

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.007



CFRP 加固冷弯薄壁 C 型钢长构件的 轴压承载力

唐红元¹, 王灿军¹, 潘毅², 王忠凯², 胡志鹏¹

(1. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:为了研究 CFRP 加固冷弯薄壁 C 型钢长构件的承载能力,对腹板和翼缘均粘贴 CFRP 的试件进行了轴心受压加载试验。7 根长度均为 1 400 mm 的试件,其中 1 根为未加固的控制试件,其余 6 根封闭缠绕外贴 50 mm 宽 CFRP 间距为 50、100、150 mm 3 种情况,层数为 1 层和 2 层。试验结果表明,在轴心荷载作用下的破坏模式为整体弯扭失稳,与控制试件相比,加固后试件的稳定极限承载力均有不同程度的提高;当 CFRP 间距与腹板高度的比值小于 1 时,加固效果较理想,且 2 层 CFRP 的加固效果好于 1 层。最后,采用有限元对模型进行数值模拟,对比试验数据和数值模拟结果,二者吻合较好。

关键词:冷弯薄壁 C 型钢;加固;整体稳定;轴心受压

中图分类号:TU392.1;TU317.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)03-0050-08

Axial compression of slender cold-formed thin-walled steel channels strengthened with CFRP

Tang Hongyuan¹, Wang Canjun¹, Pan Yi², Wang Zhongkai², Hu Zhipeng¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: To study the stability capacity of long cold-formed thin-wall channel columns reinforced with CFRP, the axial compression loading test was carried out on them with CFRP around their webs and flanges. Seven columns, which are 1 400 mm long each, are consisted with one initial specimen and six strengthened with 50 mm width CFRP. The CFRP space is divided into three sorts, 50 mm, 100 mm and 150mm. And the CFRP layer has two kinds: one and two layers. The experimental results show that the global buckling happens to all the specimens. All the ultimate bearing capacity of the reinforced members is improved in different degrees. Meanwhile, the effect of the reinforced specimens wrapped with two layers CFRP is better than the others wrapped with one layer CFRP. Finally, based on the experiment, the

收稿日期:2016-09-04

基金项目:国家自然科学基金(51108389);国家留学基金(20123022);国家重点研发计划(2016YFC0802205)

作者简介:唐元红(1974-),男,博士,副教授,主要从事钢结构和组合结构研究,(E-mail)tanghyseu@163.com.

潘毅(通信作者),男,博士,副教授,(E-mail)panyi@home.swjtu.edu.cn.

Received:2016-09-04

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51108389); China Scholarship Foundation (No. 20123022); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0802205)

Author brief: Tang Hongyuan (1974-), PhD, associate professor, main research interests: steel structures and composite structures, (E-mail) tanghyseu@163.com.

Pan Yi (corresponding author), PhD, associate professor, (E-mail) panyi@home.swjtu.edu.cn.

numerical simulation is carried out, and the test and numerical results show in good agreement.

Keywords: cold-formed thin-wall channel column; strengthening; global buckling; axial compression

关于 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 简称 CFRP)加固钢结构的研究,已经取得了许多有益的成果^[1-3],主要集中在 3 个方面:一是采用 CFRP 加固受弯钢梁,包括受损钢梁的加固^[4-8]和无损钢梁的加固^[9-11],加固后钢梁的极限承载能力都有不同程度的提高;二是采用 CFRP 加固轴心受压钢构件^[12-18],主要对象是 T 形、H 形、圆钢管和方钢管等截面试件,加固后的受压构件提高了翼缘局部屈曲、腹板局部屈曲和整体弯扭屈曲的承载能力;三是采用 CFRP 提高钢结构的疲劳强度^[19-20],加固后构件的剩余疲劳强度均出现成倍增长。然而,对于外贴 CFRP 加固其它截面形式,如冷弯薄壁 C 型钢的研究则鲜有涉及。冷弯薄壁 C 型钢由于肢宽壁薄,且截面单轴对称,在外荷载作用下,极易发生局部失稳和整体失稳破坏。虽然冷弯薄壁 C 型钢截面较少用于轴心受压构件,但是在外贴 CFRP 后,该类型构件在轴心受压状态下,其受力性能是否发生改变,值得进一步展开研究和探索。基于此,笔者对外贴 CFRP 加固冷弯薄壁 C 型钢长构件进行轴心受压试验,研究外贴 CFRP 后的冷弯薄壁 C 型钢长构件的极限承载力和最终破坏模式,并比较 CFRP 层数和横向外贴间距对加固效果的影响。

1 试验概况

1.1 材料性能

试验采用 Q235 冷弯薄壁 C 型钢,钢材的弹性模量为 2.02×10^5 MPa,泊松比 μ 为 0.33。根据文献^[21]的相关规定进行检测,其屈服强度为 305.8 MPa,抗拉强度为 418.5 MPa。CFRP 材料性能如表 1 所示,粘贴胶为环氧树脂胶,其中胶水与固化剂的配合比为 3:1。

表 1 CFRP 材料性能

Table 1 Material properties of CFRP

型号	t_f /mm	f_{id} /MPa	E_f /MPa	ϵ_u
CJT-300I	0.167	3 400	2.4×10^5	0.017

注: t_f 、 f_{id} 、 E_f 和 ϵ_u 分别为 CFRP 的厚度、抗拉强度、弹性模量和极限拉应变。

1.2 试件设计

考虑 CFRP 外贴间距和层数两个因素,采用正交试验的方法进行试件设计。试验共有 7 根试件,试件长度 L 为 1 400 mm,其中 1 根为未粘贴 CFRP 的试件,用做对比。CFRP 布宽度为 50 mm,层数分为 1 层和 2 层。试件的基本情况如表 2 所示。

表 2 试件的基本参数

Table 2 Fundamental parameters of specimens

试件	h_w /mm	b /mm	t /mm	λ_y	n	s /mm	h_w/t	b/t
C0	102.5	43.5	2.62	113.8	0	0	39.1	15.6
C1	102.1	42.8	2.63	113.8	1	50	38.8	15.3
C2	101.4	43.1	2.61	113.8	2	50	38.8	15.5
C3	101.9	43.8	2.64	113.8	1	100	38.6	15.6
C4	101.6	43.6	2.63	113.8	2	100	38.6	15.6
C5	101.9	43.1	2.62	113.8	1	150	38.9	15.5
C6	101.6	43.0	2.61	113.8	2	150	38.9	15.5

注:表中 h_w 为腹板的高度; b 为翼缘的宽度; t 为试件的厚度; n 为 CFRP 布的层数; s 为 CFRP 的净间距; h_w/t 为腹板高厚比; b/t 为翼缘宽厚比; λ_y 为弱轴的名义长细比。

由于冷弯薄壁 C 型钢腹板和翼缘的边缘约束条件与 H 型截面构件的腹板和翼缘类似,根据《钢结构设计规范》(GB 50017 报批稿)^[22]第 7.3.1 条,不出现局部失稳的前提为

腹板, $\lambda > 50$ 时:

$$h_w/t \leq \min[21\epsilon_k + 0.42\lambda, 21\epsilon_k + 50] \quad (1)$$

翼缘, $\lambda > 70$ 时:

$$b/t \leq \min[7\epsilon_k + 0.1\lambda, 7\epsilon_k + 12] \quad (2)$$

将表 2 中的参数代入式(1)和(2),均满足不出现局部失稳的要求。因此,该批试件在轴心受压荷载作用下,按照《钢结构设计规范》(GB50017 报批稿)应该都先出现整体弯扭失稳。

为加载方便,在每个试件的两端分别焊接一块 $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 钢板。为减少不必要的约束,焊接时只将端板与 C 型钢的腹板处做点焊处理。粘贴 CFRP 的试件如图 1(a)所示,CFRP 的外贴方式见图 1(b)。

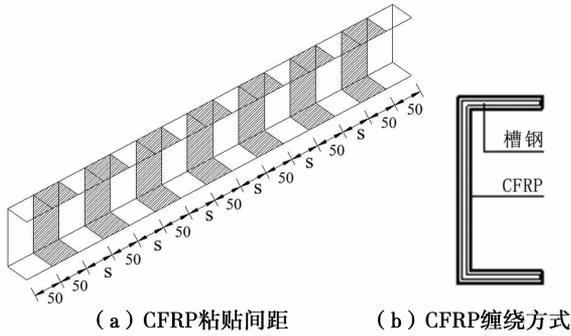


图 1 试验试件
Fig. 1 Test specimen

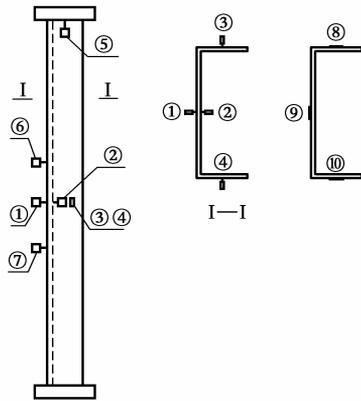


(a) 加载装置 (b) 试件顶端和底端局部

图 3 试验加载装置
Fig. 3 Test loading device

1.3 测点布置

为了量测试件腹板和翼缘的变形,测微计和应变片的测点布置如图 2 所示。此外,在加载装置的两侧各设一台摄像机,以记录加载全过程。



注: ①~⑦为测微计;⑧~⑩为应变片

图 2 试件测点布置
Fig. 2 Arrangement of the strain gauges and displacement meters

1.4 加载方案

试验采用 50 t 压力试验机进行加载。在试件的两端各布置一刀铰支座,以保证试件两端铰接,如图 3 所示。加载前,预先在端板上标记 C 型钢截面的形心,将刀铰支座通过 C 型钢截面的形心,保证试件的轴心受压。

根据轴心受压两端铰接构件的欧拉临界力公式对试件进行稳定承载能力估算,临界荷载 $P_{cr} = 57.5$ kN。根据预估荷载制定试验的加载等级:预加载取预估荷载的 5%,缓慢加载;正式加载阶段取预估荷载值的 10%为一级,每级荷载停 2~3 min,用以观测应变及位移;当加载至 40 kN 时,以 1 kN 每级的荷载连续缓慢加载至试件发生失稳破坏。

2 试验现象及结果分析

2.1 试验现象

每个试件的翼缘侧面、腹板内侧和外侧的破坏模式,如图 4 所示。

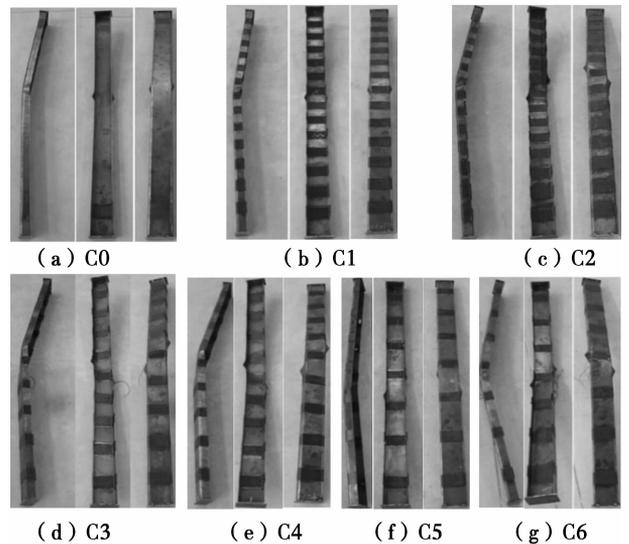


图 4 试件破坏模式
Fig. 4 The specimen failure mode

试件 C0:在加载初始阶段,试件处于弹性受力阶段,试件整体几乎没有变形。腹板外表面测微计①的位移随荷载的增加呈线性变化,翼缘处测微计③和④的位移变化则较慢,说明在弹性阶段试件的主要变形集中在腹板处。当加载到 31 kN 时,测微计①的位移开始随着荷载的增加而急速增加。此后,调整荷载级别,当加载到 46 kN 时,腹板中间部分已有较大弯曲,接着翼缘也出现局部鼓曲,试件不能继续承受荷载。通过后期整理数据,试件的承载

能力极限为 47.75 kN,腹板测点①的最大水平位移为 4.789 mm,观测到试件的破坏是整体失稳先于翼缘的局部屈曲失稳。试件破坏模式如图 4(a)所示。

试件 C1~C6 加载过程中荷载与测点的关系大致与 C0 一致,最终破坏模式与 C0 基本相同。试件的破坏模式和极限承载力见表 3。从图 4 可知,当试件发生破坏时,CFRP 和钢材没有发生剥离,且翼缘的鼓曲位置不在同一高度,显示试件破坏时存在一定程度的扭转。

2.2 试验的荷载-变形曲线

根据试件外贴 1 层和 2 层 CFRP 的情况,将应变片和测微计所测的结果,包括腹板、翼缘的荷载-变形(应变)曲线分别进行了比较和分析。需要说明的是,由于加载后期腹板水平位移增加较快,为避免损坏测微计,试验只测得部分位移下降段,但对整个试验的结果没有影响。

2.2.1 荷载-应变曲线 腹板测点①的荷载-应变曲线见图 5。如图 5 所示,腹板应变开始与荷载为线性关系,后期为非线性。

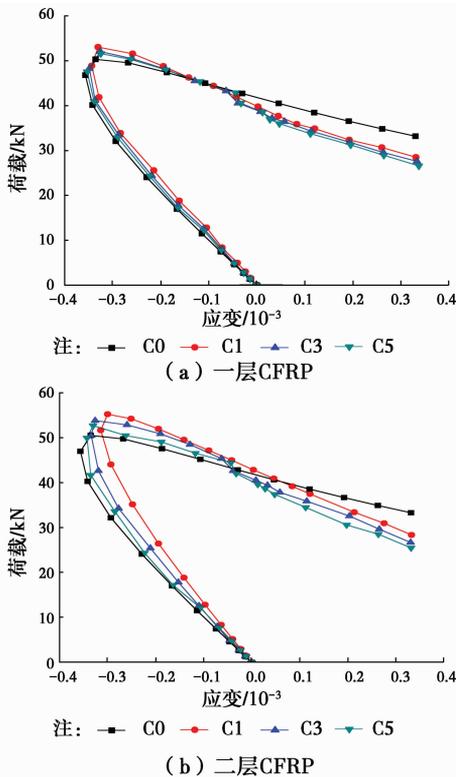


图 5 腹板的荷载-应变关系曲线比较

Fig. 5 The load-strain relationship curve of the web

2.2.2 腹板荷载-变形曲线 试件腹板的变形取测点①和②的水平位移平均值,其荷载和变形关系曲

线如图 6 所示。

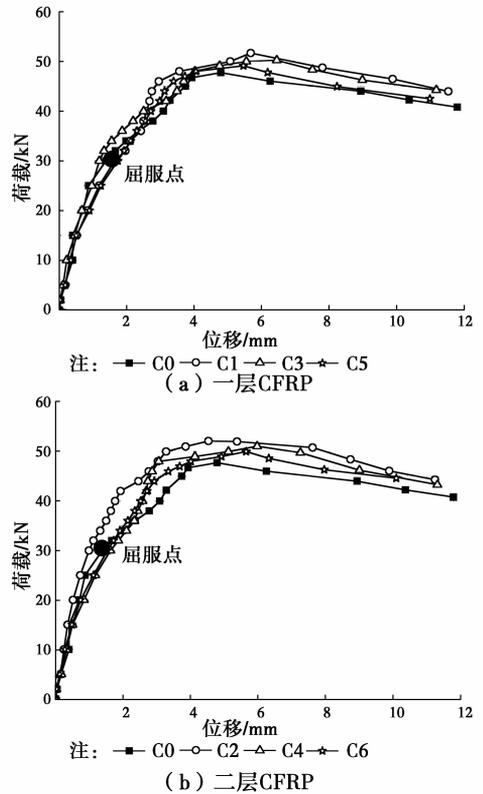


图 6 腹板的荷载-变形关系曲线比较

Fig. 6 The load-deformation relationship curve of the web

由图 6 中的曲线可以看出,当 CFRP 层数相同时,加载初期试件基本处于弹性阶段。此时,所有试件的腹板荷载-变形关系曲线基本一致。随着荷载的增大,试件开始进入屈服阶段,加固后的试件腹板变形量小于 C0。屈服阶段主要表现为荷载与位移由线性转为非线性关系。同时,CFRP 间距越小,其变形越小。在屈服阶段时,CFRP 间距越小,对试件的约束作用就越大。由图 6 可知,当试件发生破坏时,加固后试件的极限承载力虽然得到了一定的提高,但破坏时的变形相差不大。

2.2.3 翼缘荷载-变形曲线 试件翼缘的变形取测点③和④的水平位移平均值,其荷载-变形关系曲线如图 7 所示。

在加载过程中,翼缘的荷载-变形曲线基本相同。加载初期,试件基本处于弹性阶段。由于翼缘测点不在翼缘鼓曲最大处,试件翼缘测点变形均较小。在相同荷载作用下,试件整体失稳前,加固后的试件变形小于未加固试件;发生整体失稳后,则相反。整体失稳在翼缘的荷载-位移曲线中,主要表现为承载力达峰值后,构件的承载力不能再增加,位移

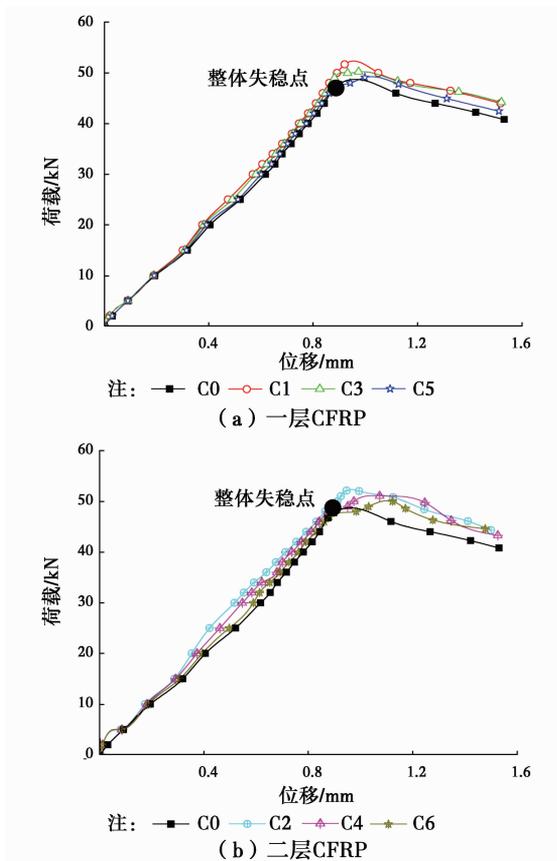


图 7 翼缘的荷载-变形关系曲线比较

Fig. 7 The load-deformation relationship curve of the flange

增加而承载力减小。

2.3 试验结果

由前述可知,各试件最终破坏模式均为整体弯扭失稳,该结果与《钢结构设计规范》(GB 50017 报批稿)中的相关规定吻合,试件的承载力结果见表 3。 ΔP_u 为 C1~C6 相对于 C0 的提高幅度。 δ 为 CFRP 净间距 s 与腹板高度 h_w 的比值,见式(3)。

$$\delta = \frac{s}{h_w} \quad (3)$$

表 3 试件承载力的试验结果

Table 3 The bearing capacity of specimens

试件	P_u /kN	ΔP_u /%	δ
C0	47.75	0.00	0.00
C1	51.68	8.23	0.49
C2	52.11	9.13	0.49
C3	50.23	5.20	0.98
C4	51.08	6.97	0.98
C5	49.11	2.85	1.47
C6	49.98	4.67	1.48

由表 3 可知,与 C0 对比,外贴 CFRP 的试件承载力都有一定的提高,2 层 CFRP 间距 50 mm 的试件承载力提升幅度最大,1 层 CFRP 间距 150 mm 的试件提升幅度最小,但试件的最终破坏模式均为整体弯扭失稳。

2.4 CFRP 间距和层数对极限承载能力的影响

为了说明 CFRP 间距对加固的影响,可以引入相邻 CFRP 净间距 s 与腹板高度 h_w 的比值 δ 这一参数,如表达式(3)所示。

当 CFRP 的粘贴间距为 50 mm 时,C1 和 C2 的极限承载能力分别提高了 8.23% 和 9.13%。说明 2 层 CFRP 的加固效果优于 1 层 CFRP,但二者相差仅为 0.9%,增加幅度并不明显。即当 δ 约等于 0.5 时,增加 CFRP 层数尽管能提高试件的极限承载能力,但效果有限。当 CFRP 的粘贴间距为 100 mm 时,C3 和 C4 的极限承载能力分别提升了 5.20% 和 6.97%,二者相差为 1.77%。即当 δ 约等于 1 时,增加 CFRP 层数有利于提高构件的极限承载力。当 CFRP 的粘贴间距为 150 mm 时,C5 和 C6 的极限承载能力分别提升了 2.85% 和 4.67%,二者相差为 1.82%。即,当 δ 约等于 1.5 时,尽管极限承载力的提高幅度扩大,但由于极限承载力的绝对提高幅度较小,增加 CFRP 层数的加固效果并不好。

因此,当 $\delta \leq 0.5$ 和 $\delta \geq 1.5$ 时,增加 CFRP 的层数对极限承载力的提高有限;当 $0.5 \leq \delta \leq 1.5$ 时,增加 CFRP 的层数对极限承载力有提高作用。

3 有限元数值模拟

3.1 有限元模型建立

采用有限元软件 ANSYS 12.0 对构件进行数值模拟,冷弯薄壁 C 型钢采用 Solid45 单元,CFRP 片材采用 Shell181 单元。钢材与碳纤维布 CFRP 之间的粘结胶层,由于试验中钢材与 CFRP 没有发生剥离和粘结滑移,因此,采用钢材与 CFRP 之间的节点耦合来模拟胶层的粘结作用,通过 CPINTF 命令使钢材和 CFRP 二者具有相同的位移。

对冷弯薄壁 C 型钢,初始缺陷包括残余应力和几何缺陷。由于对冷弯薄壁 C 型钢初始残余应力的研究较少,且笔者的研究重点在于对比 CFRP 对其轴压承载力的提高效果,故忽略残余应力缺陷的影响。对初始几何缺陷,根据《冷弯薄壁型钢结构技术

规范》(GB 50018—2002)^[23],整体初始弯扭变形幅值取为 $L/1\ 000$ 。在分析构件的非线性性能时,首先对试件进行特征值屈曲分析,得到第 1 阶屈曲模态,然后将屈曲模态乘以 $L/1\ 000$ 作为试件的整体几何初始缺陷。

为方便对试件施加约束和荷载,以试件两端截面形心处的节点为主节点,通过执行 CERIG 命令将端面的其他节点自由度与主节点自由度进行耦合处理,使得试件两端形成刚性面。由于试件所采用的单元为实体 SOLID45 单元,每个单元只有 3 个方向的平动自由度,而形成刚性面的 CERIG 命令却要求单元应当具有 6 个自由度。因此,采用在试件两端形心处建立 2 个关键点,关键点的单元采用 MASS21(结构质点),该单元是一个具有 6 个自由度的点元素,其相关的单元属性采用与钢材相同的属性,不仅对结构最后的计算分析没有影响,且能利用其形成两端处的刚性面。

数值模拟中,约束试件两端的主节点在刚性面内的平动(U_x, U_y)和绕纵轴的转动(Rot_z),沿轴线方向仅约束 $L=0$ 处主节点的轴向位移(U_z)。在进行试件的特征值屈曲分析时,在 $L=1.4\text{ m}$ 处的主节点上施加向下的单位荷载 $F=1\text{ kN}$;在进行试件的非线性分析时,将特征值屈曲分析时所得到的第一阶屈曲荷载作为作用力施加到 $L=1.4\text{ m}$ 处的主节点上面。试件的有限元模型见图 8。

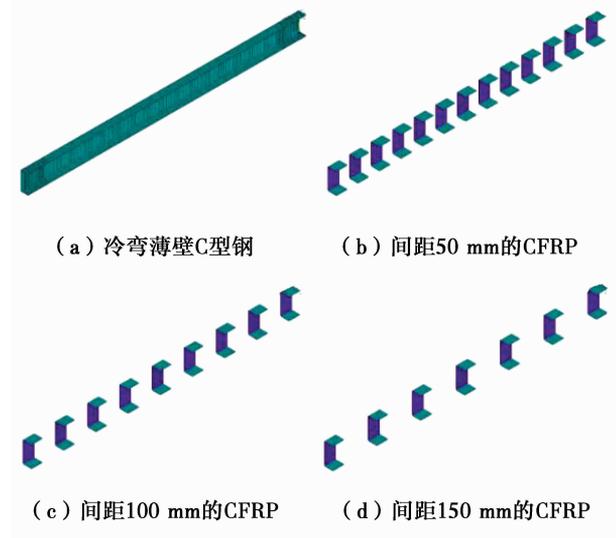


图 8 试件的有限元模型

Fig. 8 The schematic of finite element modeling

分析求解时,采用弧长法进行非线性的收敛分

析。同时,打开 ANSYS 中的大变形及自动荷载步,来增强分析的收敛性。对于求解的收敛准则通常有 3 种:位移、不平衡力和增量内能,笔者采用位移收敛。

3.2 有限元模拟结果与试验值的对比

对比试验与有限元数值模拟的结果,其荷载-位移曲线按 1 层 CFRP 和 2 层 CFRP 分别进行对比,具体结果见图 9。

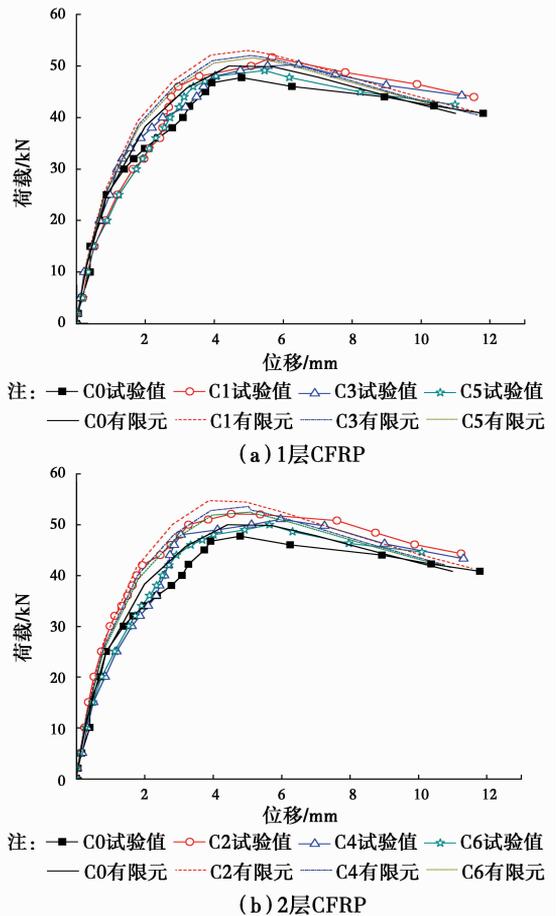


图 9 有限元与试验的荷载-位移曲线

Fig. 9 Comparison of the FEM and test results

与试验结果相比,从屈曲阶段开始,对应相同的荷载级别,有限元分析的构件腹板处弯曲变形均偏小。在构件发生破坏时,试验测点的腹板变形也比理论分析偏大。出现这种现象的原因,首先,由于有限元分析中 CFRP 与钢材之间采用共用节点,共用节点模拟对相互间的节点位移有一定的限制;其次,试验构件在制作过程中存在一定制造误差,这使得试验结果与理论分析存在一定偏差。

对比试验和有限元模拟的极限承载能力,见表 4,二者误差均在 5.0% 以内。因此,有限元模型可

以用来较好地模拟 CFRP 加固冷弯薄壁 C 型钢轴压承载力。

表 4 试件承载力分析比较

Table 4 Comparison of bearing capacity of specimens

试件	P_{EX}/kN	P_{FEM}/kN	$\Delta P = \frac{P_{FEM} - P_{EX}}{P_{EX}} / \%$
C0	47.75	49.98	4.6
C1	51.68	53.01	2.6
C2	52.11	54.73	5.0
C3	50.23	52.03	3.3
C4	51.08	53.58	3.5
C5	49.11	51.56	4.9
C6	49.98	52.47	5.0

4 结论

通过对外贴 CFRP 加固冷弯薄壁 C 型钢长试件的轴心受压试验研究和数值模拟,得出以下结论:

1) 横向外贴不同间距的 CFRP 对腹板和翼缘进行加固,试件的极限承载能力有不同程度的提高,但加固后试件的破坏模式并没有发生变化,均是整体弯扭失稳而导致试件丧失承载能力。

2) 外贴 CFRP 的间距越小、层数越多,试件的极限承载能力增加越多。当 $\delta \leq 0.5$ 和 $\delta \geq 1.5$ 时,CFRP 层数的增加对极限承载力的影响有限;当 $0.5 \leq \delta \leq 1.5$ 时,增加 CFRP 的层数对极限承载力有明显影响。

3) 有限元模型分析结果与试验较为接近,可以很好地模拟构件的受力行为,可以用来研究其他 CFRP 外贴方式对冷弯薄壁轴心受压长构件承载力的影响。

笔者仅对采用间隔外贴 CFRP 方式加固后的冷弯薄壁 C 型钢长构件进行轴心受压承载力研究,对于其他形式,如横向满贴或纵向粘贴方式加固后构件的承载力情况,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 郑云,叶立平,岳清瑞. FRP 加固钢结构的研究进展[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 20-25.
ZHENG Y, YE L P, YUE Q R. Progress in research on steel structures strengthened with FRP [J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 20-25. (in

Chinese)

- [2] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-the-artreview on FRP strengthened steel structures [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1808-1823.
- [3] 曹靖. 碳纤维增强复合材料加固钢结构理论分析和实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2011.
CAO J. The theoretical analysis and experimental study of CFRP reinforced steel structure [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] LIU X, NANNI A, SILVA P F, et al. Rehabilitation of steel bridge columns with FRP composite materials [C]// Proc. , CCC 2001 Composites in Construction, Porto, 2001: 10-12.
- [5] SHULLEY S B, HUANG X, KARBHARI V M, et al. Fundamental considerations of design and durability in composite rehabilitation schemes for steel girders with web distress [C]// Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, ASCE, 1994: 1187-1194.
- [6] PATNAIK A K, BAUER C L. Strengthening of steel beams with carbon FRP laminates [C]//4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2004: 1-8.
- [7] 陈涛, 齐明, 顾祥林, 等. 碳纤维复合板材修补损伤方钢管梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(Sup1): 71-76.
CHEN T, QI M, GU X L, et al. Experimental study on behavior of rectangular hollow steel section beams with initial crack retrofitted with CFRP plate [J]. Journal of Building Structures, 2013, 35(Sup1): 71-76. (in Chinese)
- [8] 霍君华, 王连广, 张海伏, 等. 预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 72-78.
HUO J H, WANG L G, ZHANG H F, et al. Experimental research on prestressed CFRP sheets strengthened corroded steel beams [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 72-78. (in Chinese)
- [9] EDBERG W, MERTZ D, GILLESPIE J. Rehabilitation of steel beams using composite materials [C]// Materials for the New Millennium, ASCE, 1996: 502-508.
- [10] SEN R, LIBY L, MULLINS G. Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates [J]. Composites Part B: Engineering, 2001, 32(4): 309-322.

- [11] ELCHALAKANI M, FERNANDO D. Plastic mechanism analysis of unstiffened steel I-section beams strengthened with CFRP under 3-point bending [J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 53: 58-71.
- [12] TENG J G, HU Y M. Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 827-838.
- [13] HAEDIR J, ZHAO X L. Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(3): 497-509.
- [14] PARK J W, YEOM H J, YOO J H. Axial loading tests and FEM analysis of slender square hollow section (SHS) stub columns strengthened with carbon fiber reinforced polymers [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2013, 13(4): 731-743.
- [15] SUNDARRAJA M C, SRIRAM P, GANESH PRABHU G. Strengthening of hollow square sections under compression using FRP composites [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 (1):1-19.
- [16] HARRIES K A, PECK A J, ABRAHAM E J. Enhancing stability of structural steel sections using FRP [J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, 47 (10): 1092-1101.
- [17] SHAAT A, FAM A Z. Slender steel columns strengthened using high-modulus CFRP plates for buckling control [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(1): 2-12.
- [18] 彭福明, 郝际平, 岳清瑞, 等. FRP加固钢结构轴心受压试件的弹性稳定分析[J]. *钢结构*, 2005, 20(3): 17-20.
- PENG F M, HAO J P, YUE Q R, et al. Elastic stability analysis of axially loaded compression steel members by FRP strengthening [J]. *Steel Structure*, 2005, 20(3): 17-20. (in Chinese)
- [19] MILLER T C, CHAJES M J, MERTZ D R, et al. Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(6): 514-522.
- [20] TAVAKKOLIZADEH M, SAADATMANESH H. Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129 (2):186-196.
- [21] 金属材料拉伸试验:第1部分:室温试验方法:GB/T228.1—2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T228. 1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范(报批稿) [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [23] 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002 [S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- Technical code of cold-formed thin-wall steel structures: GB 50018-2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)