

文章编号: 1000-4750(2017)12-0171-12

Q345GJ 钢(中)厚板 H 形及箱形柱残余应力与轴压稳定承载力分析

聂诗东^{1,2}, 戴国欣^{1,2}, 沈 乐^{1,2}, 杨 波^{1,2}

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 采用条形切割法对三种截面规格的 Q345GJ 钢焊接 H 形和箱形截面残余应力进行测试, 通过 MATLAB 拟合得到其简化的多折线分布模式, 并与规范所取残余应力分布模式对比。对 9 根焊接 H 形和 3 根焊接箱形(中)厚板足尺构件进行轴压试验, 获得构件整体稳定承载力。引入实测残余应力, 通过 ABAQUS 进行 Q345GJ 钢轴压柱有限元分析, 并与试验结果、规范计算结果进行对比, 同时开展参数化分析获得轴压构件稳定曲线。试验及分析结果表明: Q345GJ 钢 H 形和箱形截面采用多折线简化分布模式更符合残余应力实测结果; Q345GJ 钢(中)厚板 H 形截面翼缘采用不分层或考虑分层的残余应力简化模式, 对于构件绕弱轴稳定承载力影响不大; Q345GJ 钢 H 形截面实测残余应力分布模式在翼缘自由端处与规范有较大区别, 构件在正则化长细比为 0.4~1.1 区段的稳定承载力有下降趋势。

关键词: Q345GJ; 残余应力; 焊接 H 形截面; 焊接箱形截面; 稳定承载力

中图分类号: TU392.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0647

RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION AND OVERALL STABILITY LOAD-CARRYING CAPACITIE OF H-SHAPED AND BOX SECTION COLUMNS WELDED BY Q345GJ STRUCTURAL STEEL PLATES UNDER AXIAL COMPRESSION

NIE Shi-dong^{1,2}, DAI Guo-xin^{1,2}, SHEN Le^{1,2}, YANG Bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University) Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Sectioning method was adopted to obtain the residual stress distributions on three column sections fabricated by Q345GJ structural steel plates. The test results of residual stress distribution were simplified as multi line modes by using MATLAB and compared with national code modes. Nine welded H-shaped columns and three box section columns were axially loaded under compression to achieve the overall stability load-carrying capacities. Finite element models considering various distribution modes of residual stress, were employed via ABAQUS to simulate the experimental tests. The simulation results were then compared with the test results and calculation results from design code formula. Furthermore, parametric studies were performed to obtain the column curves. The experimental and analytical results show that the simplified multi line mode of residual stress distribution is more suitable than the one proposed by the national design code for both H-shaped and box section columns. Additionally, it is found that the residual stress distributions of one layer flange simplification and

收稿日期: 2016-08-25; 修改日期: 2016-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578089, 50808185); 中央高校基本科研业务费项目(CDJZR12200005)

通讯作者: 戴国欣(1955—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢结构基本原理及结构可靠度方面的研究(E-mail: dgx1018@126.com).

作者简介: 聂诗东(1974—), 男, 重庆人, 讲师, 博士生, 主要从事钢结构基本原理及结构可靠度方面的研究(E-mail: nieshidong@163.com);

沈 乐(1989—), 男, 四川资阳人, 硕士生, 主要从事钢结构基本原理的研究(E-mail: 20141602044@cqu.edu.cn);

杨 波(1981—), 男, 山东滨州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构连续倒塌及高强钢方面的研究(E-mail: yang0206@cqu.edu.cn).

multi-layer flange simplification cause little distinction on the load-carrying capacities of H-shaped section columns around the weak sectional axis. Due to the apparent differences of residual stresses on section flange ends between the experimental results and the mode proposed by the national design code, the buckling resistances would decrease if the normalized slenderness ratio lies in the range of 0.4~1.1 in column curves.

Key words: Q345GJ; residual stress; welded H-shaped section; welded box section; overall stability load-carrying capacity

国产 GJ 系列结构钢是优质建筑用钢材,对应的产品标准为《建筑结构用钢板》^[1](GB/T 19879-2005),强度系列涵盖 235 MPa、345 MPa、390 MPa、420 MPa、460 MPa 五个级别,相比于普通低合金高强度结构钢^[2]而言,有如下特点:1) 对板厚大于 16 mm 的板材屈服强度波动范围进行限制,除要求屈服强度下限值之外,还规定了屈服强度上限值,随等级不同允许波动范围在 120 MPa~140 MPa;2) GJ 钢厚度效应较低,35 mm 以下板厚无厚度效应带来的屈服强度下降,35 mm~50 mm 板厚屈服强度仅降低 10 MPa,50 mm~100 mm 板厚屈服强度仅降低 20 MPa,均优于同厚度低合金钢;3) GJ 钢增加了屈强比限值、弯曲合格试验要求,同时延伸率要求也较低合金钢严格;4) GJ 钢焊接碳当量要求也比低合金钢更为严格,并且增加了焊接裂纹敏感性指数,同时还可以附加厚度方向性能的要求。GJ 钢因其更稳定的强度指标、更低的厚度效应、更好的韧性性能、更好的加工性能,在重要结构、厚板构件、抗震结构等严格条件下是较低合金钢更优的选材对象。GJ 钢从 21 世纪初开始就已大量应用于国内重大工程,大跨项目如国家主体育场、首都新机场、国家大剧院、厦门国际会展中心、广州体育馆等,以及超高层建筑如上海东方明珠电视塔、北京银泰大厦、CCTV 新大楼、凤凰国际传媒中心等^[3-4]。

国内外已有大量关于焊接钢柱截面残余应力分布和受压构件稳定承载力的试验研究。Mcfalls 等^[5]对焊接 H 形截面的残余应力以及构件整体稳定性进行试验研究,指出厚型焊接截面的残余应力较薄型的低,并且残余应力对弱轴的影响大于强轴;Alpsten 等^[6]实测了厚板焊接截面的残余应力,指出厚板焊接截面的焊接残余应力较小;Usami 等^[7]系统研究了一种名义强度为 460 MPa 钢材的焊接箱形构件在轴压、偏压及纯弯等荷载条件下的力学性能;近几年国内部分高校也对 Q460 焊接 H 形和箱形截面的残余应力以及轴压性能进行了一系

列的试验及理论研究^[8-12],指出按现行钢结构设计规范 c 类曲线低估了 Q460 焊接箱形截面,建议将其提升至 b 类曲线。

另外,针对 GJ 钢构件开展的研究从其标准颁布前后就一直在进行。褚燕风等^[13]对 Q345GJ 钢进行独立材性试验并结合厂家原始数据进行分析,获得其统计参数;施刚等^[14-15]进一步对 Q390GJ、420GJ 和 Q460GJ 钢的材性设计指标进行了可靠度研究,并给出对应的抗力分项系数建议值。李元齐等^[16]利用条形切割法实测了板厚为 80 mm 的 GJ 钢厚板焊接 H 形截面的残余应力,指出其残余应力峰值不高,沿厚度方向变化较大;魏奇科^[17]、Yang 等^[18]实测了 Q345GJ 和 Q460GJ 钢焊接 H 形截面梁的残余应力,指出其残余应力分布形状与普通钢材基本一致,但数值较普通钢材小;而邱林波等^[19-20]测试了 Q550GJ 焊接 H 形和箱形截面的残余应力,指出其残余应力分布规律模式与普通钢材一致,但数值比文献[21]建议值低。罗仕伟^[22]、王赛博^[23]等分别对 Q345GJ、Q460GJ 钢梁整体稳定性能进行了试验研究;陆建锋等^[24]对 Q690GJ 钢材梁柱节点抗震性能进行了试验研究。

从上述研究可以看出,针对 Q345GJ 钢(中)厚板焊接钢柱构件层次受力性能的试验研究还很少。作为工程中应用最为量多面广的 345 MPa 级钢材,本文对 Q345GJC(中)厚板截面残余应力分布以及轴心受压足尺构件稳定承载力开展研究。需要明确的是本文中有有关 Q345GJ 构件性能的结论,是与非 GJ 钢构件(Q345)比较得出的。因现行钢结构设计规范中尚无 GJ 钢的应用条文,本文开展的研究内容是为 GJ 钢设计条文进入规范的基础工作。

1 试验概况

1.1 构件尺寸及材性参数

针对工程中常用的柱截面形式,设计了图 1 所示的焊接 H 形轴压构件 ZH1~ZH3 和焊接箱形轴压构件 ZX;并同条件制作了焊接 H 形残余应力测试

构件 H25、H35 和焊接箱形残余应力测试构件 B16，截面参数实测值如表 1 所示。焊接截面的各部分板件均采用火焰切割从整板切取，并通过埋弧焊组焊成相应截面。H 形截面构件采用 45°K 形剖口熔透焊缝(全自动埋弧焊)，间隙 $c=0$ ，钝边尺寸 $p=5\text{ mm}$ ，单道成型；箱形截面采用 45°单边 V 形剖口熔透焊缝(半自动埋弧焊)， $c=0$ ， $p=4$ ，两道成型。焊丝采用 H08MnA，直径为 4 mm，焊剂采用 HJ431，焊接电流为 600 A，电压为 38 V~42 V，焊速为 30 cm/min~40 cm/min。对组成构件的板件进行了材性试验，实测结果如表 2 所示。

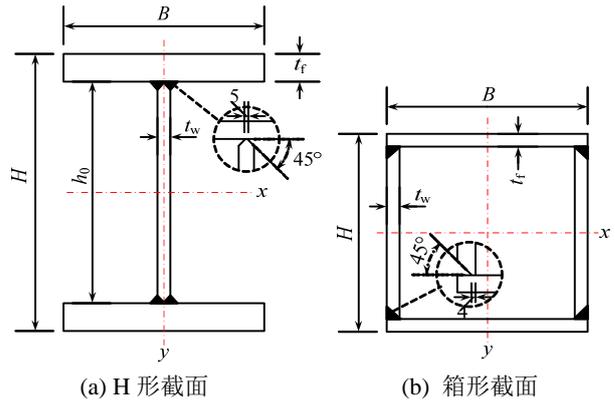


图 1 截面类型以及焊缝示意

Fig.1 Diagrams of column sections and welding

表 1 构件尺寸表

Table 1 Dimensions of specimens

构件编号	H/mm	B/mm	t_w/mm	t_f/mm	A/mm^2	L/mm	L_e/mm	λ	λ_n
ZH1-1	347.80	248.82	15.96	35.30	21991	5023	5262	79.14	1.165
ZH1-2	352.20	249.27	16.35	35.53	22310	4962	5201	78.28	1.153
ZH1-3	347.20	249.38	16.68	35.28	22211	5048	5287	79.68	1.173
ZH2-1	351.60	249.38	16.08	25.88	17729	5017	5256	82.59	1.243
ZH2-2	352.20	249.76	16.36	26.34	18058	5036	5275	82.74	1.245
ZH2-3	352.80	249.40	16.52	26.18	18022	5025	5264	82.91	1.248
ZH3-1	348.40	248.85	16.22	25.70	17353	3530	3769	58.41	0.894
ZH3-2	347.80	249.00	15.60	25.84	17608	3542	3781	58.79	0.891
ZH3-3	347.40	249.31	15.90	25.34	17488	3550	3789	58.50	0.896
ZX-1	249.38	249.38	15.70	15.70	14675	5037	5276	63.83	0.797
ZX-2	251.76	251.76	15.82	15.82	14930	5045	5284	62.32	0.791
ZX-3	250.76	250.76	15.60	15.60	14674	5056	5295	62.67	0.795
H25	350	250	16	25	17300	2100	—	—	—
H35	350	250	16	35	21980	2100	—	—	—
B16	250	250	16	16	14976	1800	—	—	—

注：1) 表中 A 为截面面积； L 为构件加工长度； L_e 为构件计算长度，取为支座接触点间的距离； λ 为长细比， λ_n 为正则化长细比。

2) 构件 H25、H35、B16 为残余应力测试构件，表中所列尺寸为设计尺寸。

表 2 Q345GJ 钢材力学指标参数

Table 2 Mechanical properties of Q345GJ structural steel

t/mm	E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	f_y/f_u	$\epsilon_y/(\%)$	$\epsilon_t/(\%)$
16	215	443	583	0.76	1.94	14.07
25	219	459	611	0.75	1.91	13.69
35	218	432	587	0.74	1.57	12.84

注：1) 根据《建筑结构用钢板》(GB/T 19879-2005)^[1]的取值方法对于 Q345GJ 钢取上屈服点作为屈服强度代表值；

2) 表中 ϵ_t 为试件拉应力达到最大值时的应变值，而非一般意义上的断后伸长率。

1.2 残余应力测试

截面纵向残余应力是影响轴压构件整体稳定承载力的重要因素之一，试验采用条形切割法通过测量条带分割前后长度变化量，反算出截面内部的残余应力，该法适于厚板类截面情况。因切割法为破坏性测量，故按构件相同加工条件制备了对应的

切条短构件(长 1.8 m 或 2.1 m)，并以短构件测试出来的残余应力分布作为受压试验完整构件的分布。测试条加工分割流程如图 2 所示。通过测试孔距的变化值计算出每个条带由于残余应力释放后的纵向应变 ϵ ，根据胡克定律 $\sigma = -E\epsilon$ 计算得到对应条带的残余应力数值。其中钻孔采用电动手枪钻，构件横向切段采用水冷锯床，板件分割以及纵向切条均采用电火花数控线切割机，测试孔距采用 YB-25 型(基距为 250 mm)手持式应变仪进行测量。

图 3 给出了构件钻孔尺寸示意及标准孔详图。为了消除短构件端部残余应力释放带来的影响，从距构件一端 700 mm(约为最大截面高度的 2 倍)处向内延伸切取长度为 280 mm 的残余应力测试段；测试条带宽度取为 8 mm~16 mm 不等，并在焊缝位置

处加密。考虑到 H 形截面翼缘较厚，属于(中)厚板范畴，故对翼缘进行分层处理，各截面残余应力测试条带划分方式如图 4 所示。

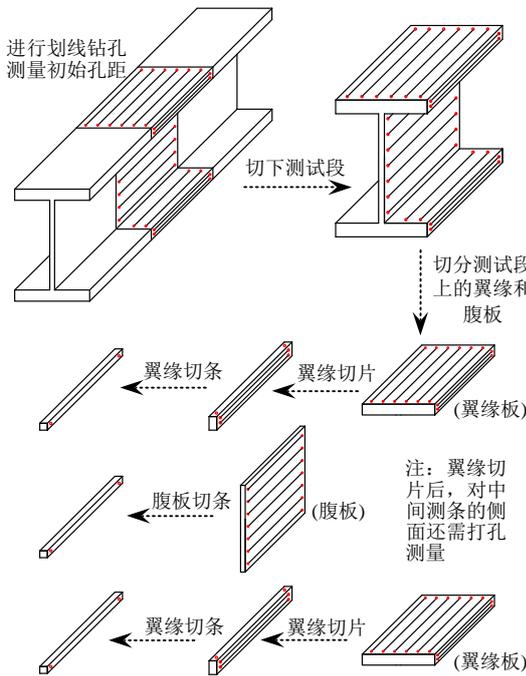


图 2 条带分割流程图

Fig.2 Flow chart of strip cutti

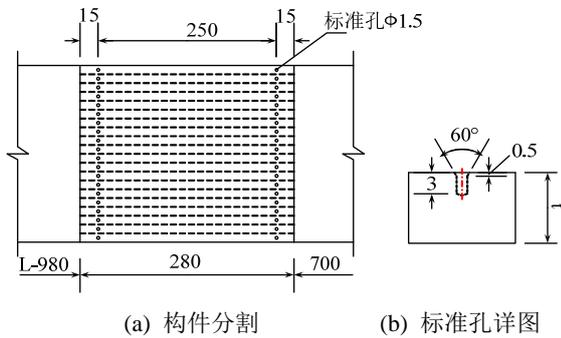


图 3 残余应力短构件取样位置示意图以及标准孔详图

Fig.3 Arrangement of strip selection and the detail of measurement hole

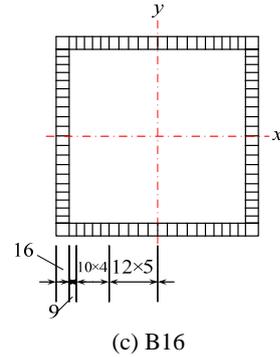
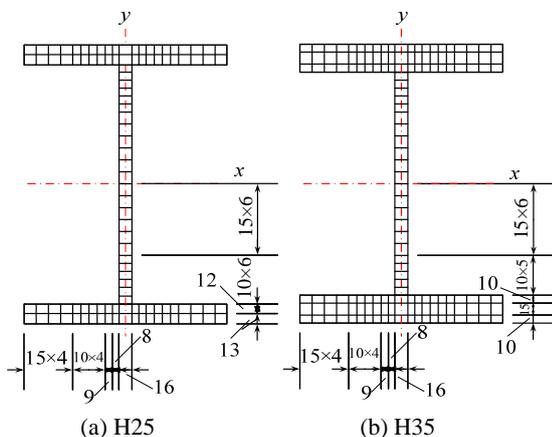


图 4 截面测条划分示意图

Fig.4 Strips of H-shaped and box sections

1.3 构件轴压承载力试验

试件加工完成后对构件几何尺寸进行测量，并通过拉线方法测量构件的面内、面外初始弯曲。9 根构件均在 1000 t 长轴试验机上开展试验(如图 5 所示)，构件上部采用球铰支座，底部采用单刀口支座实现轴压构件绕弱轴失稳的铰接支承条件。试件跨中截面垂直于弯曲侧设有 3 个位移计，沿跨中截面周边布置若干应变片。试验开始前先进行几何对中，然后再施以预压，直至各截面四角应变片读数不超过平均值的 5%即认为物理对中满足要求。

试验加载方式采用荷载控制的分级加载，初始加载约为 10% 估算荷载，加载至 70% 后荷载分级逐渐减小，最小加载级差为 10 kN，每级稳定持荷 2 min，直至构件达到极限承载力。每级荷载持荷时间内读数两次，分别在加载稳定和持荷结束时读取相应位移计与应变片的读数。图 6 列出了部分构件最后破坏时的情况。

2 试验结果及分析

2.1 残余应力实测结果及分析

2.1.1 实测残余应力结果

三种截面形式的残余应力实测结果如图 7 所示。需要注意的是当实测残余应变超过钢材屈服应变时，则截面残余应力直接取为试件屈服强度。从图 7 两个 H 形截面翼缘残余应力分布可以看出，翼缘残余应力分布整体为 W 形，翼缘板焊缝位置处内侧存在残余拉应力最大值，H25 为 459 MPa，H35 为 432 MPa，均已达实测屈服强度(见表 1)。翼缘自由端处板件的残余应力实测值很小，其绝对值最小时 H25 为 7.6 MPa(拉)，H35 为 1.5 MPa(压)，说明(中)厚板在下料过程中焰切边的热影响并不显著。从翼缘板沿板厚方向由内向外的分层结果可知，靠近焊

缝处的拉应力值变化梯度较为明显,且 H35 的层间差异大于 H25,而远离焊缝的翼缘分层测试结果基本重合。对 H 形截面腹板因板厚为 16 mm 并未分

层,从其实测结果可以看出,腹板中间为较均匀的残余压应力,而腹板靠近焊缝处残余拉应力已达材料屈服强度 443 MPa。

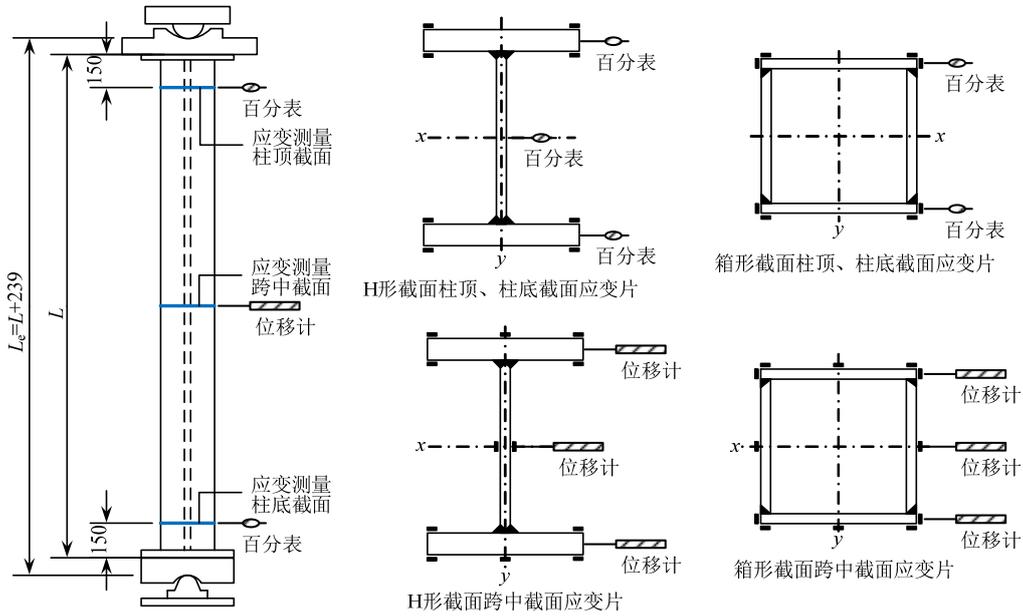


图 5 试验装置及测点布置图

Fig.5 Test setup and layout of strain gauges

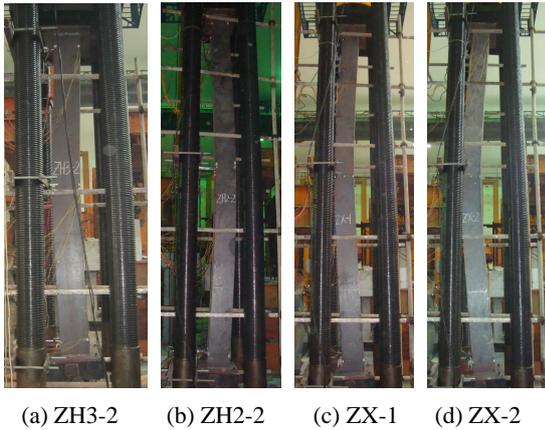
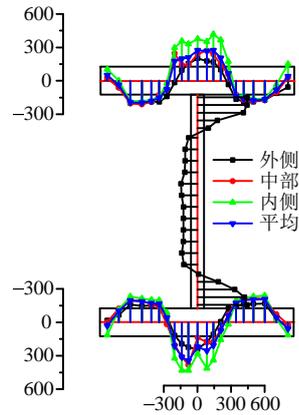
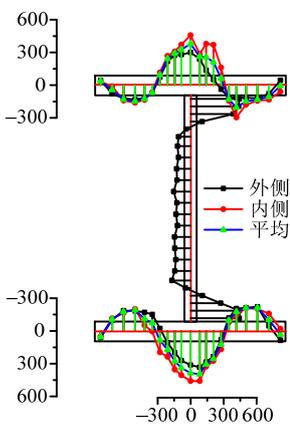


图 6 构件试验破坏情况

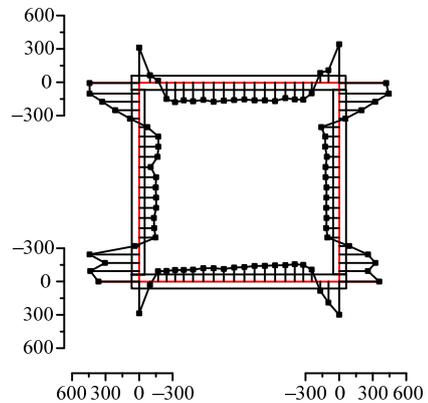
Fig.6 Typical failure modes



(b) H35 残余应力测试结果 /MPa



(a) H25 残余应力测试结果 /MPa



(c) B16 残余应力测试结果 /MPa

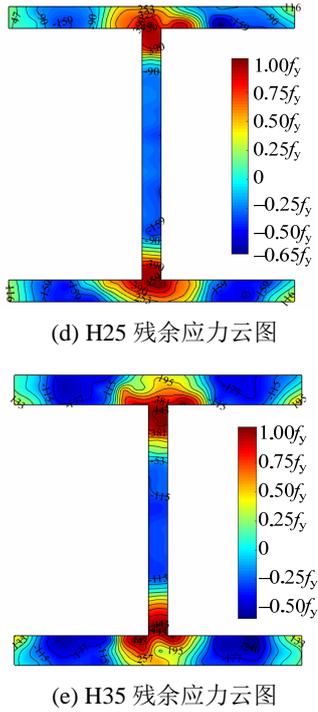


图 7 实测残余应力分布

Fig.7 The residual stress distributions from experimental tests

从箱形截面实测残余应力分布可以看出，在截面四角焊缝处均存在较大拉应力，而远离角部区域则表现为接近等值的较小残余压应力。因为四角焊缝采用的是单边 V 形坡口，开坡口的钢板板端残余拉应力值略高于未开坡口的钢板，事实上开坡口钢板的焊接残余拉应力峰值大多数情况下都已达到板件的实测屈服强度 443 MPa。

为了衡量残余应力测试结果的准确性，可通过式(1)计算实测残余应力的不平衡应力值 σ_{error} 来进行判断。表 3 列出了各截面板件以及全截面不平衡应力的计算结果，可以看出 H 形截面翼缘、腹板板件不平衡应力及全截面不平衡应力均较小；箱形截面因焊缝非完全对称使得各个单板存在一定不平衡应力，但整体的不平衡应力很小。由此可知，残余应力测量结果是可靠的，并且可近似认为 H 形截面各组成板件的板内残余应力满足自平衡，箱形截面残余应力按全截面平衡考虑。

$$\sigma_{error} = \sum A_i \sigma_i / \sum A_i \quad (1)$$

表 3 不平衡应力 /MPa

Table 3 Residual stress closing error

截面类别	上翼缘	下翼缘	左腹板	右腹板	全截面
H25	20.39	25.31	-3.76		15.47
H35	-21.49	-8.91	28.23		-6.35
B16	-45.37	-62.49	59.70	58.13	2.50

2.1.2 残余应力分布模式

由图 7 所示，H25、H35 两种 H 形截面尽管翼缘厚度不同，但截面整体分布规律较为一致，故采用同一模式进行简化拟合。另外对于箱形截面，忽略焊缝坡口处角部垂直相交板残余拉应力的不同，对四块钢板残余应力取几何对称关系按八组数据进行拟合。拟合方式采用如图 8 所示的多折线模式，其中 H 形截面构件翼缘采用四折线模式如式(2)所示，腹板采用三折线模式如式(3)所示；箱形截面采用双折线模式进行拟合，如式(4)所示。公式中待定系数的确定需引入截面各板件应力平衡公式(5)~式(7)联立求解。式中 B 为截面宽度， h_0 为腹板高度。

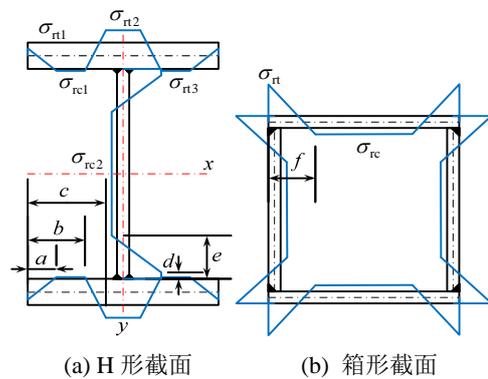


图 8 简化残余应力分布模式

Fig.8 The simplified distribution mode

利用式(2)~式(7)通过 MATLAB 按翼缘分层(简记为 FC 模式)、翼缘不分层(简记为 BFC 模式)分别对残余应力测试数据进行拟合，其中不分层拟合按同一位置多层数值点同时参与拟合。最终拟合出来的残余应力分布模式如图 8 所示，分布模式中各关键点数值如表 4 所示，其中图 8 还对比列出了钢结构设计规范采用的残余应力分布模式^[25](简记为 GB 模式)。

H 形截面翼缘：

$$\sigma_r = \begin{cases} \sigma_{r1} + \frac{(\sigma_{rc1} - \sigma_{r1})x}{a} & , x \leq a \\ \sigma_{rc1} & , a < x \leq b \\ \sigma_{rc1} + \frac{(\sigma_{r2} - \sigma_{rc1})(x-b)}{c-b} & , b < x \leq c \\ \sigma_{r2} & , c < x \leq B/2 \end{cases} \quad (2)$$

H 形截面腹板：

$$\sigma_r = \begin{cases} \sigma_{r3} & , x \leq d \\ \sigma_{r3} + \frac{(\sigma_{re2} - \sigma_{r3})(x-d)}{e-d} & , d < x \leq e \\ \sigma_{re2} & , e < x \leq h_0/2 \end{cases} \quad (3)$$

箱形截面板件:

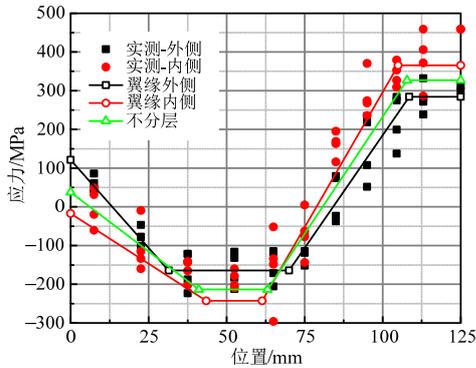
$$\sigma_r = \begin{cases} \sigma_{rt} + \frac{(\sigma_{rc} - \sigma_{rt})x}{f}, & x \leq f \\ \sigma_{rc}, & f < x \leq B/2 \end{cases} \quad (4)$$

$$a\sigma_{rt1} - a\sigma_{rc1} + (b+c)(\sigma_{rc1} - \sigma_{rt2}) + B\sigma_{rt2} = 0 \quad (5)$$

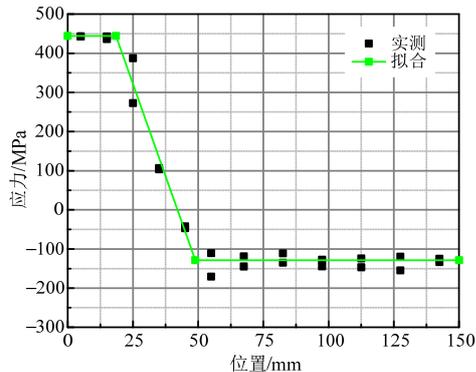
$$d\sigma_{rt3} - d\sigma_{rc2} + e\sigma_{rt3} - e\sigma_{rc2} + h_0\sigma_{rc2} = 0 \quad (6)$$

$$(4f^2 - tf + t^2)\sigma_{rt} - (4f^2 - 4fB + t^2)\sigma_{rc} = 0 \quad (7)$$

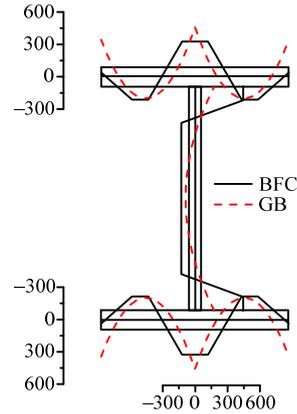
从图 9 可以看出对于 H 形截面, 本次实测残余应力分布采用多折线简化模式总体趋势上与规范采用的二次曲线分布模式类似, 但有如下区别: 1) 翼缘靠近焊缝处, 与 GB 模式中残余拉应力取为单一峰值点 f_y 不同, 实测得到的(中)厚板残余拉应力峰值表现为一区域分布, 显示出板件宽厚比较小时对于残余拉应力峰值有钝化效应, 故简化模式中取水平分布段较为合理; 2) 在翼缘端部, GB 模式的残余拉应力为 $0.75f_y$ 明显大于实测值, 简化模式中不论分层、不分层时残余拉应力均较小, 甚至 H25 的翼缘内侧有出现残余压应力的情况; 3) 腹板靠近焊缝处, 由于焊接热影响较大, 按实测结果简化的分布模式, 其腹板焊缝处残余拉应力值接近实测屈服强度, 远大于 GB 模式取值 $0.4f_y$; 4) 腹板中间区域, 简化模式取为水平段与实测结果符合较好, 而规范对腹板中间点取 $0.2f_y$ 并按应力平衡确定出二次曲线分布模式, 这点也是有区别的。



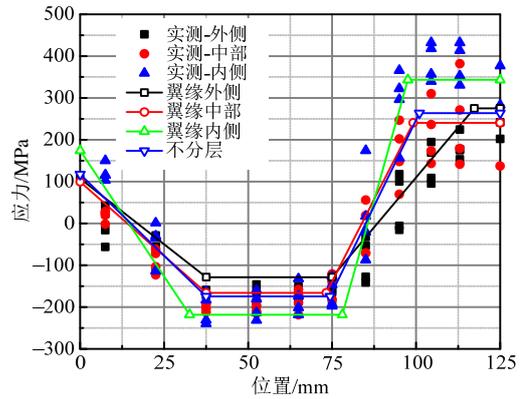
(a) H25 翼缘拟合结果



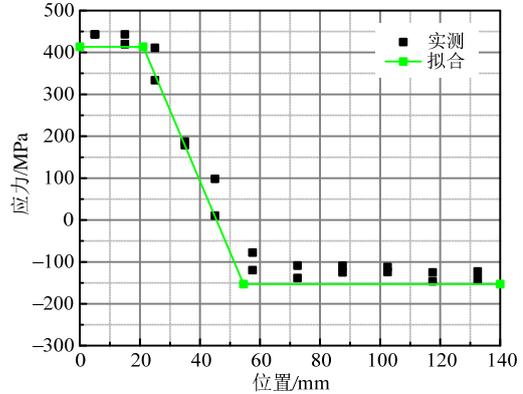
(b) H25 腹板拟合结果



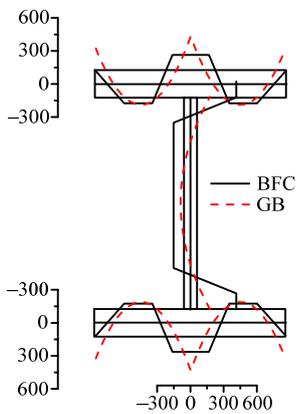
(c) H25 不同模式比较 /MPa



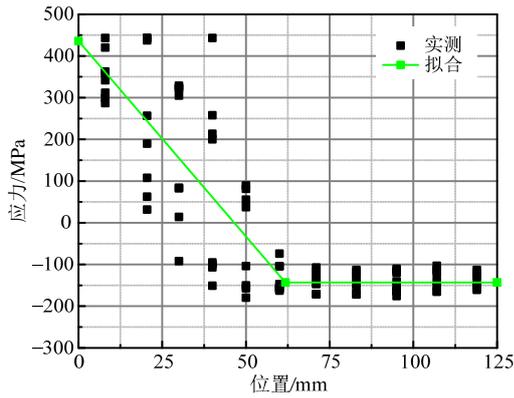
(d) H35 翼缘拟合结果



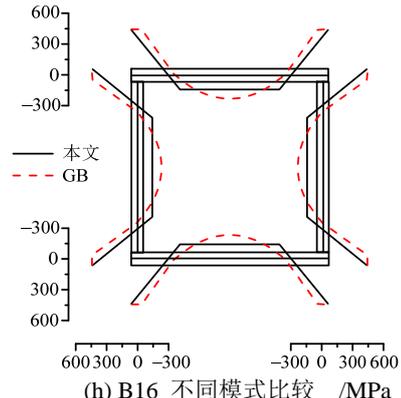
(e) H35 腹板拟合结果



(f) H35 不同模式比较 /MPa



(g) B16 拟合结果



(h) B16 不同模式比较 /MPa

图9 试验数据与拟合结果对比

Fig.9 Comparison between experimental data and fitting curves

表4 各截面关键参数汇总

Table 4 Key data on different sections

H 形截面	位置	翼缘						腹板			
		σ_{rt1}	σ_{rt2}	σ_{rc1}	a	b	c	σ_{rt3}	σ_{rc2}	d	e
H25	BFC	37.8	327.0	-213.4	41.1	63.1	107.8				
	FC 外侧	121.5	284.4	-164.2	31.4	70.0	108.5	444.2	-128.7	18.5	48.9
	FC 内侧	-17.0	365.4	-242.8	43.4	61.4	105.0				
H35	BFC	117.3	263.6	-174.6	37.5	74.4	101.0				
	FC 外侧	107.2	275.2	-128.6	37.5	75.0	117.3				
	FC 中部	99.4	240.6	-166.0	37.5	73.3	99.1	413.4	-153.0	21.1	54.5
	FC 内侧	174.2	343.2	-218.3	32.6	78.0	97.5				
箱形截面	位置	σ_{rt}			σ_{rc}			f			
B16	BFC		435.9			-143.0					65.74

注：应力的单位为 MPa，长度的单位为 mm。

实测获得的箱形截面残余应力分布简化模式(简记为 BFC 模式)也与 GB 模式接近, 均为在四角焊缝点处残余拉应力达到 f_y , 不同的是 GB 模式存在有较短的水平分布段; 腹板板件中段按本次实测值简化为等值残余压应力水平段更符合实际情况, 其水平段范围大于 GB 模式的压应力区段, 但均值小于 GB 模式腹板中段的峰值。

2.2 构件稳定承载力实测及计算结果与分析

2.2.1 构件试验结果

从图 6 中 H 形截面、箱形截面轴压构件达到极

限承载力时的典型照片可以看出, 各构件均发生的是整体失稳破坏。各构件的承载力试验结果如表 5 所示。在 9 根试验构件中 ZH3-1 试验值明显偏低, 对其进行异常值检验判断后确定为异常数据, 在后续分析中予以剔除。

2.2.2 理论计算结果

按《钢结构设计规范》^[26]轴压构件的稳定计算公式进行计算, 其中 H 形试验构件绕弱轴失稳按 b 类曲线, 箱形试验构件按 c 类曲线。按规范公式计算得到的结果如表 5 所示。

表5 承载力试验与计算结果

/kN

Table 5 Results from experimental tests, simulations and theoretical calculations

构件编号	试验	规范	有限元 1-GB	有限元 2-BFC	有限元 3-FC				
ZH1-1	5300	4797	4608	4851	4830	0.905	0.869	0.915	0.911
ZH1-2	5950	4933	4722	4996	4975	0.829	0.794	0.840	0.836
ZH1-3	5150	4804	4613	4859	4837	0.933	0.896	0.943	0.939
ZH2-1	4150	3712	3951	3719	3754	0.894	0.952	0.896	0.905
ZH2-2	4450	3772	4010	3779	3818	0.848	0.901	0.849	0.858
ZH2-3	4200	3753	3989	3760	3798	0.894	0.950	0.895	0.904
(ZH3-1)	(4100)	(5337)	(5504)	(4932)	(4969)	(1.302)	(1.342)	(1.203)	(1.212)
ZH3-2	5060	5319	5489	4916	4955	1.051	1.085	0.972	0.979

(续表)

构件编号	试验	规范	有限元 1-GB	有限元 2-BFC	有限元 3-FC					
ZH3-3	4800	5250	5417	4857	4889	1.094	1.129	1.012	1.019	
			平均值*				0.972	0.991	0.947	0.951
			方差*				0.143	0.158	0.104	0.106
ZX-1	4300	4001	4764	4850	—	0.930	1.108	1.128	—	
ZX-2	4600	4096	4875	4961	—	0.891	1.060	1.078	—	
ZX-3	4600	4009	4772	4857	—	0.872	1.037	1.056	—	
			平均值				0.898	1.068	1.087	—
			方差				0.025	0.029	0.030	—

注: 1) 表中“试验”表示构件试验结果,“规范”表示根据规范公式计算结果,“有限元 1”、“有限元 2”、“有限元 3”分别表示采用 GB、BFC、FC 模式计算结果;

2) 表中 ZH3-1 的试验值经检验为异常值,在对 H 形截面构件进行相关比值的平均值和方差计算时已剔除 ZH3-1 的数据。

有限元分析基于 ABAQUS 进行数值模拟计算: 初始几何缺陷(包括初弯曲与初偏心)的等效初弯曲形态按构件一阶模态确定,其跨中最大值按构件长度的 1‰采用;有限元模型网格划分与图 4 所示测条分割一致,单元采用 C3D8 三维实体单元。图 10 给出了 H 形截面、箱形截面构件的有限元模型引入残余应力后的应力云图,对 H 形构件分别引入 BFC 模式、FC 模式以及 GB 模式,箱形构件则引入 BFC 模式以及 GB 模式进行对比分析验证。钢材本构关系采用理想弹塑性模型,材料泊松比取 0.3,其余参数见表 2 试验测试结果列表。有限元模拟计算得到的结果如表 5 所示。

2.2.3 构件承载力结果分析

表 5 总结了各构件稳定承载力试验值、规范公式计算值、有限元计算值以及相关比值。对于 H 形截面构件而言,剔除 ZH3-1 后,将 8 个有效构件的规范计算结果与试验结果相比较,ZH1、ZH2 两个组别试验值均大于规范公式计算值,对应的正则化长细比平均值分别为 1.164、1.245;而 ZH3 组别(不含 ZH3-1)试验值均略低于规范公式计算值,对应的正则化长细比平均值为 0.894,可见长细比不同取值时规范公式计算值与试验值之间存在有反向的偏离趋势。对比有限元 2、有限元 3 两种方式计算得到的结果,表明对于试验构件按 BFC、FC 模式施加残余应力得出的有限元结果差别不大。

从有限元计算结果与试验结果的比值来看,二者存在一定的差异,探究原因有二,一是有限元模型取的等效初弯曲是按规范取值 1‰确定,而试验构件存在的实际几何缺陷效应与此有差异;二是试验构件两端的单刀口支座在转动时存在一定的摩擦力,而并非有限元模型中的理想铰接形式,这对试验结果也有一定的影响。但从总体来看,有限元

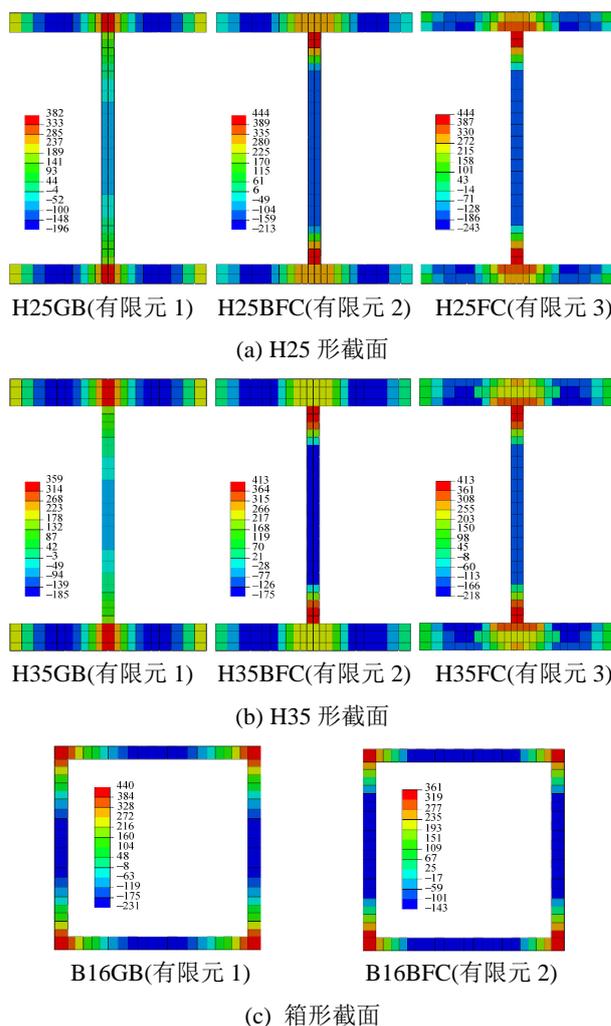


图 10 残余应力导入到有限元模型

Fig.10 Residual stresses imported to FEM models

计算值/试验值的平均值在约 0.95~1.05,故后续轴压构件的参数化分析均采用已有的 ABAQUS 模型。

3 参数化计算结果与分析

对 H25、H35 和 B16 三种截面规格的轴压构件进行有限元参数化分析,截面几何尺寸取设计值,

构件长细比分布区间为 20~200, 对应正则化长细比介于 0.28~2.9, 残余应力分别按 GB、FC、BFC 简化模式引入, 计算结果如图 11 所示。通过比较图中 H 形、箱形截面构件稳定系数—正则化长细比的关系曲线及相关点位可以看出, 残余应力按 FC 模式、BFC 模式引入, 对 H 形构件稳定承载力计算结果差别很小, 表明 H 形截面构件厚度分层带来的残余应力分布差异, 对绕弱轴失稳时的承载力影响不大。当然该结论仅针对本试验采用的(中)厚板 H 形截面构件适用, 其他截面形式有待进一步验证。

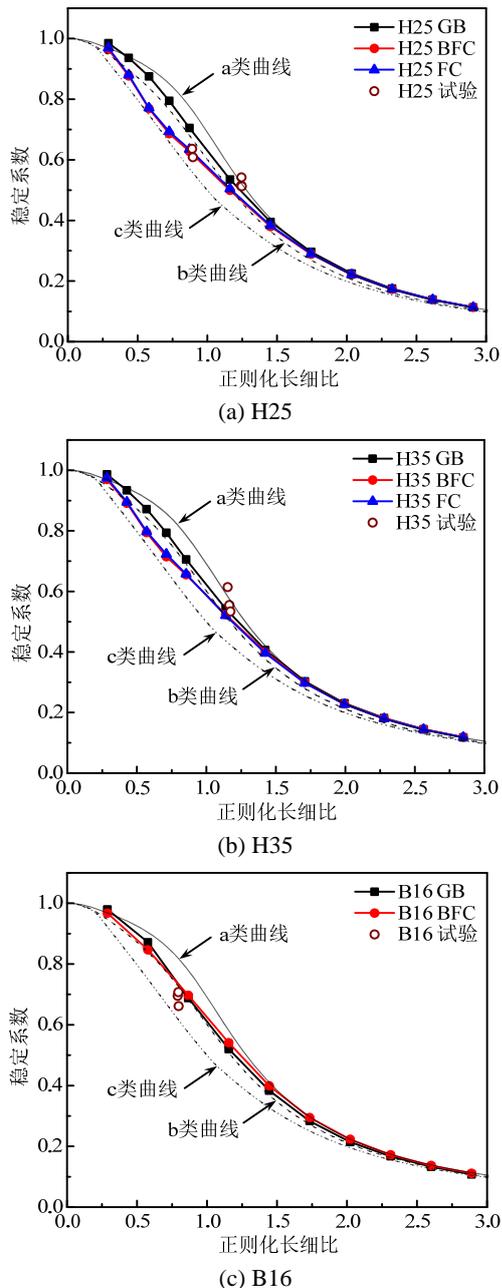


图 11 参数化分析结果

Fig.11 Results of parametric studies

引入 GB 模式的构件通过有限元计算得到的稳定曲线, 其形态与 H 形截面构件的 b 类曲线、箱形截面构件的 b 类曲线较为一致。事实上对于本试验中的箱形构件规范取为 c 类截面, 可见按规范公式计算稳定承载力时有所低估。对比采用实测简化模式(FC 或 BFC)与 GB 模式引入构件截面后计算得到的稳定曲线, 发现 H 形截面构件在正则化长细比为 0.4~1.1 区段, 二者计算结果差异很大。在该区段按实测简化模式计算结果均不同程度的低于 b 类规范公式曲线, 表现在图中有下凹趋势, 而非圆滑的上凸饱满曲线。由此看出由于实测残余应力模式的不同, 在正则化长细比 0.4~1.1 区段对 H 形截面构件绕弱轴稳定承载力影响较大, 基于规范的控制条件高估了该区段的稳定承载力, 从算例来看这是偏于不安全的。同时, 从构件试验承载力在图中的点位也可以看出来, ZH3 组别因其正则化长细比小于 1.1, 其试验值位于规范 b 类和 c 类之间; 而 ZH1、ZH2 组别的正则化长细比大于 1.1, 其试验值均在 b 类曲线之上。

构件稳定承载力在正则化长细比 0.4~1.1 区段的降低现象, 是因为绕弱轴失稳时翼缘自由端初始残余应力很小, 叠加外荷载施加的压应力之后, 构件失稳时最大受压侧较早进入塑性导致, 而正则化长细比在 1.1 以上区段, 构件失稳时最大受压区基本保持在屈服强度之下。这样的现象在文献[27]的图示中也有所体现, 但因为其初始残余应力模式有差异, 故表现没有本文这么显著。

对于箱形截面构件采用实测 BFC 模式、GB 模式计算得到稳定曲线, 从形态来看均与规范曲线较为吻合, 但其值更接近曲线 b 而不是规范推荐的曲线 c。

4 结论

(1) 对 Q345GJ(中)厚板焊接 H 形截面残余应力, 拟合得到的多折线简化模式较规范残余应力模式更符合翼缘、腹板实测结果, 并且板件残余应力关键点取值与规范模式有较大不同, 表现为翼缘自由端处实测残余应力数值很小, 焊缝处翼缘板实测残余应力峰值表现为一区段分布, 焊缝处腹板实测残余应力达屈服强度。

(2) Q345GJ(中)厚板焊接 H 形截面对其翼缘按分层、不分层简化模式获得的残余应力分布, 二者在计算 H 形截面构件绕弱轴失稳时区别不大, 更厚

板件的影响是否有差异还需进一步开展试验研究。

(3) Q345GJ(中)厚板焊接 H 形截面在正则化长细比为 0.4~1.1 区段,按试验残余应力模式计算得到的稳定承载力较规范稳定曲线下降较多。对规范计算公式在该区段稳定承载力计算偏大(偏不安全)的现象,有待进一步开展更多截面参数的试验研究。

(4) 对 Q345GJ 中厚板焊接箱形截面残余应力,拟合得到的双折线简化模式较规范残余应力模式更符合板件实测结果,然而总体效应与规范残余应力模式区别不大,据此计算分析得到的构件稳定承载力与规范稳定曲线形态吻合较好,但计算结果靠近规范 b 类曲线而非 c 类。

参考文献:

- [1] GB/T 19879-2005, 建筑结构用钢板[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
GB/T 19879-2005, Steel plates for building structures [S]. Beijing: Standard Press of China, 2005. (in Chinese)
- [2] GB/T 1591-2008, 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
GB/T 1591-2008, High strength low alloy structural steels [S]. Beijing: Standard Press of China, 2009. (in Chinese)
- [3] 周思红, 朱忠义, 齐五辉, 等. 凤凰国际传媒中心结构设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(9): 56—62.
Zhou Sihong, Zhu Zhongyi, Qi Wuhui, et al. Structural design on the project of Phoenix International Media Center [J]. Building Structure, 2011, 41(9): 56—62. (in Chinese)
- [4] 范重, 刘先明, 范学伟, 等. 国家体育场大跨度钢结构设计与研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 1—16.
Fan Zhong, Liu Xianming, Fan Xuewei, et al. Design and research of large-span steel structure for the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 1—16. (in Chinese)
- [5] Mcfalls R K, Tall L. A study of welded columns manufactured from flame-cut plates [J]. Welding Research Supplement, 1969, 48(4): 141—153.
- [6] Alpsten G, Tall L. Residual stresses in heavy welded shapes [J]. Welding Research Supplement, 1970, 49(3): 93—105.
- [7] Usami T, Fukumoto Y. Welded box compression members [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(10): 2457—2470.
- [8] Wang Y B, Li G Q, Chen S W, et al. Experimental and numerical study on the behavior of axially compressed high strength steel box-columns [J]. Engineering Structures, 2014, 58(58): 79—91.
- [9] Wang Y B, Li G Q, Chen S W, et al. Experimental and numerical study on the behavior of axially compressed high strength steel columns with H-section [J]. Engineering Structures, 2012, 43(43): 149—159.
- [10] Ban H Y, Shi G, Shi Y J, et al. Overall buckling behavior of 460 MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2012, 74(74): 140—150.
- [11] Ban H Y, Shi G, Shi Y J, et al. Residual stress of 460 MPa high strength steel welded box section: Experimental investigation and modeling [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 64(64): 73—82.
- [12] 班慧勇, 施刚, 石永久, 王元清. 国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面残余应力试验及分布模型研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 60—69.
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Experimental investigation and modeling of residual stress in I sections welded by Q460 high strength steel [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 60—69. (in Chinese)
- [13] 褚燕风, 戴国欣, 聂诗东, 等. Q345GJ 结构钢材性试验与参数估计[C]. 第七届全国现代结构工程学术研讨会, 浙江, 杭州, 2007: 273—277.
Chu Yanfeng, Dai Guoxin, Nie Shidong, et al. The materials testing and parameters evaluation for structural [C]. The Seventh National Symposium on Modern Structural Engineering, Hangzhou, Zhejiang, 2007: 273—277. (in Chinese)
- [14] 施刚, 朱希. 国产建筑结构用钢板设计指标和可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 110—124.
Shi Gang, Zhu Xi. Design indexes and reliability analysis of domestic steel plates for building structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 110—124. (in Chinese)
- [15] 朱希, 施刚. 国产建筑结构用钢板材性参数统计与分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(21): 16—20.
Zhu Xi, Shi Gang. Statics and analysis of material properties of domestic steel plates for building structures in China [J]. Building Structures, 2015, 45(21): 16—20. (in Chinese)
- [16] 李元齐, 孙思, 沈祖炎, 等. 高建钢厚壁 H 型钢残余应力测试研究[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(5): 19—24.
Li Yuanqi, Sun Si, Shen Zuyan, et al. Investigation on residual stress Distribution for H-section column of high-rise structural steel with heavy thickness [J]. Progress in Steel Building Structures, 2010, 12(5): 19—24. (in Chinese)
- [17] 魏奇科, 白巨波, 熊刚, 等. Q345GJ 钢焊接 H 形截面残余应力测试[C]. 第 24 届全国结构工程学术会议, 福建, 厦门, 2015: 45—49.
Wei Qike, Bai Jubo, Xiong Gang, et al. Residual stress test of welded H section of Q345GJ steel [C]. The Twenty-Fourth National Conference on Structural Engineering, Xiamen, Fujian, 2015: 45—49. (in Chinese)

- [18] Yang B, Nie S D, Xiong G, et al. Residual stresses in welded I-shaped sections fabricated from Q460GJ structural steel plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 122(122): 261–273.
- [19] 邱林波, 薛素铎, 侯兆新, 等. Q550GJ 高强钢焊接 H 型截面残余应力试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(7): 1035–1042.
Qiu Linbo, Xue Suduo, Hou Zhaoxin, et al. Experimental Study of residual stresses in Q550GJ high-strength steel welded H-type sections [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(7): 1035–1042. (in Chinese)
- [20] 邱林波, 侯兆新, 刘毅, 等. Q550GJ 高强钢焊接箱形截面残余应力试验研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(5): 111–114, 165.
Qiu Linbo, Hou Zhaoxin, Liu Yi, et al. Experimental Study of residual stresses in Q550GJ high-strength steel welded box sections [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(5): 111–114, 165. (in Chinese)
- [21] 班慧勇, 施刚, 石永久. 960 MPa 高强钢焊接箱形截面残余应力试验及统一分布模型研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(11): 63–69.
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu. Experimental study on residual stress in 960 MPa high strength steel welded box sections and unified model [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(11): 63–69. (in Chinese)
- [22] 罗仕伟. Q345GJ 钢受弯构件整体稳定性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Luo Shiwei. Study on stability of Q345GJ steel flexural members [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [23] 王赛博, 熊刚, 徐国友, 等. Q460GJ 钢焊接 H 形梁整体稳定性能试验研究[C]. 第 24 届全国结构工程学术会议, 福建, 厦门, 2015: 40–44.
Wang Saibo, Xiong Gang, Xu Guoyou, et al. Experimental study on overall stability of welded H beam of Q460GJ steel [C]. The Twenty-Fourth National Conference on Structural Engineering, Xiamen, Fujian, 2015: 40–44. (in Chinese)
- [24] 陆建锋, 徐明, 王飞, 等. Q690GJ 高强度钢材单调和循环加载试验研究[J]. *钢结构*, 2016, 31(2): 1–5.
Lu Jianfeng, Xu Ming, Wang Fei, et al. Experimental study on high strength steel Q690GJ under monotonic and cyclic loading [J]. *Industrial Construction*, 2016, 31(2): 1–5. (in Chinese)
- [25] 李开禧, 肖允徽, 饶晓峰, 等. 钢压杆的柱子曲线[J]. *重庆建筑工程学院学报*, 1985(1): 24–33.
Li Kaixi, Xiao Yunhui, Rao Xiaofeng, et al. Column curves for steel compression member [J]. *Journal of Chongqing Architecture University*, 1985(1): 24–33. (in Chinese)
- [26] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
GB 50017-2003, Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [27] 班慧勇, 施刚, 石永久, 等. 国产 Q460 高强钢焊接工形柱整体稳定性能研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(2): 1–9.
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, et al. Experimental and numerical investigation on the overall buckling behavior of Q460 high strength steel welded I-section columns [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(2): 1–9. (in Chinese)