

薄柔 H 形截面钢构件短柱轴压试验研究

史晓鹏, 程 欣

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 随着轻钢结构的推广与应用, 具有良好经济效益和环保性能的薄柔 H 形截面钢构件在轻量化低多层钢框架体系中的应用受到广泛关注。为研究薄柔 H 形截面钢构件的轴向力学性能, 以宽厚比作为主要控制参数调整板件的相对强弱关系, 采用 Q355B 钢材设计制作了 6 根焊接 H 形截面短柱, 并对其进行了轴压试验。分析了试件的破坏过程、屈曲特征、延性以及极限承载力等。试验结果表明: 不同宽厚比组配下 H 形截面钢构件局部屈曲特征差异明显, 而局部屈曲特征直接影响了板件的应力发展; 同时构件的延性与宽厚比组配直接相关, 呈现两种典型特征; 规范 ANSI/AISC360-16 对于薄柔 H 形截面轴压构件的计算结果偏于保守, 合理的宽厚比组配下薄柔 H 形截面钢构件具有较强的屈曲后承载力。

关键词: H 形截面钢构件; 轴压; 局部屈曲; 板件相关作用; 极限承载力

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0675-09

Experimental study on slender H-section steel stub columns under axial compression

SHI Xiaopeng, CHENG Xin

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: With the popularization and application of light steel structures, the application of slender H-section steel components with good economic benefits and environmental performance in lightweight low-layer steel frame systems has attracted widespread attention. In order to study the axial mechanical properties of slender H-section steel members, the width-thickness ratio was used as the main control parameter to adjust the relative strength of the plates. Six welded H-section stub columns were designed and fabricated with Q355B steel, and axial compression tests were carried out. Based on the test results, the failure process, buckling characteristics, ductility and ultimate bearing capacity of specimens were analyzed. The test results show that the local buckling characteristics of H-section steel members with different width-thickness ratios are significantly different, and the local buckling characteristics directly affect the stress development of the plate. The ductility of the component is directly related to the combination of the width-thickness ratio, showing two characteristics. The calculation results of ANSI/AISC360-16 for slender H-section axial compression members are conservative, and with reasonable width-thickness ratio the slender H-section steel members can have strong post-buckling load-bearing capacity.

Key words: H-section steel members; axial pressure; local buckling; plate interaction; ultimate bearing capacity

2021 年 6 月, 住房和城乡建设部公布《关于加强县城绿色低碳建设的意见》的通知, 规定县城新建住宅以 6 层为主, 6 层及以下住宅占比应不低于 75%, 县城新建住宅最高不超过 18 层。在低多层住宅建筑中采用轻型钢结构体系, 可大幅缩短施工周期, 提高劳动生产率, 有利于降碳减排, 实现“碳中和”目标, 这使得轻钢结构在住宅建设中的推广应用将迎来极大的发展机遇^[1-2]。

H 形截面钢构件生产加工方便, 易于与各种形式的结构构件连接, 是轻型钢结构特别是装配式钢结构中最常见的构件类型。对于大宽厚比 H 形截面钢构件, 由于其截面肢宽腹薄, 在相同的单位长度质量下较一般 H 形截面钢构件拥有更大的回转半径、抗弯刚度、抗扭刚度和屈服弯矩等, 具有良好的经济效益和环保性能。但大宽厚比 H 形截面钢构件对局部稳定较为敏感, 难以充分发

收稿日期: 2021-07-13

修改稿日期: 2022-08-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978437); 山西省基础研究计划优秀青年培育项目(202103021222007)

第一作者: 史晓鹏(1998—), 男, 硕士生, 主要从事钢结构的研究。E-mail: shixiaopengax@163.com.

通信作者: 程 欣(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢结构的研究。E-mail: xchengtyut@126.com.

展塑性变形能力。在传统延性抗震设计方法中, H 形截面钢构件板件宽厚比限值严格, 板件往往较厚, 导致 H 形钢框架柱在设计时一般由整体稳定或长细比控制, 经济效益较差, 钢材利用率低。本文将不满足塑性铰截面要求的大宽厚比 H 形截面统称为薄柔 H 形截面。薄柔 H 形截面承载能力问题本质上是板件(翼缘和腹板)的弹塑性稳定问题, 其中翼缘和腹板屈曲相关作用对截面塑性和板件屈曲发生时序的影响不容忽视, 是从根本上解决 H 形截面承载能力的关键问题。

目前, 国内外针对薄柔 H 形截面钢构件的研究主要集中在压弯力学性能。Hasham^[3-4]通过研究薄柔 H 形截面压弯构件在不同轴压比作用下的抗弯承载力指出, 翼缘和腹板之间存在着显著的相关性, 这种相关性与轴压比大小相关。Salem^[5]对薄柔 H 形钢构件进行了双向压弯试验, 分析了宽厚比对于构件极限强度和局部屈曲的影响。陈以一等^[6-7]、赵静^[8]、周江^[9]和程欣^[10]等分别对薄柔 H 形截面钢柱进行了常轴压力下的单调和滞回压弯加载试验, 试验结果表明: 薄柔 H 形截面钢构件局部屈曲发生较早, 但仍有一定的延性和耗能能力, 而翼缘和腹板宽厚比的组合以及轴压比是决定薄柔 H 形截面钢构件单调和滞回性能的关键因素。陈以一和何雅雯^[11]采用广义塑性铰线法对 H 形截面压弯钢构件极限状态进行了分析, 结果表明: 该方法可准确预判构件绕强轴压弯的极限承载力。Cheng 等^[12]在试验和有限元研究基础上, 对有效塑性宽度法(PEM)进行了改进, 该方法能够较好预测压弯构件的极限强度。

针对 H 形截面钢构件的轴压性能, 国内外研究主要集中在高强钢以及中厚板件所组成构件的局部稳定、极限承载力以及板件宽厚比限值等方面。金阳和童根树^[13]利用有限元分析方法得到了精度良好的考虑翼缘约束作用的非均匀受压腹板的屈曲系数计算公式。Abebe 和 Choil^[14]利用经试验验证的有限元分析模型对 H 形截面钢柱的非弹性屈曲行为进行了研究。王彦博等^[15]和施刚等^[16]分别对中厚实及薄柔高强焊接 H 形钢柱进行了轴压试验, 对其极限承载力和局部稳定性能进行了分析。Lee 等^[17]对 10 根中厚实高强焊接 H 形截面钢构件进行了轴压试验, 评估了美国现行规范对高强钢材的适用性。Sun 等^[18-19]分别对新型不锈钢和高强钢组成的焊接 H 形钢构件进行了轴压试验, 并利用有限元模型开展了大量参数分析, 评估了欧洲和美国现行规范关于截面分类和局部稳定设

计规定中宽厚比限值的适用性。Gérard^[20]利用有限元模型对轴压作用下的 H 形截面钢构件进行了参数分析, 给出了简化的截面抗力设计方法。邓长根和周江^[21]、崔凡承等^[22]通过建立轴心力作用下的 H 形截面钢构件有限元分析模型, 提出了能够考虑翼缘任意程度约束的腹板弹性屈曲系数计算公式以及等强和等稳原则下的腹板高厚比限值。戎子涵等^[23]采用 ANSYS 软件对 H 形截面轴心压杆进行了弹塑性非线性分析, 确定了板件宽厚比的限值并拟合出了板件宽厚比限值的计算公式。

从以上研究可以发现, 针对薄柔 H 形截面钢构件承载性能的研究多集中在轴压比较小的压弯情况, 对于宽厚比较大的薄柔截面轴压性能研究较少。为了进一步完善薄柔 H 形截面钢构件在不同受力情况下的计算理论, 提出薄柔 H 形截面钢构件在高轴压比下的设计方法, 有必要对薄柔 H 形截面钢构件的轴压性能进行研究。本文以薄柔 H 形截面短柱为研究对象, 以宽厚比为主要控制参数, 对 6 根不同宽厚比组配的试件开展了轴压试验研究, 探讨了板件相关作用对薄柔 H 形截面轴压性能的影响机理。

1 试验设计

1.1 试件设计

宽厚比组配反映了板件的相对强弱关系, 为考虑板件相关作用对于薄柔构件轴压性能的影响, 试件设计以宽厚比为主要控制参数, 采用 Q355B 钢材制作了 6 根焊接 H 形截面短柱。宽厚比设置按照单一变量原则进行变化以形成对照试验, 试件的宽厚比分布如图 1 所示, 所设板件宽厚比均超出了现行钢结构设计标准 GB50017^[24]针对轴压构件局部稳定的板件宽厚比限值, 属于薄柔截面。考虑屈服强度影响的翼缘宽厚比 r_f 和腹板宽厚比 r_w 定义如下:

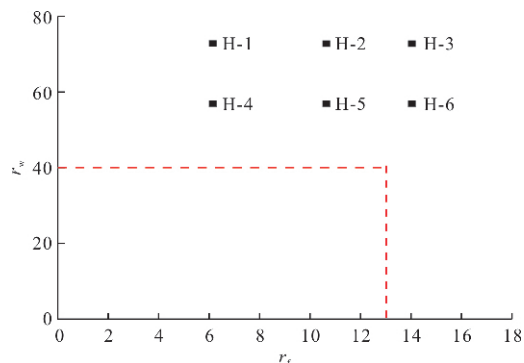


图 1 试件宽厚比分布

Fig. 1 Width-thickness ratio distribution of specimens

$$r_f = \frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{f_{yf}}{235}} \tag{1}$$

$$r_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{235}} \tag{2}$$

式中： f_{yf} 和 f_{yw} 分别表示翼缘和腹板的屈服应力； b_f 和 t_f 分别表示翼缘外伸宽度和厚度； h_w 和 t_w 分别表示腹板的高度和厚度； N 为轴压力，如图 2 所示. 由于研究对象是不需考虑整体失稳的短柱，故取试件长度为截面最大宽度的 3 倍^[25]，具体截面尺寸如表 2 所示.

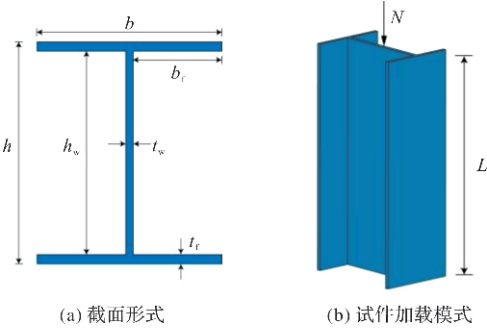


图 2 试件截面定义

Fig. 2 Section definition of the specimen

表 1 试件主要参数及试验结果

Tab. 1 Main parameters and test results of specimens

试件编号	h/mm	h_w/mm	b/mm	t_w/mm	t_f/mm	r_w	r_f	L/mm	N_u/kN	N_u/N_y
						(r_w 名义)	(r_f 名义)			
H-1	348	320	170	6	14	72.7(65)	6.4(7)	1 044	1 872.02	0.950
H-2	344	320	200	6	12	72.7(65)	11.0(10)	1 032	2 540.79	0.942
H-3	336	320	200	6	8	72.7(65)	14.5(15)	1 008	1 565.40	0.860
H-4	278	250	170	6	14	56.8(50)	6.4(7)	834	1 841.47	1.017
H-5	274	250	200	6	12	56.8(50)	11.0(10)	822	2 662.72	1.049
H-6	266	250	200	6	8	56.8(50)	14.5(15)	798	1 594.73	0.960

表 2 钢材力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel

名义厚度 /mm	实际厚度 /mm	弹性模量 E /GPa	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	屈服应变 ϵ_y	极限应变 ϵ_u	屈强比 f_y/f_u
$t=6$	$t=5.72$	206.42	388.6	530.4	0.001 96	0.191	0.73
$t=8$	$t=8.22$	208.14	356.8	494.1	0.001 71	0.200	0.72
$t=12$	$t=12.03$	212.97	410.6	533.6	0.001 93	0.180	0.77
$t=14$	$t=14.04$	207.67	258.8	428.0	0.001 25	0.250	0.60

注：试件制作时由于 14 mm 厚 Q355 钢材短缺将其替换为 Q235 钢材；6 mm、8 mm 和 12 mm 板材为 Q355 钢材

1.2 材料性能

6 根焊接 H 形截面短柱包括四种厚度的钢材，同一种厚度的钢板均选自同一批钢材. 截取每种厚度的钢材各 3 个分 4 组进行拉伸试验，其中拉伸试件的尺寸大小和截取位置根据 GB/T2975-2018《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》^[26]中的相关规定所确定；试验方法根据 GB/T228.1-2010《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》^[27]中的相关规定所确定. 所得钢材力学性能平均值如表 2 所示.

1.3 加载方案

试验加载装置采用微机控制电液伺服压力试验机，如图 3 所示. 试验机上端为球铰支座，下端为液压千斤顶，并通过刚性承台对试件施加集中荷载，避免了试件加载端的应力集中效应. 同时试件加工时上下两端配置了端板，增大了与试验

装置的接触面积，保证了加载过程试件与试验装置的紧密贴合.

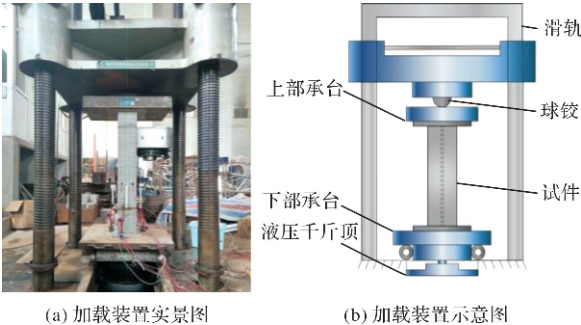


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup

试验加载分为预加载和正式加载两个阶段. 在正式加载前先以 100 kN 的力进行若干次预加载，具体预加载次数以试件接触良好无偏心、仪表正常工作及荷载-应变关系稳定为准. 正式加载

采取先荷载控制后位移控制的方式,当试件刚度发生明显变化时切换位移加载。当承载力降至最大荷载值的85%或加载设备无法继续安全加载时停止试验。

1.4 测点布置

在试件长度中间截面,沿试件长度方向布置7组14个单向应变片(S1-S14)以监测各板件塑性及屈曲变形情况,具体布置位置如图4所示。在腹板两侧各布置3个测点,每个翼缘两侧各布置1个测点,通过成对正反布置测点以观测试验过程中板件的屈曲行为。同时沿截面对称轴均匀布置4个纵向位移计分别定义为D1-D4,取位移平均值作为试件的纵向位移以消除试验过程的偏心影响。

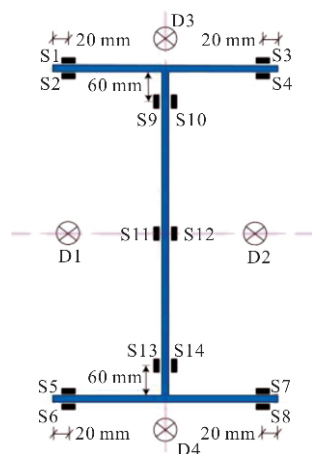


图4 应变测点布置

Fig. 4 Arrangement of strain gages

2 试验结果

2.1 破坏模式

试件的最终破坏形式如图5所示,所有试件的翼缘和腹板均发生了不同程度的局部屈曲,且屈曲波出现的位置存在明显差异,屈曲铰形成后,试件变为机构,试件发生最终破坏。

为了更好的探究薄柔H形截面钢构件轴压破坏机理,以试件H-4的加载过程为例进行说明。在加载前期,试件处于弹性阶段,位移随荷载线性增加,正反两侧应变测点的应变同步增长,试件没有明显变形。当荷载达到1010 kN左右时,试件刚度发生明显下降,此时翼缘应变测点S7-S8分叉明显,说明翼缘发生了屈曲,而腹板正反两侧应变测点的应变仍同步增长,说明腹板尚未屈曲。当荷载达到1370 kN左右时,腹板测点S9-S10分叉明显并很快达到屈服,腹板发生屈曲。随着荷载的逐渐增大,试件荷载-位移曲线非线性显著,试件刚度逐渐降低,荷载峰值为1841 kN。

随着加载位移逐渐增大,试件变形逐渐增大,最终形成如图5(d)所示较为完整的屈曲半波。总体而言试件在极限承载力前变形并不明显,在极限后仍能保持较为稳定的刚度,表现出较好的延性。

其他试件的试验现象与H-4基本一致,均经历了翼缘和腹板的弹性屈曲,且随着局部屈曲和塑性发展程度的逐渐深入,试件刚度逐渐下降,达到承载力峰值后逐渐在薄弱位置形成屈曲铰,试件变为机构最终破坏。不同之处在于不同宽厚比组配下试件翼缘和腹板的屈曲顺序、屈曲间隔以及极限后试件刚度的变化特征。

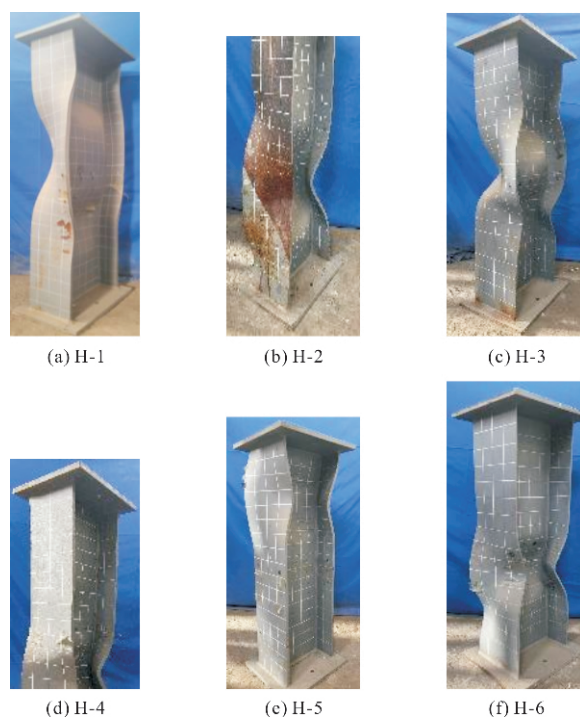


图5 试件最终破坏图

Fig. 5 Failure pictures of the specimens

2.2 荷载-位移曲线

由于试件规格不同,将荷载进行无量纲化处理(N/N_y),并绘制荷载-位移曲线,如图6所示,其中 w 表示试件的轴向位移, N_y 为全截面屈服荷载,见式(3)。

$$N_y = A_f f_{yf} + A_w f_{yw} \quad (3)$$

式中: A_f 和 A_w 分别代表翼缘和腹板的面积。

由试件的荷载-位移曲线可发现,在加载初期由于试件各部分均处于弹性段,荷载随位移呈线性增加。随着荷载的增大,试件部分截面发生局部屈曲并很快屈服,试件刚度发生改变,荷载不再随位移线性增加,曲线增长放缓。塑性及屈曲变形发展到一定程度时,达到极限荷载。

随着屈曲损伤的不断累积,承载力开始下降,且呈现出不同的延性特征,主要表现为腹板宽厚

比一定时,翼缘宽厚比相对较大的试件(H-2、H-3和H-6),曲线下降段呈现两阶段特征,即陡降段和平稳段。翼缘宽厚比相对较小的试件(H-1和H-4),曲线达到峰值后,下降段较为稳定。同时两种特征下构件达到稳定段后均展现出较好的延性。分析其主要原因是腹板宽厚比一定时,不同翼缘宽厚比组合的构件达到极限时刻后,板件协同工

作的能力存在差异。翼缘宽厚比较大的板件在轴压力下较早进入屈曲,在构件达到极限时刻时屈曲程度发展较为深入,无法为相邻板件提供足够约束,需要一定过程达到稳定,这个过程伴随承载力的急剧下降,待稳定后构件仍具有较好的延性。

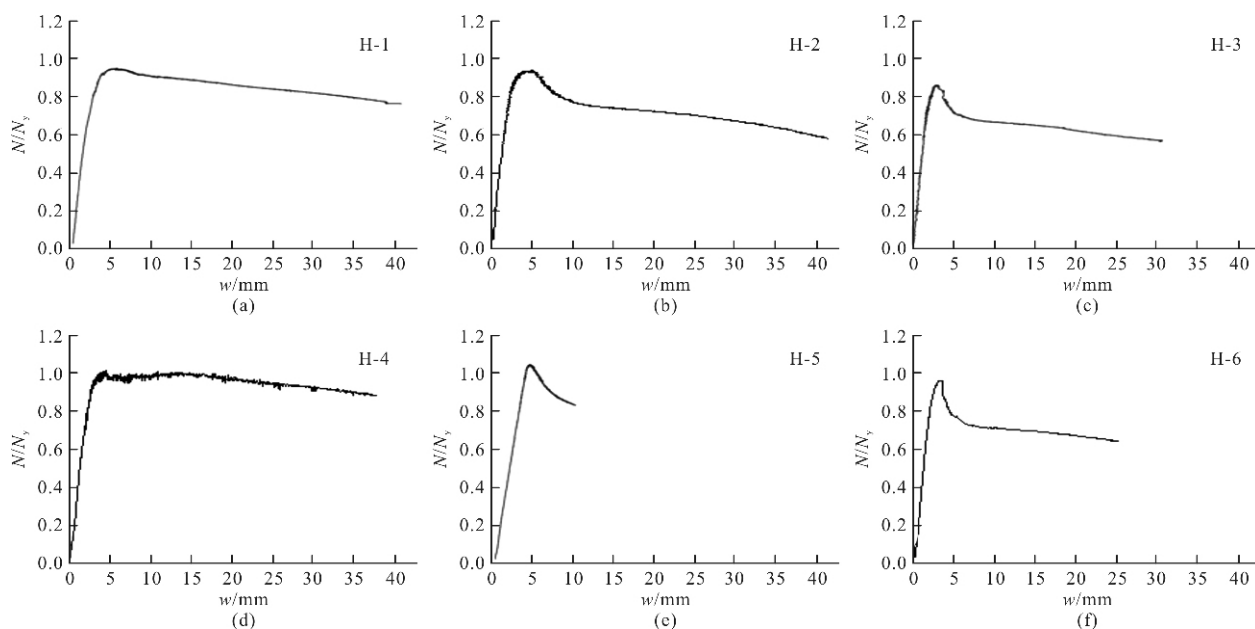


图6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve

2.3 极限承载力

将试件的极限荷载 N_u 及 N_u/N_y 列于表1中,并绘制于图7中。通过对比可得宽厚比对于试件承载力的基本影响规律为:翼缘宽厚比一定的条件下,试件的极限承载力随着腹板宽厚比的增加而降低;腹板宽厚比一定的条件下,试件的极限承载力随着翼缘宽厚比的增加而降低。但也有个别试件(H-5)不满足这一规律,在腹板宽厚比相同的条件下,翼缘宽厚比较大的试件H-5的极限承载力略高于翼缘宽厚比较小的试件H-4。分析其主要原因为试件H-4与H-5翼缘厚度不同,当试件可以达到全截面塑性承载力时,其极限承载力的大小与组成试件材料的强化特征有关。

根据试验结果,所有试件均发生了弹性屈曲,试件H-4和H-5在极限时刻 $N_u/N_y > 1$,即试件H-4和H-5能够在极限时刻达到全截面塑性承载力,而其余试件极限时刻 $N_u/N_y < 1$ 。这表明宽厚比组合是影响薄柔H形截面钢构件屈曲后强度的重要因素,合理宽厚比组合下薄柔H形截面钢构件具有较高的屈曲后承载力。

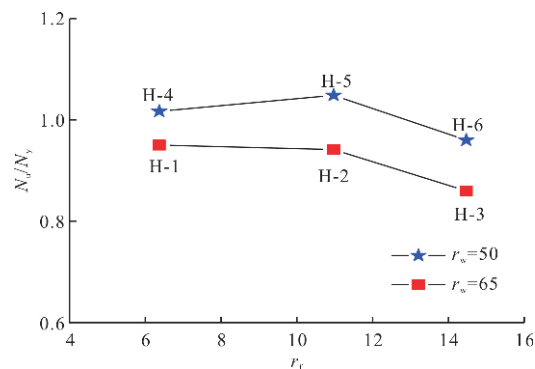


图7 极限承载力关系曲线

Fig. 7 Ultimate bearing capacity relationship curve

3 板件相关屈曲

H形截面钢构件是由三块板组成的板组体系,板件之间存在着相互约束作用。而目前现行大部分规范中以简支或固定的嵌固系数考虑这种约束作用,以H形截面钢构件为例,EN1993-1-1^[28]在进行截面分类时将腹板作为四边简支的单板、翼缘作为三边简支一边自由的单板处理。实际上对于薄柔H形截面钢构件,不同宽厚比组合下,在承受荷载时板组间的约束作用会随着荷载的变化

以及板组屈曲发生改变^[22], 是一个动态约束作用。以简支或固定的嵌固系数统一考虑不同宽厚比组配下的板组约束作用显然是不合理的, 本文选取了部分具有典型屈曲特征的试件来说明这种相关作用对于板件屈曲的影响。

为说明试件相关屈曲特征, 将试件部分测点的应变发展过程结合特征时刻破坏现象绘制如图8所示。从图中可以看出试件在加载初期截面各部

分均发展压应变, 试件处于弹性变形阶段, 变形不明显; 随着荷载逐渐增加, 屈曲波凹侧压应变随荷载增长较快, 屈曲波凸侧压应变随荷载增加增长速度放缓甚至开始发展拉应变, 板件屈曲程度逐渐深入。板件发生局部屈曲时, 屈曲波内外两侧的应变发展呈现相反的趋势, 应变-位移曲线上可以观察到明显的分叉点。

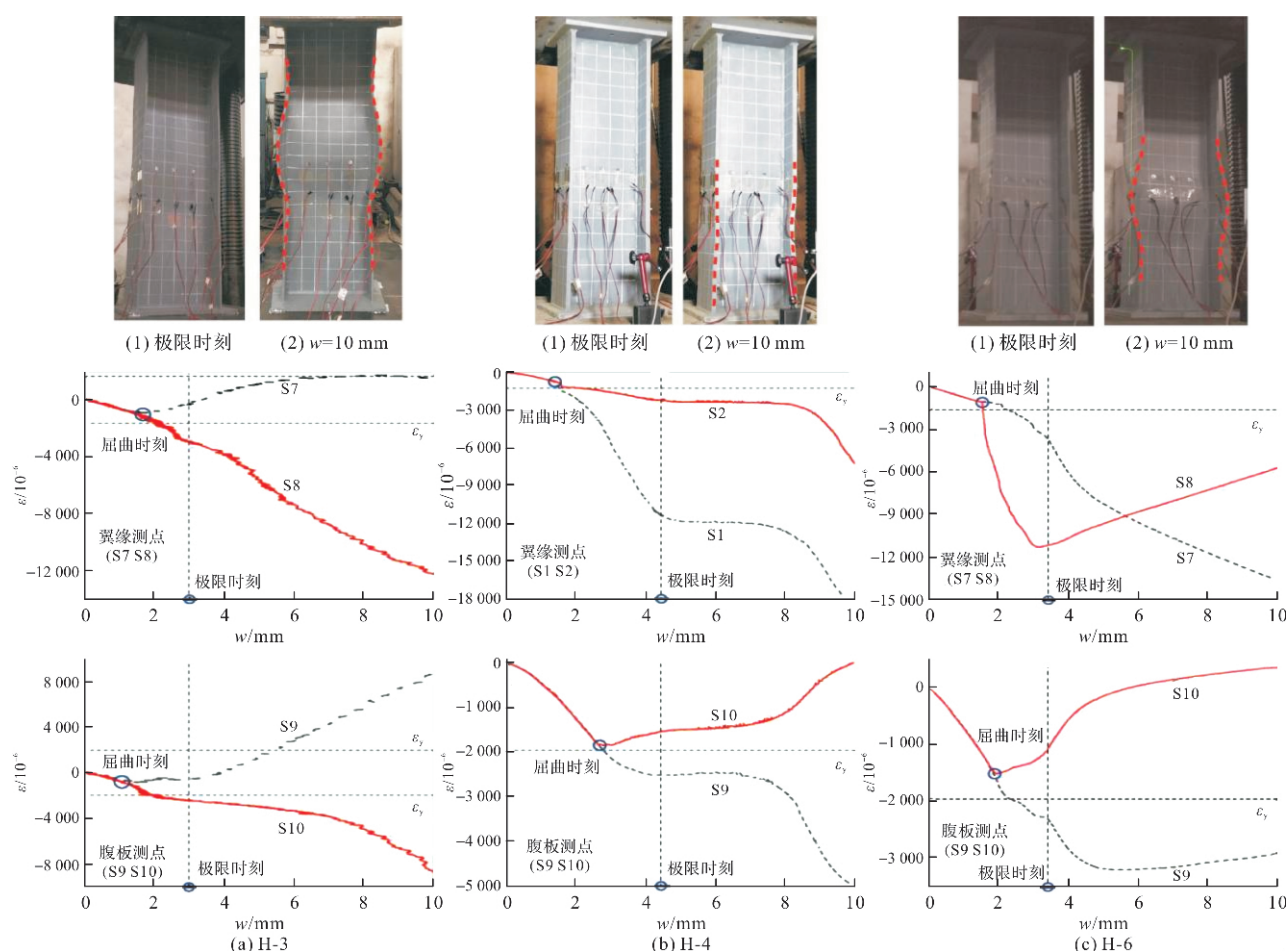


图8 典型屈曲发展过程曲线

Fig. 8 Typical buckling development process curve

以试件 H-6 为例, 试件在 $w=1.5$ mm 左右时翼缘测点(S7-S8)观测到分叉, 在 $w=1.8$ mm 左右时腹板测点(S9-S10)观测到分叉, 同时在 $w=3.5$ mm 左右时试件承载力到达极限。对比这些特征点可以得出, 试件的翼缘和腹板发生的均为弹性屈曲; 试件 H-3 的腹板先于翼缘屈曲, 试件 H-4 和 H-6 的翼缘先于腹板屈曲; 不同宽厚比组配下, 翼缘和腹板屈曲发生的时间间隔存在差异, 但是总体而言翼缘和腹板屈曲时刻较为接近。

根据应变-位移曲线可以得出宽厚比对于板件的屈曲特征有着显著影响, 具体表现为翼缘和腹板的屈曲时序及屈曲间隔的差异, 即不同宽厚比

组配下翼缘和腹板的屈曲顺序不同, 相对较弱的板件会趋向于先屈曲; 板件之间的屈曲间隔则反映了板件间的相对强弱程度, 而板件的宽厚比组配则是这种强弱关系的控制参数, 因此可以通过调整宽厚比组配改善构件的受力特性。

4 AISC-16 承载力计算方法评估

针对薄柔 H 形截面轴压构件 ANSI/AISC360-16^[29] (以下简称 AISC-16) 给出了完整的承载力计算方法, 其受压构件的承载力计算公式采用式(4)计算:

$$P_n = F_{cr} A_e \quad (4)$$

式中: P_n 为名义抗压强度, 应取弯曲屈曲、扭转屈曲和弯扭屈曲对应的极限承载力的最小值, 对于 H 形截面钢构件一般取弯曲屈曲承载力; A_e 为构件截面总的有效面积; F_{cr} 为弯曲屈曲应力, 其计算方法如式(5)、(6)所示。

$$F_{cr} = (0.658^{\frac{F_y}{F_e}}) F_y, \quad \frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5)$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e, \quad \frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6)$$

式中: $L_c = KL$, $F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$, 其中: K 为计算长度系数; L 为构件长度; KL/r 为构件长细比; F_e 为弹性屈曲临界应力。有效面积 A_e 的计算则是依据板件的宽厚比等级, AISC-16 将截面形式分为三类: 紧凑截面、非紧凑截面和薄柔截面。对于紧凑截面和非紧凑截面不考虑板件局部屈曲的影响即认为构件全截面有效, 对于薄柔截面则进行有效宽度的计算, 计算方法如式(7)、(8)所示。

$$b_e = b \quad \lambda \leq \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (7)$$

$$b_e = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \quad \lambda > \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (8)$$

式中: $F_{el} = \left(c_2 \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 F_y$ 为弹性局部屈曲应力; λ 为板件宽厚比; λ_r 为截面分类的宽厚比限值; c_1 和 c_2 为有效宽度缺陷调整系数, 对于翼缘取 $c_1 = 0.22$, $c_2 = 1.49$; 对于腹板取 $c_1 = 0.18$, $c_2 = 1.31$ 。

依照 AISC-16 针对薄柔 H 形截面受压构件的计算方法对试验试件进行理论计算, 所得计算结果列于表 3, 试验与理论计算对比结果如图 9 所示。可以看出, AISC-16 对于薄柔 H 形截面极限承载力的计算结果是偏于保守的, 构件极限承载力仍有较大利用空间。

表 3 规范 AISC-16 极限承载力计算值

Tab. 3 AISC-16 calculation value of ultimate bearing capacity

试件编号	极限承载力		
	试验/kN($N_{u,T}$)	AISC-16/kN($N_{u,A}$)	$N_{u,A}/N_{u,T}$
H-1	1 872.07	1 295.57	69.21%
H-2	2 540.79	1 779.43	70.03%
H-3	1 565.4	1 200.52	76.69%
H-4	1 841.47	1 278.43	69.42%
H-5	2 662.72	1 760.59	66.12%
H-6	1 594.73	1 182.34	74.12%

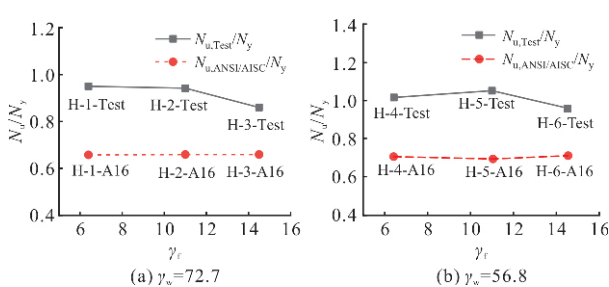


图 9 极限承载力对比

Fig. 9 Comparison of ultimate bearing capacity

5 结论

本文对 6 根薄柔 H 形截面短柱进行了轴压试验研究, 得到了各试件的荷载-位移曲线、应变-位移曲线及极限承载力等, 并基于试验结果分析了板件相关作用对薄柔 H 形截面钢构件轴压性能的影响, 主要结论如下:

(1) 宽厚比组配会影响 H 形截面钢构件板件的相关屈曲特征, 包括翼缘、腹板的屈曲时序以及屈曲间隔, 可以通过调整宽厚比组配改善构件的受力特性;

(2) 不同宽厚比组配下板件协同工作的能力存在明显差异, 该差异对构件极限后刚度发展有显著影响;

(3) 宽厚比组配是影响薄柔 H 形截面钢构件屈曲后强度的重要因素, 合理宽厚比组配下薄柔 H 形截面钢构件具有较高的屈曲后承载力。AISC-16 对于薄柔 H 形截面轴压构件极限承载力计算方法偏于保守;

(4) 以宽厚比作为控制参数分析不同组配下板件相关作用对于构件受力性能影响的方法是合理可行的, 有待进一步扩大试验区间, 从而得到任意组配下考虑板件相关作用的 H 形截面钢构件相关承载力计算公式。

参考文献 References

[1] 陈以一, 王伟, 童乐为, 等. 装配式钢结构住宅建筑的技术研发和市场培育[J]. 住宅产业, 2012(12): 32-35.
CHEN Yiyi, WANG Wei, TONG Lewei, et al. Technology research and development and market cultivation of prefabricated steel structure residential buildings[J]. Housing Industry, 2012(12): 32-35.
[2] 周绪红, 王宇航. 我国钢结构住宅产业化发展的现状、问题与对策[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 1-7.
ZHOU Xuhong, WANG Yuhang. Status, problems and countermeasures of industrialization development

- of steel structural residence in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2019,52(1):1-7.
- [3] HASHAM A S, RASMUSSEN K. Section capacity of thin-walled I-section beam-columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1998,124(4):351-359.
- [4] HASHAM A S, RASMUSSEN K. Interaction curves for locally buckled I-section beam-columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 58 (2): 213-241.
- [5] SALEM A H, El Aghoury M, El Dib F F, et al. Post local buckling strength of bi-axially loaded slender I-section columns[J]. Thin-walled Structures, 2005,43(7):1003-1019.
- [6] 陈以一, 周锋, 陈城. 宽肢薄腹 H 形截面钢柱的滞回性能[J]. 世界地震工程, 2002(4):23-29.
CHEN Yiyi, ZHOU Feng, CHEN Cheng. Research on the hysteretic behaviour of H-shaped steel columns with big width-to-thickness ratio plates. [J]. World Earthquake Engineering, 2002(4):23-29.
- [7] 陈以一, 马越, 赵静, 等. 薄柔高频焊接 H 钢柱的实验和抗震承载力评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006,34(11):1421-1426.
CHEN Yiyi, MA Yue, ZHAO Jing, et al. Tests on high-frequency welded H steel columns with slender elements and its evaluation of seismic resistance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(11): 1421-1426.
- [8] 赵静. 薄柔截面 H 形钢构件抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
ZHAO Jing. Research on seismic performance of thin flexible section H-shaped steel members[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [9] 周江. 焊接 H 型截面钢构件弹塑性相关屈曲试验与有限元分析 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2012.
ZHOU Jiang. Elastic-plastic interactive buckling test and finite element analysis of welded H-section steel members[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [10] CHENG X, CHEN Y, PAN L. Experimental study on steel beam-columns composed of slender H-sections under cyclic bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88: 279-288.
- [11] 陈以一, 何雅雯. 基于广义塑性铰线法的压弯钢构件极限承载力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2016,33(6):14-23.
CHEN Yiyi, HE Yawen. Calculation of ultimate bearing capacity of steel beam-columns based on generalized yield line method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016,33(6):14-23.
- [12] CHENG X, CHEN Y. Ultimate strength of H-sections under combined compression and uniaxial bending considering plate interaction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018,143(4):196-207.
- [13] 金阳, 童根树. 考虑翼缘约束的工字形截面腹板的弹性屈曲[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009,43(10):1883-1891.
JIN Yang, TONG Genshu. Elastic buckling of web restrained by flanges in I-section members[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43 (10):1883-1891.
- [14] YESHEWAWORK Abebe D, CHOI J H. Nonlinear inelastic buckling behavior and residual strength of H-section steel column [J]. Advanced Materials Research, 2013,671-674:927-935.
- [15] 王彦博, 李国强, 陈素文, 等. Q460 钢焊接 H 形柱轴心受压极限承载力试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012,45(6):58-64.
WANG Yanbo, LI Guoqiang, CHEN Suwen, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of axially compressed high strength steel of H-section columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(6):58-64.
- [16] 施刚, 林锴锴, 周文静, 等. 960 MPa 高强度钢材轴心受压构件局部稳定试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014,35(1):126-135.
SHI Gang, LIN Cuocuo, ZHOU Wenjing, et al. Experimental study on local buckling of 960 MPa high strength steel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2014,35(1):126-135.
- [17] LEE K, LEE M, OH Y, et al. A comparative study on stub columns with various steel grades subjected to concentric axial loading [J]. International Journal of Steel Structures, 2015,15(1):103-114.
- [18] SUN Y, ZHAO O. Material response and local stability of high-chromium stainless steel welded I-sections [J]. Engineering Structures, 2019,178:212-226.
- [19] SUN Y, LIANG Y, ZHAO O. Testing, numerical modelling and design of S690 high strength steel welded I-section stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019,159:521-533.
- [20] GÉRARD L, LI L, KETTLER M, et al. Steel I-sections resistance under compression or bending by the overall interaction concept[J]. Journal of constructional steel research, 2021,182:106644.
- [21] 邓长根, 周江. H 型截面钢构件相关屈曲及腹板高厚比限值[C]. 武汉:中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会, 2012.
DENG Changgen, ZHOU Jiang. Analysis of local in-

- teractive buckling of H-section members and web height to thickness ratio limit[C]. Wuhan: Institute of Structural Stability and Fatigue, China Steel Construction Society, 2012.
- [22] 崔凡承, 邓长根, 陈以一. H形截面轴压钢构件弹塑性局部屈曲分析[C]. 合肥: 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会, 2014.
- CUI Fancheng, DENG Changgen, CHEN Yiyi. Elastoplastic local buckling analysis of H-section steel members under axial compression[C]. Hefei: Institute of Structural Stability and Fatigue, China Steel Construction Society, 2014.
- [23] 戎子涵, 童根树, 李忠学. H形截面轴心压杆的板件宽厚比限值[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(3): 70-76.
- RONG Zihan, TONG Genshu, LI Zhongxue. Limiting width-thickness ratios of plate elements in H-section axially compressed members [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(3): 70-76.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB50017-2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [25] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting[S]. Brussels: ECN, 2006.
- [26] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel and steel products-Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [28] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings[S]. Brussels: CEN, 2005.
- [29] American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-16[S]. Chicago, Illinois: AISC, 2016.

(编辑 桂智刚)