

冷弯薄壁型钢拼合箱形柱的畸变屈曲性能研究

李艳春[†], 周天华, 丁嘉豪, 李晨阳, 张兴春

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为研究冷弯薄壁型钢(CFS)拼合箱形截面柱的畸变屈曲性能,首先对 9 根 C 形截面柱、9 根 U 形截面柱及 21 根由 C 形和 U 形拼合而成的箱形截面柱进行轴压试验研究和数值模拟分析,考察其屈曲模式特征和受力特性.在此基础上,提出一组假设模型以研究螺钉间距对拼合箱形截面柱变形特征和极限承载力的影响规律及其与试件半波长之间的关系.研究结果表明:1)不同螺钉间距的试件,畸变屈曲半波数量和半波长(λ_c)均不相同.2)螺钉间距小于 $0.9\lambda_c$ 时,箱形截面柱的承载力大于 C 形和 U 形柱的承载力之和,即 $1+1>2$ 的拼合效应.3)螺钉间距大于 $0.9\lambda_c$ 时,箱形截面柱的承载力逐渐接近 C 形和 U 形柱的承载力之和,即 $1+1\approx 2$.为计算 CFS 拼合箱形截面柱的极限承载力,在美国规范中直接强度法的基础上提出了一种计算箱形截面柱畸变屈曲弹性临界荷载的方法,将计算的临界屈曲荷载用于直接强度法以得到拼合箱形截面柱的极限承载力,理论计算结果与试验及有限元结果均比较吻合,验证了本文提出方法的准确度和适用性.

关键词:冷弯薄壁型钢;拼合箱形柱;畸变屈曲;屈曲临界荷载;计算方法

中图分类号:TU391;TU317.1

文献标志码:A

Investigation on Distortion Buckling Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Built-up Box-section Columns

LI Yanchun[†], ZHOU Tianhua, DING Jiahao, LI Chenyang, ZHANG Xingchun

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the distortional buckling behavior of cold-formed steel (CFS) built-up box-section columns, firstly, 9 C-section columns, 9 U-section columns, and 21 built-up box-section columns composed of C-section and U-section were investigated by the axial compression tests and numerical simulation. The buckling characteristics and mechanical behaviors of the columns were investigated. On this basis, a set of hypothesis models were proposed to study the influence of screw spacing on the deformation, the ultimate capacity, and the relationship between the screw spacing and the half-wavelength(λ_c) of CFS built-up box-section columns. The results show that: 1) The number and half-wavelength of distortion buckling are different for the specimens with different screw spacing. 2) When the screw spacing is less than $0.9\lambda_c$, the ultimate capacities of built-up box-section columns are greater than the sum of the ultimate capacities of C-section and U-section columns, that is, the splicing effect of $1+1>2$. 3) When the screw spacing is greater than $0.9\lambda_c$, the ultimate capacity of the built-up box-section column is gradually close to

* 收稿日期:2020-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878055), National Natural Science Foundation of China (51878055)

作者简介:李艳春(1992—),女,河南商丘人,长安大学博士研究生

[†] 通信联系人, E-mail: liyanchun@chd.edu.cn

the sum of the ultimate capacities of the C-section and U-section columns, i.e. $1+1 \approx 2$. In order to calculate the ultimate capacities of CFS built-up box-section columns, an approach to predict the elastic critical load of distortion buckling was proposed based on the direct strength method (DSM) in American code, and then the calculated results were applied to the DSM to obtain the ultimate capacity of CFS built-up box-section columns. The results obtained from the calculation method are in good agreement with the experimental and numerical simulation results, which suggests the accuracy and applicability of the proposed method in this paper.

Key words: cold-formed thin-wall steel; built-up box-section columns; distortional buckling; critical buckling load; calculation method

在实际工程中,冷弯薄壁型钢(CFS)构件的结构形式和受力情况日益复杂,使得单肢构件往往难以满足设计和工程使用要求,因此拼合构件在实际工程中被应用.其中,由1根C形和1根U形截面CFS构件经自攻螺钉拼合而成的CFS箱形构件在CFS结构住宅体系中运用越来越广泛.因此,对CFS箱形截面拼合构件受力性能进行研究具有深远的意义.

相对局部屈曲和整体失稳,畸变屈曲是一类具有特殊性的稳定问题,因为截面失稳时既包含一部分板件发生弯曲的局部屈曲特征,又包含另一部分板件绕强迫转动轴(即板件交线)的扭转屈曲变形特征. Lau 和 Hancock^[1]最初对卷边槽形截面构件进行受压试验研究,认为畸变屈曲没有屈曲后强度. Kwon 和 Hancock^[2]对高强钢材卷边槽钢试验研究发现试件畸变屈曲后仍具有一定的强度储备,但是远小于局部屈曲后强度,并给出了工程中钢构件设计时避免出现畸变屈曲变形的建议. 管宇等^[3]研究的轻钢组合楼盖中就用到该拼合构件以提高整体楼盖边缘刚度. 因此它的受力特性及变形特征也备受关注. Young 等^[4]和 Zhang 等^[5]对由 Σ 形截面组成的拼合箱形柱进行试验研究,并采用直接强度法^[6]计算了试件的局部屈曲、畸变屈曲和整体屈曲三种屈曲模式下的极限承载力,但拼合闭口截面发生的畸变屈曲相对复杂,作者没有进行详细的描述;李元齐^[7]等人对 Q550 高强 CFS 拼合箱形截面进行轴压试验,提出了一种计算该拼合截面构件承载力的简化设计方法^[8],但均未对拼合箱形截面柱畸变屈曲相关特性及其影响因素进行详细研究. 拼合箱形截面构件的畸变屈曲特征是 C 形截面组成构件卷边带动翼缘内扣而不发生外张现象,因为外包 U 形截面组成构件对 C 形截面组成构件外张有一定的约束作用,这在一定程度上减弱了畸变屈曲变形幅度,从而增强了整体构件屈

曲后强度. 因此,对实际工程中常用的 CFS 拼合箱形截面构件的受力特性及变形特征的研究具有一定的实际意义.

由上述及查阅相关文献^[9-14]发现,学者对 CFS 箱形截面拼合构件畸变屈曲特性的研究甚少,并且对于该拼合截面的临界屈曲荷载及极限承载力,目前仍没有准确的计算方法. 鉴于此,本文对 9 根 C 形柱、9 根 U 形柱和 21 根由 C 形、U 形拼合而成的箱形截面柱进行轴压试验研究,详细研究其畸变屈曲变形特征及受力特性. 首先,本文设计四种截面尺寸、四种螺钉间距以研究截面几何尺寸、螺钉间距分别对 CFS 拼合箱形轴压柱畸变屈曲变形特征、屈曲临界荷载和极限承载力的影响规律. 其次,为进一步研究该拼合截面柱畸变屈曲特性,进行了一系列数值模拟分析,然后根据试验和有限元分析 CFS 拼合箱形柱畸变屈曲的变形特征及受力性能,为实际工程设计提供参考. 最后,提出拼合箱形截面柱屈曲临界荷载^[15]的计算方法,并将计算结果用于直接强度法^[6]以得到拼合箱形柱的畸变屈曲极限承载力,解决了目前无准确计算拼合截面试件屈曲临界荷载公式的问题.

1 试验概况

1.1 试件设计

CFS 拼合箱形截面柱由 C 形和 U 形截面通过自攻螺钉 ST4.8 连接拼合而成,设计三种截面形式如图 1 所示. 按 C 形截面腹板高度分为 140 mm、160 mm、180 mm 三个系列,试件编号规则见图 2. C 形截面尺寸分别为:140 系列 140 mm×40 mm×15 mm×1.5 mm;160 系列 160 mm×130 mm×12 mm×2.5 mm;180 系列 180 mm×140 mm×12 mm×2.5 mm,外包 U 形截

面几何尺寸均以 C 形截面尺寸匹配. 140 系列、160 系列和 180 系列试件的长度分别为 450 mm、1 500 mm 和 1 500 mm. 另外,试件的局部和整体初始缺陷的测量工具如图 3 所示,其中拼合构件的初始缺陷是由单根构件拼合后测量的.

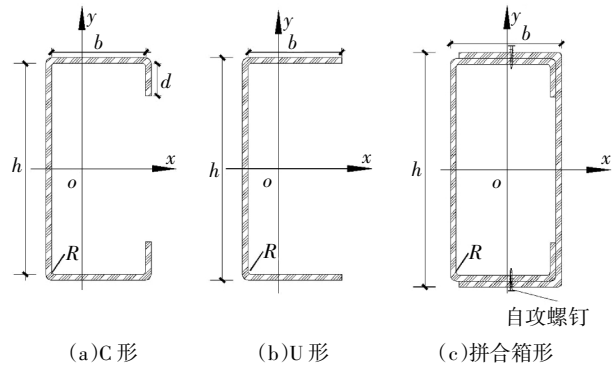


图 1 试件截面组成及尺寸
Fig.1 Composition and dimension of test specimens

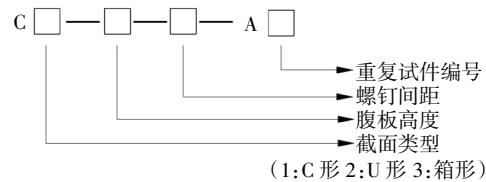


图 2 试件命名规则
Fig.2 Labeling rule of specimens

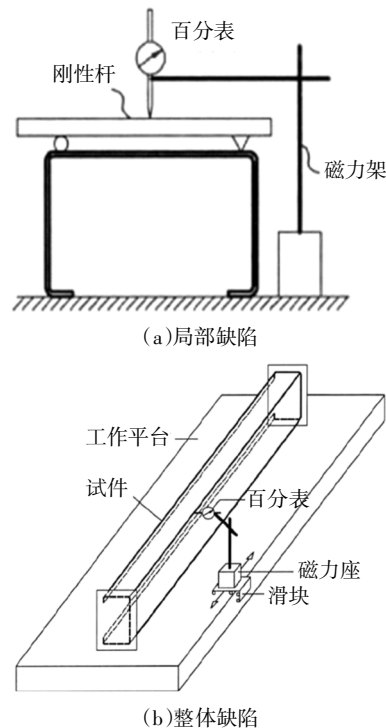


图 3 初始缺陷测量仪器
Fig.3 Measuring instruments for initial imperfection

螺钉间距以试件半波长为依据而设计且沿翼缘中间纵向排列. 立柱上下端部各设置 280 mm × 360 mm × 16 mm 端板,通过角焊缝与冷弯薄壁型钢拼合截面立柱相连接,如图 4 所示.

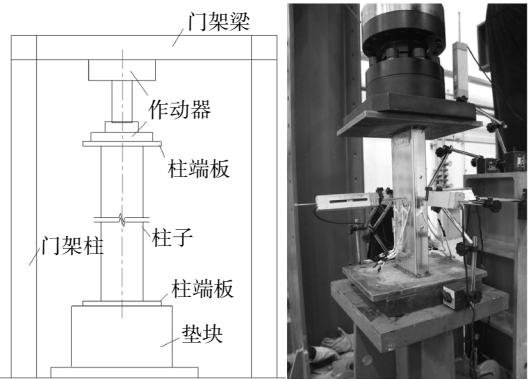


图 4 试验加载装置
Fig.4 Test setup

1.2 试件材性

冷弯薄壁型钢各构件依据《金属材料拉伸试验》(GB/T228.1—2010)^[16]中的规定确定钢材主要性能指标,如表 1 所示.

表 1 钢材力学性能

Tab.1 Mechanical properties of steel				
板厚/mm	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /GPa	δ /%
1.5	305.4	369.70	1.89	34.0
2.5	323.4	360.95	2.12	42.3

注: f_y 为屈服强度; f_u 为抗拉强度; E_s 为钢材弹性模量; δ 为伸长率.

1.3 试验装置

采用电液伺服程控结构试验机系统和反力门架施加竖向荷载,通过 DH3816 静态应变测试系统采集应变和位移数据. 试件的边界条件为两端固结,试验装置示意图及实物图,如图 4 所示.

1.4 测点布置

在柱中和上下 1/4 截面处布置应变片和位移计,截面内外均粘贴应变片,以便测出试件的屈曲临界荷载. 此外,在上端板架设一支位移计(D1)测量竖向位移,应变片、位移计布置如图 5 所示

2 试验过程及现象

2.1 试验现象及破坏特征

1)140 系列试件,加载初期,试件的腹板和翼缘

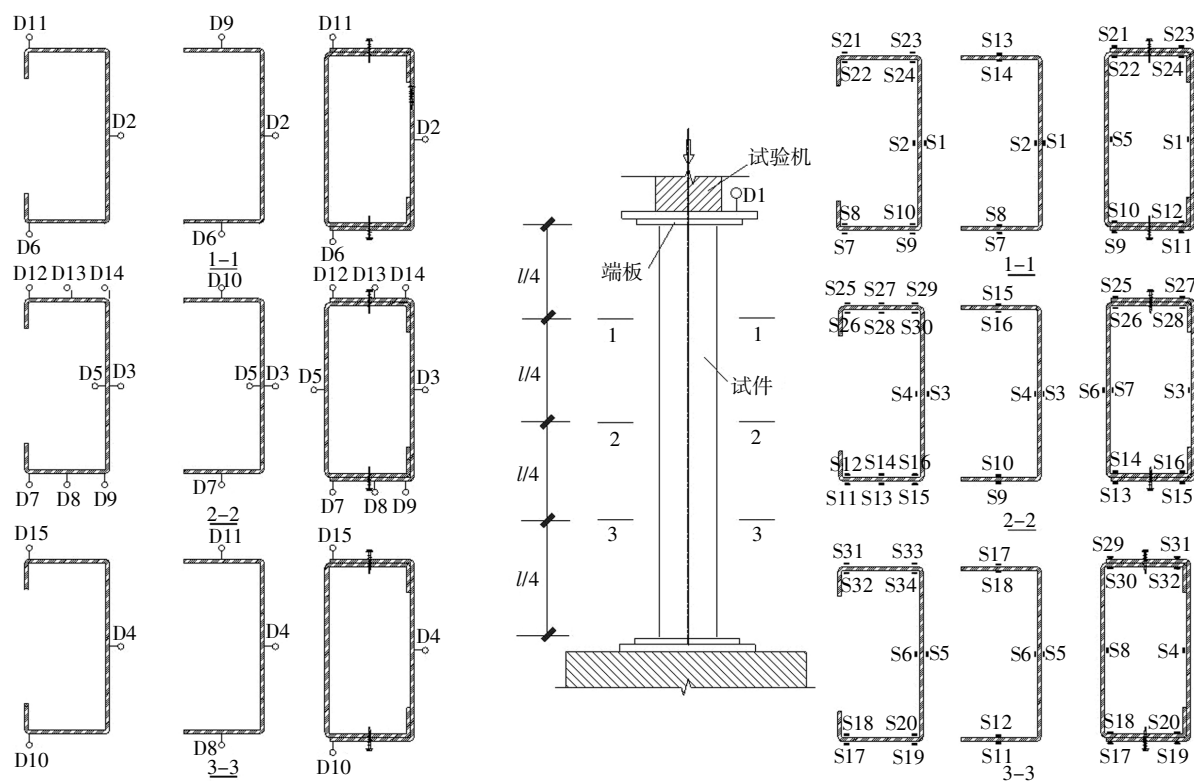
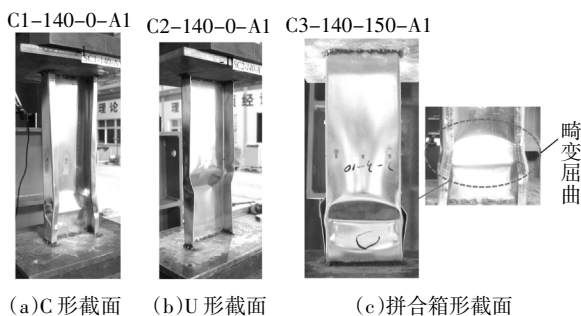


图5 试件的应变片和位移计布置

Fig.5 Arrangement of strain gauges and displacement meters

沿长度方向上均出现波浪状鼓曲波,随后 C 形截面试件翼缘-卷边棱线弯曲变形,即畸变屈曲,见图 6. 拼合箱形试件中 C 形截面翼缘及卷边的变形被 U 形截面遮盖,故试验过程中不易判断拼合箱形截面是否发生畸变屈曲,但试验后把箱形截面的 U 形拆去,可观察 C 形截面出现畸变屈曲,见图 6(c).



(a) C 形截面 (b) U 形截面 (c) 拼合箱形截面

图6 140 系列试件破坏现象

Fig.6 The failure phenomenon of 140 series specimens

2)160 系列试件,141 kN 左右时 C1-160-0-A1 中部左右翼缘外张,而 C1-160-0-A2 和 C1-160-0-A3 试件左右翼缘内扣;距上端 300 mm 处左右翼缘内扣,而 C1-160-0-A2 和 C1-160-0-A3 试件左右翼缘外张,如图 7(a)所示. 61 kN 左右时,C2-160-0-A1~A3 试件中部距上端板 310 mm 处左右翼缘外

张,随着荷载增加,自上而下均出现 3 个半波,如图 7(b)所示. 随着荷载增加,C3-160-300-A1~A3 试件中 U 形构件翼缘自上而下均出现 3 个半波且现象明显,如图 7(c),而试件破坏后的剖面图中可以观察到 C 形构件发生畸变屈曲,如图 7(d)所示. 100 kN 左右时,C3-160-600-A1~A2 试件中 U 形构件翼缘分别在距上端 450 mm 和 500 mm 处外张,而 C3-160-600-A3 在距下端 380 mm 处外张,随着荷载增加,3 个试件 U 翼缘均在螺钉间距之间出现外张,如图 7(c)所示. 70 kN 左右时,C3-160-1000-A1~A2 试件中 U 形构件翼缘分别在距上端 200 mm 处外张,而 C3-160-1000-A3 在距下端 50 mm 处外张,随着荷载增加,3 个试件 U 翼缘均在螺钉间距之间出现外张,达到峰值后,C 和 U 形构件的腹板中部均有外凸现象,而试件破坏后的剖面图中可以观察到 C 形构件发生畸变屈曲如图 7(d)所示. 每组 3 个试件之间出现破坏位置不同的原因主要是初始缺陷造成的.

3)对于 180 系列试件,单肢 C 形柱和拼合箱形柱均发生畸变屈曲,具体的试验现象与 160 系列试件类似,仅屈曲临界荷载及破坏位置不尽相同,具体试验现象见图 8.

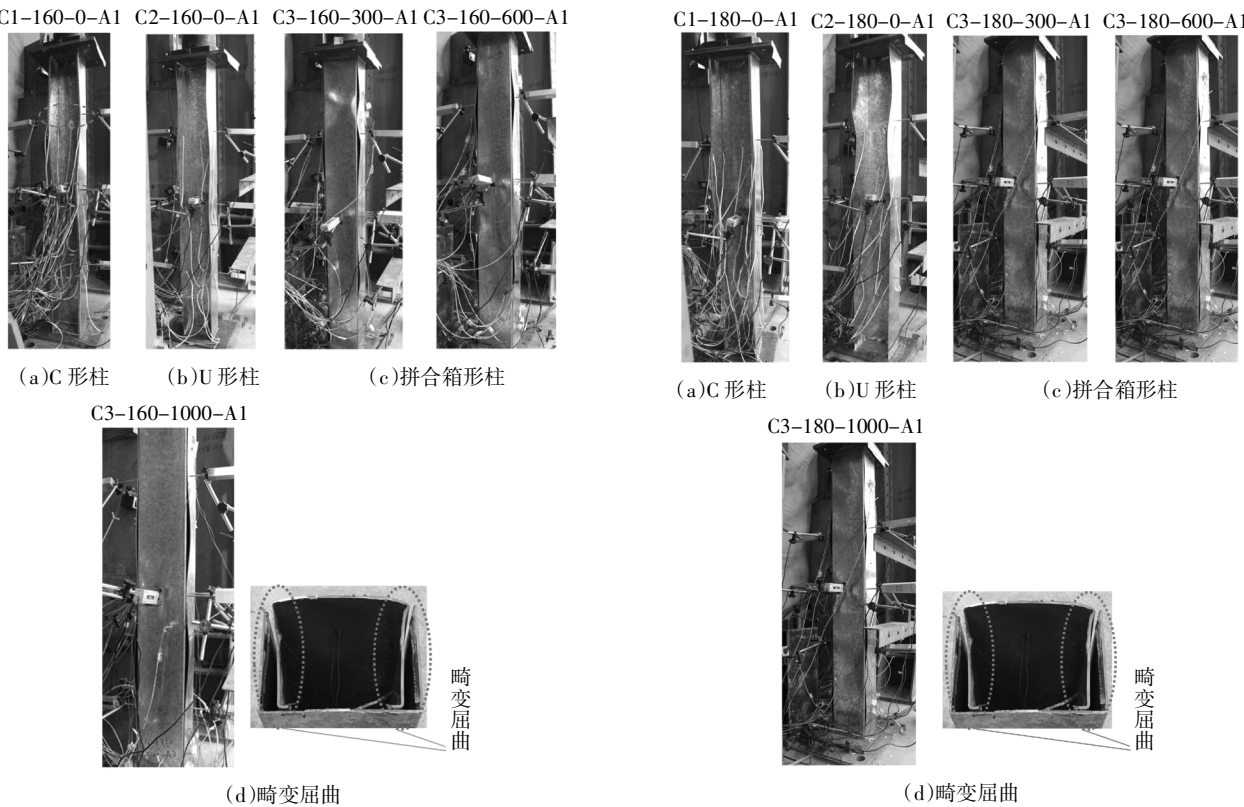


图 7 160 系列试件破坏现象

图 8 180 系列试件破坏现象

Fig.7 The failure phenomenon of 160 series specimens

Fig.8 The failure phenomenon of 180 series specimens

2.2 试验承载力

各试件的承载力试验值及试件初始缺陷如表 2 和表 3 所示. 其中 P_{t1} 、 P_{t2} 和 P_{t3} 分别为 C 形截面、U 形截面和箱形截面试件的承载力试验值; P_{y1} 和 P_{y2} 分别为 C 形截面和 U 形截面的屈曲荷载. 由表 2 和表 3 可知:

1) 无论是单肢试件还是拼合截面试件 P_t/P_y 总小于 1, 说明试件破坏时不能达到强度破坏的极限状态, 主要是因为失稳变形的二阶效应对承载力的削弱作用. 140 系列单肢 C 形截面柱发生局部-畸变屈曲模式, 说明该屈曲模式对单肢截面柱的承载力更加不利. 单肢 U 形截面柱均发生局部屈曲且随着腹

表 2 C 形和 U 形单肢截面柱承载力试验值

Tab.2 Bearing capacity of test results of C and U section columns

试件编号	几何缺陷/mm		试验值/kN		P_{t1}/P_{y1}	试件编号	几何缺陷/mm		试验值/kN		P_{t2}/P_{y2}
	δ_i	δ_o	P_{t1}	P_{y1}			δ_i	δ_o	P_{t2}	P_{y2}	
C1-140-0-A1	0.56	0.12	64.1	123.2	0.52	C2-140-0-A1	0.26	0.1	47.7	99.9	0.48
C1-140-0-A2	0.52	0.23	67.3	125	0.54	C2-140-0-A2	0.44	0.18	48.1	99.7	0.48
C1-140-0-A3	0.48	0.24	69.5	125.1	0.56	C2-140-0-A3	0.33	0.15	44	99.8	0.44
C1-160-0-A1	0.23	0.26	144.6	701.1	0.21	C2-160-0-A1	0.31	0.25	101.4	694.2	0.15
C1-160-0-A2	0.31	0.15	143.9	705.3	0.20	C2-160-0-A2	0.24	0.15	111.6	690.2	0.16
C1-160-0-A3	0.34	0.35	148.4	686.4	0.22	C2-160-0-A3	0.25	0.14	106.4	693	0.15
C1-180-0-A1	0.34	0.24	152.7	772.1	0.20	C2-180-0-A1	0.32	0.25	114.2	761	0.15
C1-180-0-A2	0.45	0.18	150.9	794.9	0.19	C2-180-0-A2	0.33	0.24	108.6	747.5	0.15
C1-180-0-A3	0.44	0.21	149.9	776.3	0.19	C2-180-0-A3	0.29	0.21	110	751.7	0.15

注: δ_i 为试件不平度; δ_o 为试件初弯曲. P_{t1} 和 P_{t2} 、 P_{y1} 和 P_{y2} 中 t 表示试验, y 表示屈曲, 1 表示 C 形截面, 2 表示 U 形截面.

表 3 CFS 拼合箱形柱承载力试验值和有限元值

Tab.3 Bearing capacity of the test results and the finite element results for CFS built-up box columns

试件编号	δ_1/mm	δ_o/mm	P_{B}/kN	P_{DSM}/kN	P_{A}/kN	$P_{\text{B}}/P_{\text{u}}$	$P_{\text{B}}/P_{\text{A}}$	试件编号	δ_1/mm	δ_o/mm	P_{B}/kN	P_{DSM}/kN	P_{A}/kN	$P_{\text{B}}/P_{\text{u}}$	$P_{\text{B}}/P_{\text{A}}$
C3-140-150-A1	0.66	0.17	120.5	120.9	125.3	1.00	0.96	C3-160-1000-A3	0.56	0.55	312.0	304.2	320.4	1.03	0.97
C3-140-150-A2	0.66	0.14	124.1	121.7	128.1	1.02	0.97	C3-180-300-A1	0.55	0.30	356.8	280.9	343.0	1.27	1.04
C3-140-150-A3	0.54	0.12	121.6	121.5	126.1	1.00	0.96	C3-180-300-A2	0.61	0.45	320.9	302.7	331.9	1.06	0.97
C3-160-300-A1	0.53	0.35	352.3	309.1	350.6	1.14	1.00	C3-180-300-A3	0.63	0.45	334.6	313.3	363.5	1.07	0.92
C3-160-300-A2	0.48	0.60	358.3	321.1	352.5	1.12	1.02	C3-180-600-A1	0.59	0.35	328.6	291.7	313.4	1.13	1.05
C3-160-300-A3	0.44	0.60	355.7	305.8	352.6	1.16	1.01	C3-180-600-A2	0.58	0.50	342.7	294.7	316.0	1.16	1.08
C3-160-600-A1	0.54	0.45	332.0	293.1	320.5	1.13	1.04	C3-180-600-A3	0.61	0.55	354.1	311.2	332.6	1.14	1.06
C3-160-600-A2	0.56	0.60	337.5	309.0	325.8	1.09	1.04	C3-180-1000-A1	0.49	0.35	325.5	313.5	316.9	1.04	1.03
C3-160-600-A3	0.61	0.45	337.7	302.6	327.1	1.12	1.03	C3-180-1000-A2	0.51	0.50	341.2	296.9	298.3	1.15	1.14
C3-160-1000-A1	0.58	0.45	310.6	302.6	306.7	1.03	1.01	C3-180-1000-A3	0.53	0.50	326.6	298.9	301.8	1.09	1.08
C3-160-1000-A2	0.59	0.55	315.6	306.4	304.2	1.03	1.04								
								平均值						1.09	1.02
								方差						0.068	0.051

板高度增加,极限承载力增大.

2)140 系列拼合柱仍发生 LD 模式屈曲,而 160 系列和 180 系列发生 D 屈曲,众所周知,畸变屈曲仅发生于 C 形截面,U 形截面发生局部屈曲,而拼合截面的畸变屈曲可由其剖面观察出,如图 7 和 8 所示.

3)由表 3 可知,拼合箱形柱极限承载力总大于两单肢极限承载力之和,说明拼合柱较好地体现了“1+1>2”的拼合效应.由表中试验力 P_{G} 可知,随着螺钉间距增大,试件试验力呈下降趋势,畸变屈曲现象更明显且半波个数逐渐增多,由此说明螺钉间距增大,拼合效应减弱.

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

采用 ABAQUS^[17]有限元软件对 CFS 试件进行建模分析. CFS 钢构件均采用 S4R 壳单元,ST4.8 自攻螺钉采用 C3D8 实体单元,柱两端端板采用解析刚体.钢材划分网格为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,自攻螺钉网格为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,有限元模型见图 9.

试件的轴向位移由位于模型两端的参考点控制(见图 9 中 RF1 和 RF2),参考点 RF2 在 U_z 方向的平动自由度为位移加载控制点.在柱下端约束参考点 RF2 处的 6 个自由度(3 个平动自由度和 3 个转动自由度)和约束柱上端参考点 RF1 处的除 U_z 外的 5 个自由度,以模拟柱两端固结的边界条件.

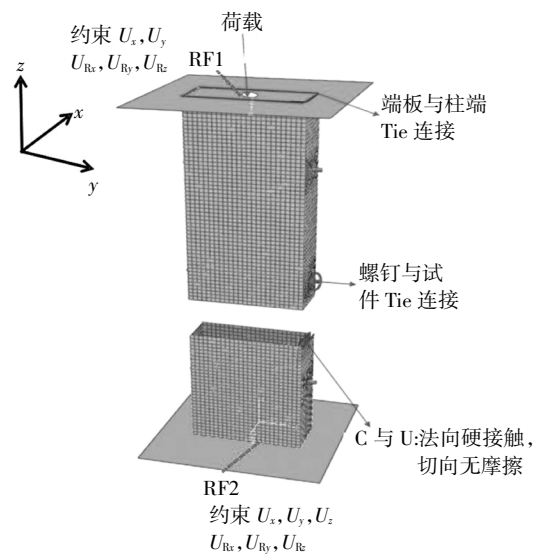


图 9 有限元模型

Fig.9 The finite element model

由于在试验过程中未观察到螺钉发生脱落和破坏的现象,因此有限元模型中自攻螺钉和拼合柱之间、试件端部与端板之间均采用 Tie 连接.拼合翼缘之间建立面与面接触.此外,为同时施加板件不平整度和试件初弯曲的初始缺陷,可根据 Zhang 等^[18]的建议,在特征值分析时选择性地试件板厚分别取为较小值 $t = 0.1\text{ mm}$ 和较大值 $t = 10\text{ mm}$,以便获得所需的局部屈曲模式和整体失稳模式.随后对两个特征值分析文件进行拼合便可同时施加板件不平整度和试件初弯曲.

3.2 有限元模型验证

各试件有限元分析的承载力和破坏模式与试验结果对比见表 3. 有限元分析得到的试件破坏特征与试验结果吻合较好. P_a 和 P_l 分别是有限元和试验承载力, P_l/P_a 的均值和方差分别为 1.02 和 0.051, 且两者的极限承载力也非常接近. 图 10 给出了部分试件有限元模型破坏模式与试验结果的对比, 可看出有限元模拟的试件破坏模式和破坏位置与试验试件结果一致, 说明本文有限元模型的准确性较好.

4 螺钉间距的影响规律

本文为研究螺钉间距对 CFS 拼合箱形柱畸变屈

曲特性及承载力性能的影响规律, 共设计 3 组畸变屈曲试件, 试件几何尺寸见表 4(D1 中的 D 为畸变

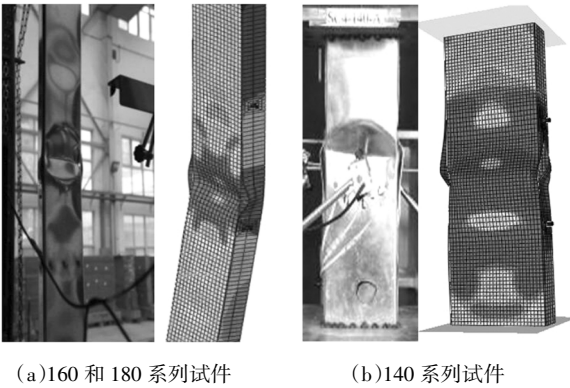


图 10 试件破坏模式对比

Fig.10 Comparison of the failure mode of specimens

表 4 畸变屈曲试件承载力理论值与有限元值的比较

Tab.4 Comparison of theoretical calculation results and finite element results of bearing capacity for distortional buckling specimens

试件 名称	组成 构件	几何尺寸/mm					$\sigma_l/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\sigma_d/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2})$	半波 长/mm	螺钉间 距/mm	拼合截面		两单肢和 $P_{\text{FEA2}}/\text{kN}$	整体截面 P_{FE3}/kN	理论计算 P_{DSM}/kN	$P_{\text{DSM}}/P_{\text{FE1}}$	$P_{\text{FE1}}/P_{\text{FE2}}$	$P_{\text{FE1}}/P_{\text{FE3}}$
		h	b	d	t	l					P_{FE1}/kN							
D1	C	60	60	10	2	850	881.7	433.1	130	65	347.61	320.21	395.07	385.48	1.11	1.09	0.88	
	U	64	60	—	2	850	92.2	—	130	91	346.19	320.21	395.07	358.08	1.03	1.08	0.88	
									130	117	344.94	320.21	395.07	341.80	0.99	1.08	0.87	
									130	130	342.26	320.21	395.07	329.81	0.96	1.07	0.87	
									130	200	339.42	320.21	395.07	325.05	0.96	1.06	0.86	
									130	250	331.36	320.21	395.07	319.28	0.96	1.03	0.84	
									130	300	325.50	320.21	395.07	313.41	0.96	1.02	0.82	
D2	C	75	75	10	2	850	562.7	279.5	150	75	400.93	337.35	477.48	431.41	1.08	1.19	0.84	
	U	77	75	—	2	850	59.3	—	150	105	397.30	337.35	477.48	383.45	0.97	1.18	0.83	
									150	135	395.38	337.35	477.48	364.30	0.92	1.17	0.83	
									150	165	385.81	337.35	477.48	344.61	0.89	1.14	0.81	
									150	195	381.28	337.35	477.48	336.32	0.88	1.13	0.80	
									150	225	381.02	337.35	477.48	329.87	0.87	1.13	0.80	
									150	300	354.25	337.35	477.48	320.64	0.91	1.05	0.74	
D3	C	100	50	10	3	850	929.7	745.1	140	70	625.04	609.95	638.87	658.41	1.05	1.02	0.98	
	U	106	50	—	3	850	241.9	—	140	98	622.93	609.95	638.87	648.35	1.04	1.02	0.98	
									140	126	620.58	609.95	638.87	625.82	1.01	1.02	0.97	
									140	154	619.13	609.95	638.87	610.18	0.99	1.02	0.97	
									140	182	617.49	609.95	638.87	596.49	0.97	1.01	0.97	
									140	210	615.87	609.95	638.87	591.70	0.96	1.01	0.96	
									140	280	612.85	609.95	638.87	576.09	0.94	1.00	0.96	
平均值															0.97	1.07	0.88	
方差															0.064	0.061	0.073	

屈曲,1 为试件编号; σ_1 是局部屈曲临界应力; σ_d 是畸变屈曲临界应力). 本文螺钉间距以 C 形截面畸变屈曲临界应力对应的半波长(λ_c)为依据,取值分别为: $0.5\lambda_c$ 、 $0.7\lambda_c$ 、 $0.9\lambda_c$ 、 $1.1\lambda_c$ 、 $1.3\lambda_c$ 、 $1.5\lambda_c$ 、 $2.0\lambda_c$, 以研究螺钉间距对畸变屈曲半波长的影响规律. 其中 λ_c 是 C 形截面畸变屈曲半波长, λ_c 由 CUFSM^[15] 得到. 此外,为判断畸变屈曲模式下 CFS 拼合箱形柱(如图 11(b))的拼合效应,本文提出两种极限状态的假设模型:①C 形和 U 形截面两单肢的极限强度之和作为下限值(如图 11(a));②拼合翼缘之间看作 $2t$ 厚的整体截面柱的极限承载力作为上限值(如图 11(c)).

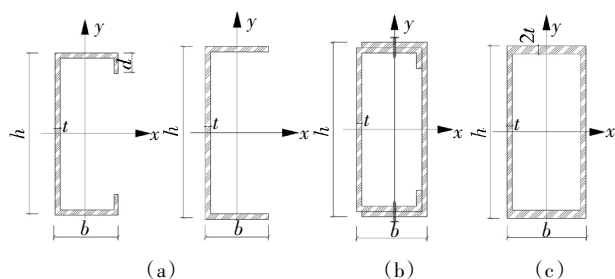


图 11 有限元简化模型

Fig.11 The finite element simplified model

有限元分析结果见表 4、图 12 和图 13,可得出以下结论:

1)由表 4 可知,随着螺钉间距增大,拼合箱形截面的极限承载力 P_{FE1} 逐渐变小,但仍大于 C 形和 U 形两单肢截面立柱的极限承载力之和 P_{FE2} ,且小于整体截面柱承载力 P_{FE3} . 同时, P_{FE1}/P_{FE2} 、 P_{FE1}/P_{FE3} 的平均值分别是 1.07、0.88,方差分别为 0.061、0.073. 由以上可知,螺钉拼合柱的极限承载力介于两单肢之和与整体截面的极限承载力之间,说明螺钉约束作用对拼合箱形截面柱的受力性能具有一定的影响,但螺钉间距的变化对箱形截面拼合柱承载力影响并不是很大.

2)以 D1 试件为例,从图 12 可以看出,随着螺钉间距增大,螺钉间距小于 $0.9\lambda_c$ 时,箱形截面试件的最大承载力大于 C 形和 U 形截面试件最大承载力之和,即 $1+1>2$ 的拼合效应;螺钉间距大于 $0.9\lambda_c$ 时,箱形截面试件的最大承载力逐渐接近 C 形和 U 形截面试件最大承载力之和,即 $1+1\approx 2$,说明螺钉间距较大时对拼合截面柱的极限承载力影响很小且紧固作用很小. 同理,观察表 4 可知,D2 和 D3 试件与 D1 试件有同样的结论. 因此,本文为拼合箱形截面

的螺钉间距取值提供了参考依据,以减小螺钉间距对拼合箱形截面承载力的影响.

3)由图 13 可知,以 D1 试件为例,CFS 拼合箱形截面柱的 C 形截面柱卷边带动翼缘仅有内缩现象,即畸变屈曲. 说明在螺钉约束的作用下,U 形截面柱较好地控制了 C 形截面柱卷边外张口畸变的发展.

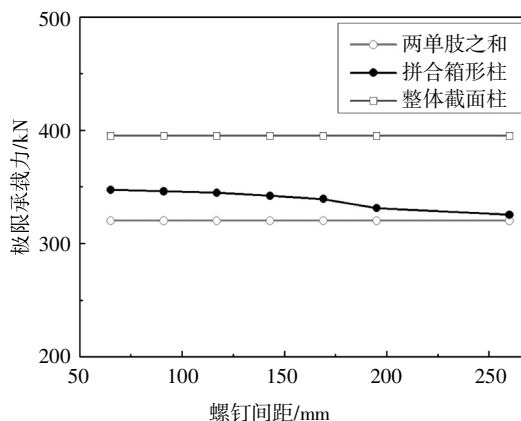


图 12 螺钉间距对试件极限承载力的影响

Fig.12 The influence of screw spacing on the ultimate strength of specimens

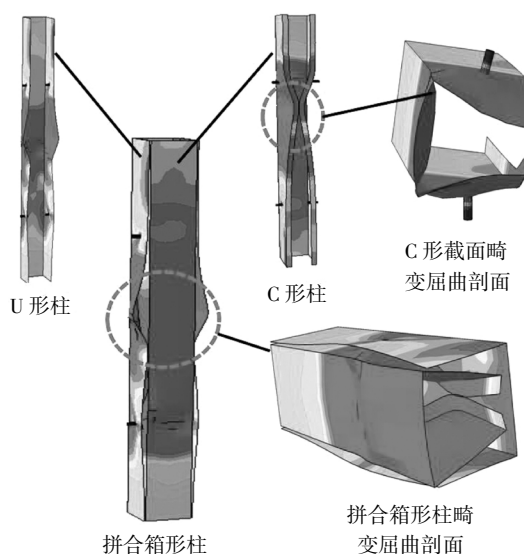


图 13 畸变屈曲示意图

Fig.13 Diagram of the distortional buckling

5 设计方法建议

由于目前没有明确的公式用于计算 CFS 拼合箱形柱的极限承载力,因此本文提出一种承载力计算方法,即用 CUFSM 软件计算得到 C 形和 U 形两单肢构件的屈曲临界荷载,再用直接强度法计算两单肢截面柱的极限承载力,运用承载力叠加法得到拼

合箱形截面柱的畸变屈曲极限承载力. 其中计算屈曲临界荷载时, C 形截面柱的有效长度取螺钉间距 (e) 与半波长 λ_c 的最小值, 即 $L = \min(\lambda_{\text{crl}}, e)$; U 形截面有效长度为试件实际长度.

5.1 直接强度法

美国 AISI 规范中直接强度法(DSM)规定: 轴压构件的极限承载力 $P_n = \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$, 其中 P_{ne} 、 P_{nl} 、 P_{nd} 分别为整体屈曲荷载、局部屈曲荷载和畸变屈曲荷载. 三种屈曲模式轴向荷载按下式计算.

1) 整体屈曲:

$$P_{ne} = \begin{cases} (0.658^{\lambda_c^2}) P_y, \lambda_c \leq 1.5; \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) P_y, \lambda_c > 1.5. \end{cases} \quad (1)$$

2) 局部屈曲:

$$P_{nl} = \begin{cases} P_{ne}, \lambda_1 \leq 0.776; \\ \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{\text{crl}}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{\text{crl}}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}, \lambda_1 > 0.776. \end{cases} \quad (2)$$

3) 畸变屈曲:

$$P_{nd} = \begin{cases} P_y, \lambda_d \leq 0.561; \\ \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{\text{crl}}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{\text{crl}}}{P_y} \right)^{0.6} P_y, \lambda_d > 0.561. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_y = A_g f_y$, $\lambda_1 = \sqrt{P_{ne}/P_{\text{crl}}}$, $P_{\text{crl}} = A_g f_{\text{crl}}$, $\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{\text{crl}}}$, $P_{\text{crl}} = A_g f_{\text{crl}}$, $\lambda_c = \sqrt{P_y/P_{\text{cre}}}$; P_{cre} 为弯曲屈曲荷载; P_{crl} 为局部屈曲荷载; P_{crl} 为畸变屈曲荷载; f_y 为屈服强度; f_{crl} 为局部屈曲临界应力; f_{crl} 为畸变屈曲临界应力; A_g 为构件截面的毛截面积.

5.2 本文计算方法的验证

将本文方法计算结果分别与试验和有限元结果进行对比, 结果如表 3 和表 4、图 14 所示, 可得以下几点:

1) 观察表 3 和表 4 可知, 试验结果(P_3)和理论计算结果(P_{DSM})比值 P_3/P_{DSM} 的平均值和方差分别为 1.09 和 0.068, 有限元结果(P_{FE})和理论计算结果(P_{DSM})比值 $P_{\text{FE}}/P_{\text{DSM}}$ 的平均值和方差分别为 0.97 和 0.064. 对比结果表明用直接强度法计算 CFS 箱形截面拼合柱畸变屈曲承载力稍偏保守, 但方法可行.

2) 由图 14 可知, 对于 CFS 箱形截面拼合柱畸变屈曲的正则化长细比 $0.5 < \lambda < 3.0$ 时, 本文计算方法总体偏于保守, 但与有限元结果相差不大, 说明本文计算方法用于预测 CFS 箱形截面拼合柱的畸变屈曲承载力是可行的.

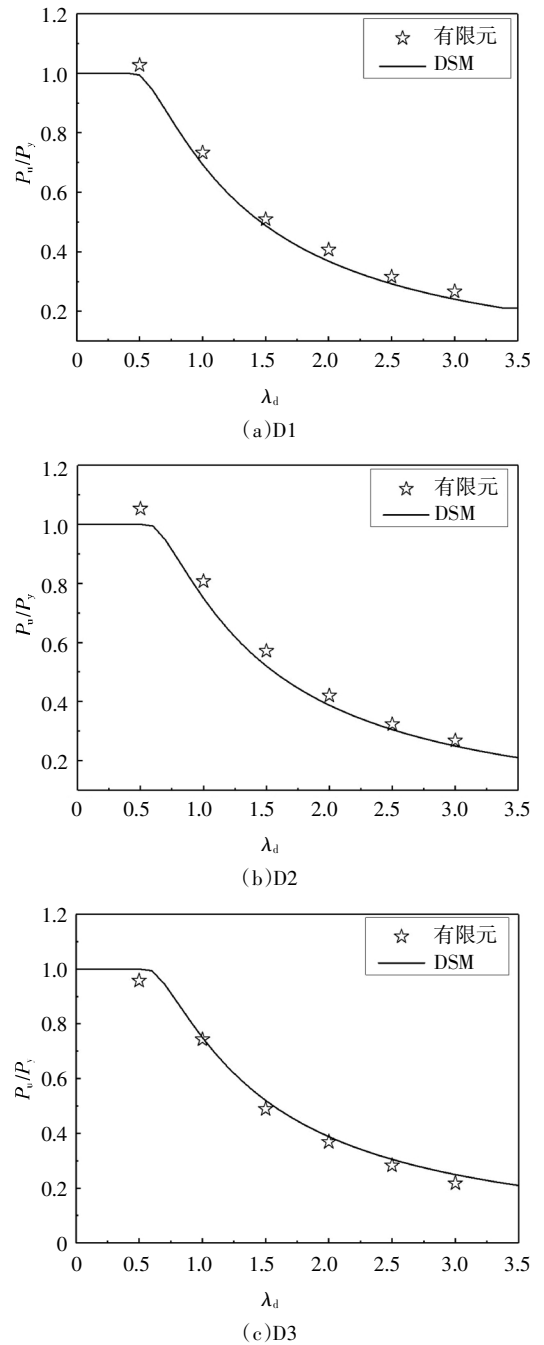


图 14 CFS 拼合箱形柱的 DSM 结果与有限元结果比较

Fig.14 Comparison of DSM results with the finite element results of CFS built-up box section columns

6 结论

基于冷弯薄壁型钢拼合箱形截面轴压柱试验研究、数值模拟分析和计算理论对比分析, 得出以下几点重要结论:

1) 当畸变屈曲临界荷载 P_{crl} 和局部屈曲临界荷载 P_{crl} 满足 $P_{\text{crl}} < P_{\text{crl}}$ 且 $P_{\text{ud}} < P_{\text{crl}}$ 时, 试件发生畸变屈曲.

2) CFS 拼合箱形截面的畸变屈曲均发生于其组成构件 C 形截面, 且 C 形截面翼缘和卷边一起发生内扣而无外张, 此现象说明其组成构件 U 形截面能够对组成构件 C 形截面的外张起到约束作用, 从而提高了 CFS 拼合箱形截面构件的屈曲后强度。

3) 螺钉间距小于 $0.9\lambda_c$ 时, 拼合柱的极限承载力大于 C 形和 U 形截面柱极限承载力之和, 此时畸变屈曲现象不明显; 螺钉间距大于 $0.9\lambda_c$ 时, 拼合柱的极限承载力逐渐接近 C 形和 U 形截面柱极限承载力之和, 畸变屈曲几乎均发生在两螺钉之间, 且螺钉间距越大, 畸变屈曲现象越明显且半波数越多。结果表明螺钉布置对畸变屈曲 CFS 拼合箱形截面的承载力及畸变屈曲有一定的影响。

4) 本文基于现行直接强度法提出了计算 CFS 拼合箱形柱畸变屈曲承载力的方法, 将其计算结果分别与有限元和试验结果进行对比, 本文方法稍微保守, 但比较安全, 证明了该计算方法的可行性及可靠性。此外, 进一步解决了 CUFSM 软件不能计算 CFS 拼合箱形截面弹性临界荷载的问题, 为今后拼合截面的设计应用提供了很好的借鉴。

参考文献

- [1] LAU S C W, HANCOCK G J. Distortional buckling formulas for channel columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1987, 113(5): 1063—1078.
- [2] KWON Y B, HANCOCK G J. Tests of cold-formed channels with local and distortional buckling [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(7): 1786—1803.
- [3] 管宇, 周绪红, 石宇, 等. 轻钢组合楼盖面内刚度和承载力计算方法研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2019, 46(9): 31—43.
GUAN Y, ZHOU X H, SHI Y, *et al.* Study on calculation method for in-plane stiffness and bearing capacity of thin-walled steel composite floor [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(9): 31—43. (In Chinese)
- [4] YOUNG B, CHEN J. Design of cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(5): 727—737.
- [5] ZHANG J H, YOUNG B. Experimental investigation of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 147: 380—392.
- [6] AISI North American specification for the design of cold-formed steel structural members: AISI S100-16 [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2007: 7—8.
- [7] 李元齐, 姚行友, 沈祖炎, 等. 高强冷弯薄壁型钢抱合箱形截面受压构件承载力试验研究 [J]. *建筑结构*, 2011, 41(6): 36—41.
LI Y Q, YAO X Y, SHEN Z Y, *et al.* Load-carrying capacity of 550 MPa high-strength cold-formed thin-walled steel built-up box section columns [J]. *Building Structure*, 2011, 41(6): 36—41. (In Chinese)
- [8] 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: 19—20.
Technical specification for cold-formed thin-walled steel structures: GB 50018—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002: 19—20. (In Chinese)
- [9] 袁涛涛. 闭合多肢冷弯薄壁型钢拼合截面立柱轴压承载力试验与理论研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010: 1—91.
YUAN T T. Experimental and theoretical research on bearing capacity of closed-section multi-limbs built-up cold-formed steel compression columns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010: 1—91. (In Chinese)
- [10] 李方涛. 冷弯薄壁型钢双肢抱合箱形截面柱轴向受力性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015: 1—110.
LI F T. Study on the axial mechanical properties of cold-formed thin-walled steel built-up box-section columns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015: 1—110. (In Chinese)
- [11] 聂少锋, 周天华, 袁涛涛, 等. 冷弯薄壁型钢拼合箱形截面立柱轴压性能试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(4): 46—52.
NIE S F, ZHOU T H, YUAN T T, *et al.* Experimental analysis on behavior of cold-formed steel box built-up section columns under axial compression [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(4): 46—52. (In Chinese)
- [12] NING K Y, YANG L, YUAN H X, *et al.* Flexural buckling behaviour and design of welded stainless steel box-section beam-columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 161: 47—56.
- [13] DAR M A, SAHOO D R, JAIN A K. Axial compression behavior of laced cold-formed steel built-up columns with unstiffened angle sections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 105727.
- [14] 徐克龙, 施刚, 林错错. 960MPa 高强度钢材轴压柱局部稳定性能及设计方法 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 44(1): 102—111.
XU K L, SHI G, LIN C C. Analysis and design method on local buckling behavior of 960 MPa high strength steel columns under axial compression [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(1): 102—111. (In Chinese)
- [15] SCHAFFER B W. CUFSM4.05—finite strip buckling analysis of thin-walled members [M]. Baltimore: Department of Civil Engineering, Johns Hopkins University, 2012: 1—84.
- [16] 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Metallic materials — Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (In Chinese)
- [17] 江丙云, 孔祥宏, 罗元元. ABAQUS 工程实例详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 28—181.
JIANG B Y, KONG X H, LUO Y Y. Detailed explanation of ABAQUS project example [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014: 28—181. (In Chinese)
- [18] ZHANG J H, YOUNG B. Numerical investigation and design of cold formed steel built-up open section columns with longitudinal stiffeners [J]. *Thin-walled Structures*, 2015, 89: 178—191.