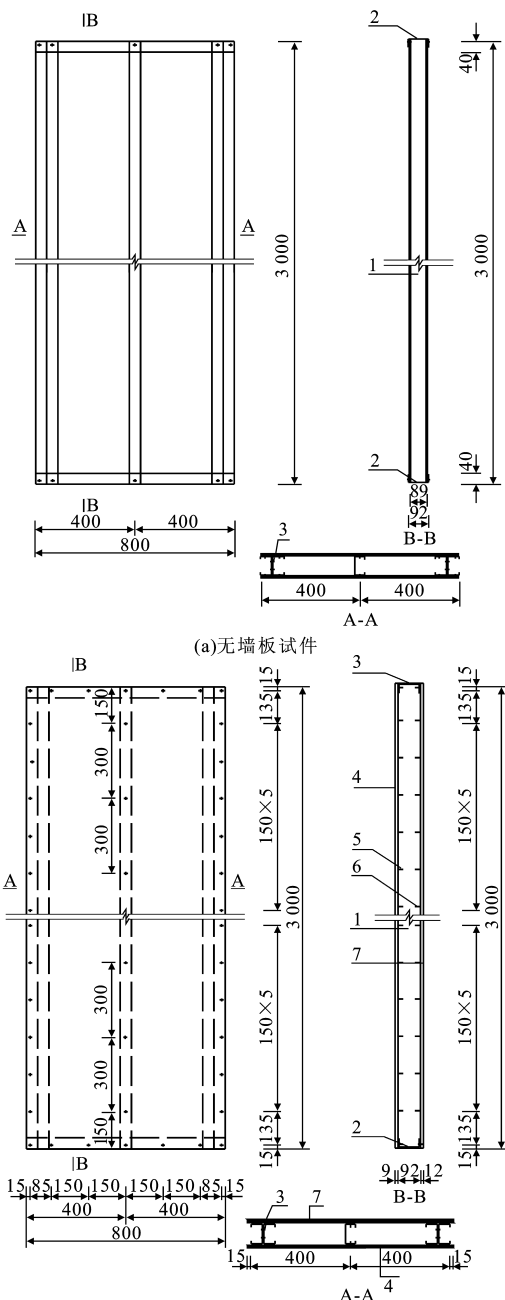
在墙架柱的轴向承载力研究方面,美国学者 Miller 等进行了 C 形截面墙架柱的轴压试验,提出了用美国规范计算该体系时无支承墙架柱和双面扁钢带支承墙架柱计算长度系数的取值<sup>[1]</sup>;澳洲学者 Telue 等对槽形截面组成的墙柱体系的轴压性能进行了研究,以澳洲规范为基础提出了无支承、单面石膏板支承和双面石膏板支承墙架柱的计算长度系数<sup>[2]</sup>;英国学者 Tian 等研究了墙板类型、墙架柱间距、螺钉间距对墙架柱承载力的影响<sup>[3]</sup>。在中国,闫磊对竖向荷载作用下轻钢柱板体系破坏模式进行了研究<sup>[4]</sup>;何保康教授对无墙板支承和双面加板支承墙架柱进行了轴压试验。虽然国外学者对墙架柱承载力和计算长度系数的取值进行了一些研究工作,但其试验所用的试件是国外常用的冷弯薄壁型钢,并不符合中国的使用要求,并且,其研究内容未涉及双面加不同类型墙板的情况。目前,中国对这方面的研究很少。

本文中采用通用程序 ANSYS,对文献[5]中的试件进行分析,从而验证有限元法的正确性;然后分析墙板厚度、墙架柱间距和螺钉间距对墙架柱轴向承载力的影响,并在此基础上分析了中国常用墙架柱(不同板材、不同钢材级别、不同柱子型号)竖向荷载作用下的承载力,给出了建议的设计方法。

## 1 有限元模型

### 1.1 试件的选取

有限元分析模型选用文献[5]中的试验试件(图 1)。试件尺寸为  $3\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ;中间墙架柱为单根冷弯薄壁卷边 C 形钢  $\text{C}89 \times 44.5 \times 12 \times 1.2$ ;两侧端墙架柱为一对背靠背冷弯薄壁卷边 C 形钢  $2\text{C}89 \times 44.5 \times 12 \times 1.2$ ,通过双排 4816 型自攻自钻螺钉连接成工字形截面;顶梁、底梁为  $\text{U}92 \times 40 \times 1.2$ ,并用一对 4816 型自攻自钻螺钉与墙架柱翼缘连接;试件两侧墙板与外围构件连接的自攻螺钉间距为



1—C89×44.5×12×1.2; 2—U92×40×1.2; 3—4816型自攻自钻螺钉;  
4—9 mm厚OSB板; 5—4235型自攻螺钉; 6—4225型自攻螺钉;  
7—12 mm厚石膏板

(b)双面加板试件

图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen Dimension (Unit: mm)

150 mm,与墙体中间墙架柱连接的自攻螺钉间距为 300 mm。OSB 板与钢材连接采用 4235 型自攻螺钉;石膏板与钢材连接采用 4225 型自攻螺钉。试验加载装置及位移计布置如图 2、3 所示。

### 1.2 有限元模型的建立

采用塑性壳单元 Shell181 模拟柱、顶梁、底梁

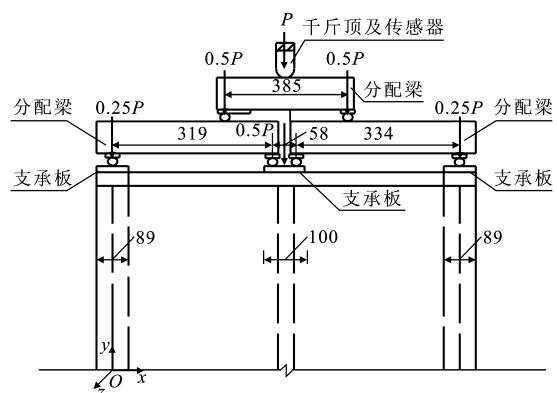


图 2 试验装置 (单位: mm)

Fig. 2 Test Setup (Unit: mm)

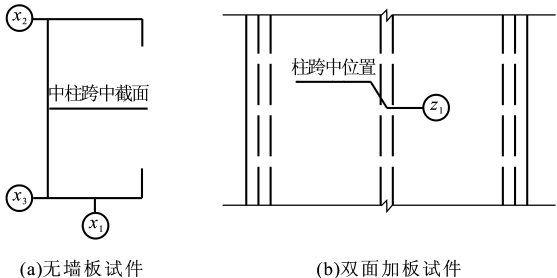


图 3 位移计布置

Fig. 3 Arrangement of Displacement Gage

和墙板,用梁单元 Beam188 模拟螺钉。构件的材料特性<sup>[6]</sup>见表 1。约束墙架柱顶端  $x$ 、 $z$  方向平动自由度和底端  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向平动自由度。未考虑 C 形钢转角处由于冷弯效应引起的材料强度的提高。初始缺陷包括腹板的局部弯曲缺陷和墙架柱的整体弯曲缺陷。带墙板试件和不带墙板试件的有限元模型分别如图 4、5 所示。

表 1 墙体构件的材料特性

Tab. 1 Material Behavior of Wall Members

材 料	弹性模量/ MPa	材料强度	泊松比
钢 材	$2.06 \times 10^5$	$295 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ (屈服强度)	0.30
石膏板	1 587	0.66 kN (纵向断裂强度)	0.23
OSB 板	3 500	$22 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ (平行板长静曲强度)	0.30

注:静曲强度为试件在最大载荷作用时的弯矩和抗弯截面模量之比。

文献[7]中对 19 根 C 形冷弯薄壁型钢构件的局部初始弯曲缺陷进行了测量,建议在试件承载力的理论计算中,初始弯曲的最大值取为  $0.0050w$ 。文献[8]中提出了腹板的最大局部弯曲缺陷由式(1)计算

$$\frac{\delta_0}{t} = 0.145 \frac{w}{L} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (1)$$

式中: $\delta_0$  为腹板中心缺陷最大值; $t$  为板件厚度; $w$

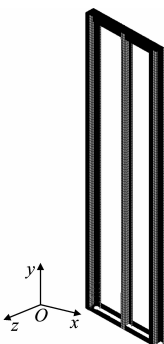


图 4 无墙板试件  
有限元模型

Fig. 4 Finite Element  
Model of Unlined Specimen

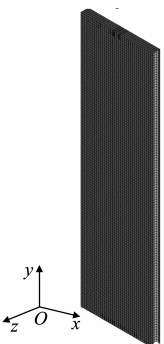


图 5 双面加板试件  
有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model  
of Both Sides Lined Specimen

为腹板宽度; $f_y$  为钢材屈服强度; $E$  为钢材弹性模量; $L$  为构件长度。

对于本文分析时所用到的 3 种钢材屈服强度 295、235、345  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,用式(1)计算的局部弯曲缺陷最大值分别为  $0.0055w$ 、 $0.0050w$ 、 $0.0056w$ ,与文献[7]中所建议初始弯曲缺陷最大值取  $0.0050w$  比较接近。在本文的有限元分析中,取  $0.005w/2$  作为腹板的局部弯曲缺陷,整体缺陷取  $L/1000$ 。

### 1.3 有限元分析结果与试验结果的对比

对于不带墙板的框架,中柱荷载  $P$  跨中绕  $y$  轴转角  $\Phi$  曲线试验值与有限元分析结果比较见图 6,试验中柱极限承载力为 18.3 kN,有限元分析极限承载力为 18.6 kN,比试验值高 1.6%;试验极限承载力对应的转角位移为  $5.0^\circ$ ,有限元分析极限承载力对应的转角位移为  $4.6^\circ$ ,比试验值低 8.0%,试验结果和有限元分析结果吻合较好。试验中,当荷载较小时即出现较大转角位移,分析原因是由于试验模型中顶梁、底梁的转角圆弧,使得顶梁、底梁和墙架柱未能完全接触,它们之间存在一定的空隙,因此,刚开始加载时,荷载并非通过墙架柱端部承压,而是通过自攻螺钉传给墙架柱,这样就存在初始偏心。初始偏心导致了荷载较小时就产生较大的转角位移。

带墙板墙架柱,试验时中柱荷载加至 45 kN,墙面外位移约 3.0~4.0 mm;荷载加至 45.7 kN,墙面外位移突然增加,试件破坏。有限元分析时荷载加至 44.2 kN,墙面外位移为 2.0 mm;荷载加至 45.2 kN,试件破坏。有限元分析极限承载力与试验值吻合较好,位移值较试验值小。通过有限元分析结果和试验结果的对比分析,验证了本文有限元模型的正确性。

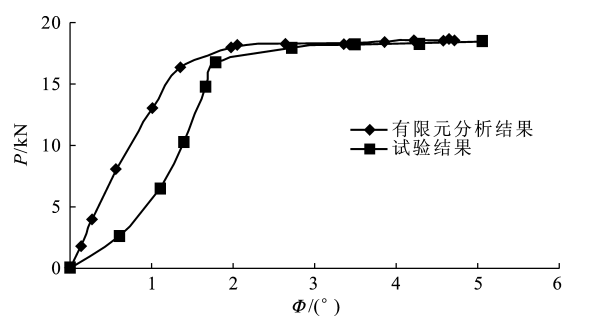


图 6 有限元分析结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of Results Between Experiment and Finite Element Analysis

2 墙架柱轴向承载力变参数分析

按照第 1 节方法建立墙架柱有限元模型。试件尺寸为 3 m×0.844 5 m;边柱、中柱均为单根 C 形柱;其余条件与第 1.1 节相同,研究墙板厚度、墙架柱间距和螺钉间距对墙架柱轴向承载力的影响。

2.1 墙板厚度

在第 1 节组合墙体有限元分析的基础上,改变墙板厚度,研究墙板厚度对组合墙体中墙架柱轴向承载力的影响,分析结果见表 2。各试件的中柱荷

表 2 墙板厚度对墙架柱轴向承载力的影响

试件	试件说明	墙板厚度/mm		轴向承载力/kN
		石膏板	OSB 板	
A1	墙架柱	12	11	41.39
A2	C89 × 44.5 × 12 × 1.2 顶梁、底梁	14	13	41.52
A3	U89 × 40 × 1.2	16	15	41.60
B1	墙架柱	12	11	33.22
B2	C89 × 44.5 × 12 × 0.9 顶梁、底梁	14	13	33.32
B3	U89 × 40 × 0.9	16	15	33.55
C1	墙架柱	12	11	40.26
C2	C140 × 44.5 × 12 × 1.2 顶梁、底梁	14	13	40.26
C3	U140 × 40 × 1.2	16	15	40.26
D1	墙架柱	12	11	58.60
D2	C140 × 44.5 × 12 × 0.9 顶梁、底梁	14	13	58.64
D3	U140 × 40 × 0.9	16	15	58.61

载  $P$ -跨中墙面内位移  $\Delta$  曲线见图 7~10,由计算结果可知,当墙板厚度在 11 mm 以上时,增大墙板厚度不能提高墙架柱的轴向承载力,此结论与文献[9]中结论一致。

2.2 墙架柱间距

冷弯薄壁型钢结构住宅承重墙的墙架柱间距通常采用 400、600 mm 两种规格。在第 2.1 节模型的

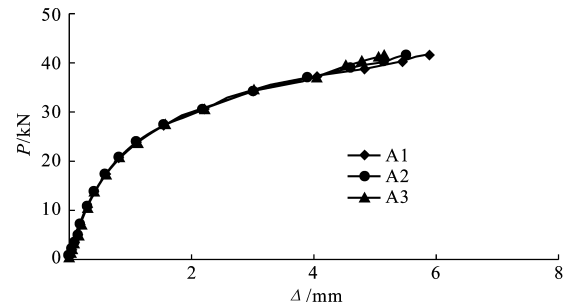


图 7 A1~A3 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系

Fig. 7 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen A1~A3

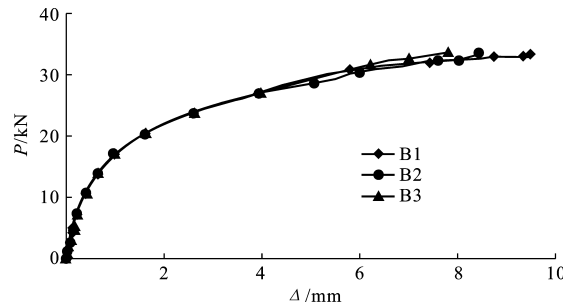


图 8 B1~B3 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系

Fig. 8 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen B1~B3

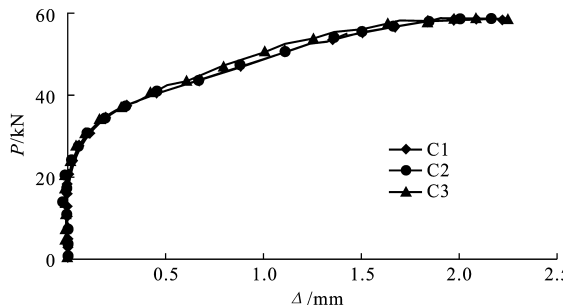


图 9 C1~C3 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系

Fig. 9 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen C1~C3

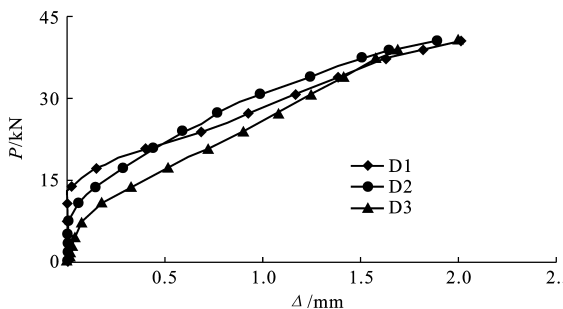


图 10 D1~D3 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系

Fig. 10 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen D1~D3

基础上,墙板厚度石膏板取 12 mm,OSB 板取

11 mm,改变墙架柱间距,分析间距对墙架柱轴向承载力的影响。分析结果见图 11~14。由图 11~14 可知,墙架柱间距由 400 mm 增加至 600 mm 时,轴向承载力略有提高,此结论与文献[2]、文献[3]和文献[9]中所得结论一致。

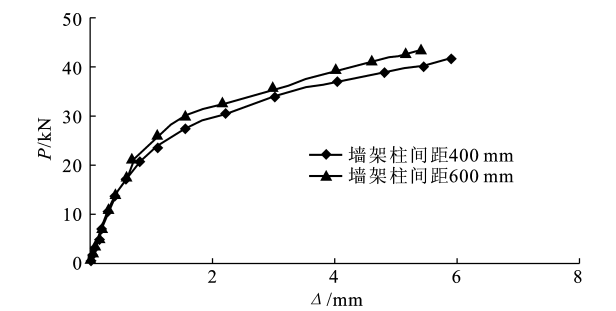


图 11 A1 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系  
Fig. 11 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen A1

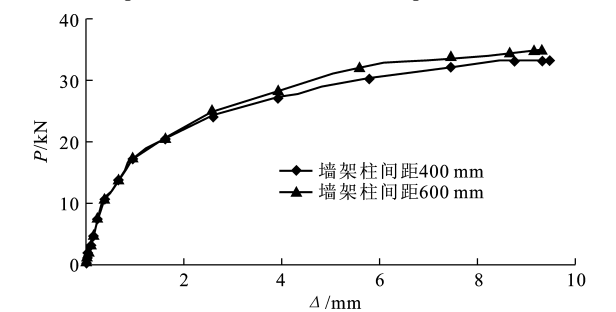


图 12 B1 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系  
Fig. 12 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen B1

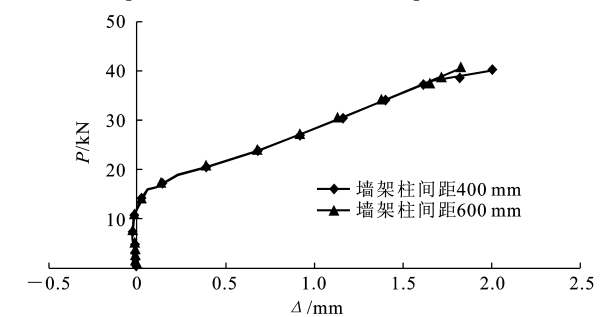


图 13 C1 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系  
Fig. 13 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen C1

### 2.3 螺钉间距

在第 2.1 节模型基础上,墙板厚度石膏板取 12 mm,OSB 板取 11 mm,改变 A1、C1 试件周边螺钉间距,分析螺钉间距对墙架柱轴向承载力的影响。计算结果见表 3。由表 3 计算结果可知:中间的螺钉间距从 1 500 mm 降至 600 mm 时,承载力分别提高 28.8%和 39.9%;中间螺钉间距从 600 mm 降至 150 mm 时,承载力分别提高 3.4%和 3.5%。由此可

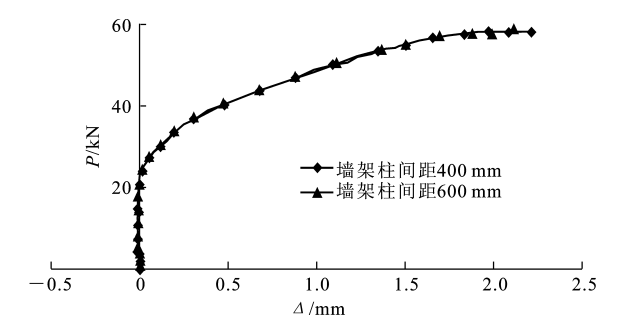


图 14 D1 试件中柱荷载-跨中墙面内位移关系  
Fig. 14 Relation of Middle Stud Load and Mid-Span Displacement in Wall Plan for Specimen D1

见,中间螺钉间距在大于 600 mm 时,减小螺钉间距可显著提高墙架柱轴向承载力;中间螺钉间距在小于 600 mm 时,继续减小螺钉间距对承载力的提高影响不明显。

表 3 螺钉间距对墙架柱轴向承载力的影响  
Tab. 3 Influence of Screw Spacing on Axial Bearing Capacity of Wall Stud

试件说明	螺钉间距/mm	承载力/kN
墙架柱 C89×44.5×12×1.2 顶梁、底梁 U89×40×1.2	150/1 500	34.40
	150/1 000	35.40
	150/750	39.72
	150/600	44.30
	150/300	44.60
	150/150	45.80
墙架柱 C140×44.5×12×1.2 顶梁、底梁 U89×40×1.2	150/1 500	44.90
	150/1 000	54.70
	150/750	54.70
	150/600	62.80
	150/300	62.70
	150/150	65.00

注:150/1 500 表示两侧墙板与外围构件连接的自攻螺钉间距为 150 mm,两侧墙板与墙体中间构件连接的自攻螺钉间距为 1 500 mm;其他与此相同。

### 3 墙架柱轴向承载力设计方法

按照第 1 节方法建立有限元模型。试件尺寸为 3 m×0.844 5 m;边柱、中柱均采用单根 C 形柱,其余条件与第 1.1 节相同,分析冷弯薄壁型钢住宅中常用墙架柱在轴向荷载作用下的承载力,计算结果见表 4。

分析结果表明,墙架柱的破坏均表现为位移的突然增加。腹板宽为 89 mm、壁厚为 1.2 mm 的柱,破坏时墙面内位移突然增加,发生绕弱轴的弯曲屈曲破坏,柱顶伴随有畸变屈曲,即两边翼缘向里凹,如图 15(a)所示(为了更加直观地观察柱的变形,图

15 中去掉了墙板和顶梁)。腹板宽为 89 mm、壁厚为 0.9 mm 的柱,当荷载达到极限值时墙面内、外的位移均突然增加,伴随有畸变屈曲,即柱顶翼缘向里

凹,柱中部翼缘向外凸,如图 15(b)所示;腹板宽为 140 mm 的柱,破坏表现为柱顶两螺钉间腹板的屈曲,没有明显的整体屈曲,如图 15(c)、(d)所示。

表 4 不同规格墙架柱轴向承载力及计算长度系数

Tab. 4 Axial Bearing Capacity and Calculation Length Coefficient of Different Dimension of Wall Studs

墙架柱规格	面板类型	钢材屈服强度/(N·mm <sup>-2</sup> )	承载力极限值 N <sub>u</sub> /kN	承载力设计值 N/kN	计算长度系数
C89×44.5×12×1.2	1 面石膏板	345	41.4	35.2	0.49
	1 面 OSB 板	235	31.9	27.1	0.54
	双面 OSB 板	345	38.5	32.7	0.49
		235	30.6	26.0	0.54
C89×44.5×12×0.9	1 面石膏板	345	33.2	28.2	0.43
	1 面 OSB 板	235	23.9	20.3	0.54
	双面 OSB 板	345	27.4	23.3	0.49
		235	22.6	19.2	0.54
C140×44.5×12×1.2	1 面石膏板	345	58.6	49.8	0.31
	1 面 OSB 板	235	43.6	37.1	0.34
C140×44.5×12×0.9	双面 OSB 板	345	40.3	34.3	0.36
		235	29.9	25.4	0.31

注:  $N = \gamma N_u$ ,  $\gamma$  为折减系数。

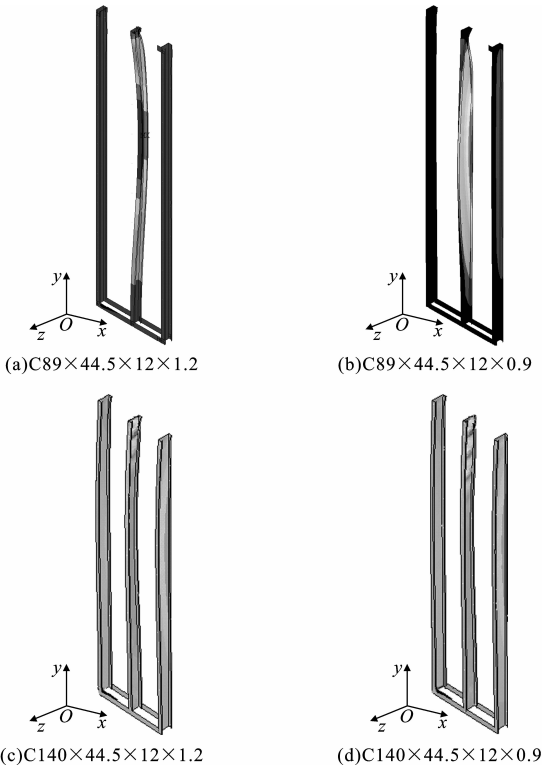


图 15 墙架柱的破坏

Fig. 15 Failure of Wall Studs

实际结构中,墙板的安装形成柱板复合体系后,通过自攻螺钉的连接,相当于给柱增加了侧向支承,减小了构件的计算长度系数。在设计中,可以通过修正计算长度系数来考虑墙板对柱的支承作用。

根据中国薄壁型钢规范,轴心受压构件的稳定

承载力为

$$\frac{N}{\varphi A_e} \leq f \tag{2}$$

式中:  $N$  为轴心力;  $\varphi$  为轴心受压构件的稳定系数;  $A_e$  为有效截面面积;  $f$  为钢材的抗拉、抗压、抗弯强度设计值。

墙架柱实际长度取柱长,根据式(2)反推,得出各种墙架柱的计算长度系数,见表 4。

中国薄壁型钢规范只适用于壁厚 1.5 mm 以上的构件,对于表 4 中的构件,用美国薄壁型钢规范和中国薄壁型钢规范计算所得有效截面面积  $A_e$  相差均在 5% 以内,为了计算方便,本文中有效截面面积  $A_e$  采用中国规范计算得出。由于荷载偏心等因素,使得实际构件承载力可能达不到极限值,因此,将有限元分析所得极限承载力  $N_u$  乘以折减系数  $\gamma$ ,  $\gamma = 0.85^{[10]}$ ,根据式(2)推导出各种情况下柱的承载力,见表 4。在设计中,对于双面加板墙架柱可按绕弱轴弯曲失稳计算其承载力<sup>[11-12]</sup>,腹板宽为 89 mm 的柱,计算长度系数可统一取 0.55;腹板宽为 140 mm 的柱,计算长度系数可统一取 0.40。

4 结 语

从试验的结果与 ANSYS 程序计算对比可以发现,本文中提出的有限元模型具有较高的精度,以此代替试验可节省大量的试验费用,且分析结果可用于指导冷弯型钢房屋墙体墙架柱承载力的设计。通

过本文分析可得出以下结论:

(1)当墙板厚度在 11 mm 以上时,增加墙板厚度不能提高墙架柱的轴向承载力。

(2)墙架柱间距由 400 mm 变为 600 mm 后,墙架柱承载力提高很小。

(3)墙板与柱连接中间螺钉间距大于 600 mm 时,减小螺钉间距可显著提高墙架柱轴向承载力;中间螺钉间距小于 600 mm 时,继续减小螺钉间距对轴向承载力的提高影响不明显。

(4)对于双面加板墙架柱可按绕弱轴弯曲失稳计算其承载力,腹板宽为 89 mm 的柱,计算长度系数可统一取 0.55;腹板宽为 140 mm 的柱,计算长度系数可统一取 0.40。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] MILLER T H, PEKOZ T. Behavior of Cold-Formed Steel Wall Stud Assemblies[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(2): 641-651.
- [2] TELUE Y, MAHENDRAN M. Behavior of Cold-Formed Steel Wall Frames Lined with Plasterboard [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(4): 435-452.
- [3] TIAN S, WANG J, LU T J, et al. An Experimental Study on the Axial Behavior of Cold-Formed Steel Wall Studs and Panels [J]. Thin-Walled Structure, 2004, 42(1): 557-573.
- [4] 闫磊. 竖向荷载作用下轻钢柱板体系破坏模式的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- YAN Lei. Failure Mode Research on Light Weight Steel Wall-Columns System Under Vertical Load [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [5] 刘前进, 何保康, 周天华. 低层冷弯型钢房屋墙体立柱承载力试验研究[J]. 钢结构, 2004, 19(4): 26-29.
- LIU Qian-jin, HE Bao-kang, ZHOU Tian-hua. Experimental Study on Load Carrying Capacity of Wall Studs for Low-Rise Cold-Formed Steel House [J]. Steel Structures, 2004, 19(4): 26-29.
- [6] 石宇. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体抗剪

承载力研究[D]. 西安:长安大学, 2005.

SHI Yu. Study on Shear Resistance of Cold-Formed Steel Stud Walls in Low-Rise Residential Structures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.

- [7] 周绪红, 李硕, 孔次融. 冷弯型钢卷边槽型截面受压构件板组稳定性与极限承载力研究[R]. 长沙:湖南大学, 1997.

ZHOU Xu-hong, LI Shuo, KONG Ci-rong. Study of Plate Components Stability and Ultimate Bearing Capacity of Compression Members of Cold-Formed Lipped Channel Section [R]. Changsha: Hunan University, 1997.

- [8] SIVAKUMARAN K S, ABDEL-RAHMAN N. A Finite Element Analysis Model for the Behavior of Cold-Formed Steel Members [J]. Thin-Walled Structures, 1998, 31(2): 305-324.

- [9] TELUE Y, MAHENDRAN M. Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Wall Frames Lined with Plasterboard on Both Sides [J]. Engineering Structures, 2004, 26(3): 567-579.

- [10] 于炜文. 冷成型钢结构设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

YU Wei-wen. Cold-Formed Steel Design [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003.

- [11] 周天华, 何保康, 周绪红, 等. 高强冷弯薄壁型钢轴压长柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 65-71.

ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of High-Strength Cold-Formed Thin-Walled Steel Long Columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 65-71.

- [12] 周绪红, 石宇, 周天华, 等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 1-14.
- ZHOU Xu-hong, SHI Yu, ZHOU Tian-hua, et al. Cold-Formed Steel Framing System of Low-Rise Residential Building [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14.