

DOI:10.11918/202406044

H形截面钢构件受弯性能及板件相关作用机制

郭珮瑶¹,程欣^{1,2},逯嘉鑫¹,安毅^{1,2},庄利军³

(1. 太原理工大学 土木工程学院,太原 030024;2. 土木工程防灾与控制山西省重点实验室(太原理工大学),太原 030024;
3. 山西四建集团有限公司,太原 030012)

摘要:为探究H形截面受弯构件承载性能及板件相关作用,对4根不同翼缘和腹板宽厚比的焊接H形截面钢梁进行四点纯弯加载试验,分析试件的破坏模式、力-位移曲线、极限受弯承载力及延性等性能指标,并通过对比相同尺寸的腹板在不同宽厚比翼缘支撑条件下的应变及腹板单板承载力的发展情况,揭示该情况下板件相关作用的机制。在试验基础上,采用ABAQUS建立经试验校准的有限元模型,采用该建模方法进行参数分析;对参数分析构件进行翼缘及腹板受弯承载力的拆分,进一步探究受弯情况下板件相关作用的规律。试验及参数分析结果均表明:板件局部屈曲的发生基本对应着H形截面构件极限受弯承载力,而板件宽厚比是影响局部屈曲的重要因素,板件相关作用表现为不同宽厚比的板件通过改变对其相邻板件的约束作用影响相邻板件的屈曲时刻,影响单块板件承载能力,从而影响构件整体承载性能。最后,基于参数分析结果对构件极限承载力进行归一化处理,提出了H形截面受弯状态下考虑板件相关作用的S2~S4级截面分类方法,对比结果表明,本文提出的截面分类限值与试验结果吻合良好,且能合理体现板件相关作用对于截面真实承载能力的影响。

关键词:板件相关作用;H形截面;纯弯试验;受弯承载力;截面塑性发展能力

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)10-0071-11

Bending performance and mechanism of plate interaction in H-shaped section steel members

GUO Peiyao¹, CHENG Xin^{1,2}, LU Jiaxin¹, AN Yi^{1,2}, ZHUANG Lijun³

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control (Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, China; 3. China Shanxi Sijian Group Co., Ltd., Taiyuan 030012, China)

Abstract: To explore the load-bearing performance and the role of plate components in H-shaped section bending members, four-point pure bending tests were conducted on four welded H-shaped steel beams with different flange and web width-to-thickness ratios. The failure mode, force-displacement curve, ultimate bending capacity, and ductility of the test pieces were analyzed. By comparing the strain development and single plate bearing capacity of the web plates under different flange support conditions with the same dimensions, the mechanism of plate component interaction in this situation was revealed. Based on the experimental results, a calibrated finite element model was established using ABAQUS, and parameter analysis was conducted using this modeling method. By separating the flange and web plate bending load capacities of the parameterized components, the law of plate component interaction under bending conditions was further explored. The experimental and parametric analysis results both indicate that the occurrence of local buckling in the plate elements generally corresponds to the ultimate bending capacity of the H-shaped section members. The width-to-thickness ratio of the plates is a significant factor affecting local buckling. Furthermore, the interaction between the plates manifests as plates with different width-to-thickness ratios influencing the buckling timing of adjacent plates by altering the constraints on them, which affects the load-bearing capacity of individual plates and thus impacts the overall load-bearing performance of the member. Finally, based on the parameter analysis results, the ultimate load-bearing capacity of the members was normalized, and an S2-S4 grade section classification method considering the interaction of plate elements under bending conditions for H-shaped sections was proposed. The comparison results show that the section classification limits proposed in this paper match well with the experimental results and can reasonably reflect the impact of plate element interactions on the actual load-bearing capacity of the section.

Keywords: plate interaction; H-section; pure bending test; flexural load capacity; cross-sectional plasticity development capability

收稿日期: 2024-06-18; 录用日期: 2024-08-16; 网络首发日期: 2024-10-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241017.0956.004>

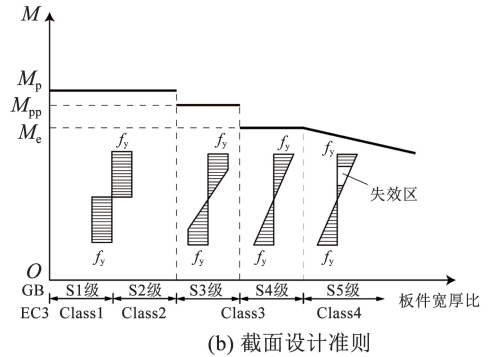
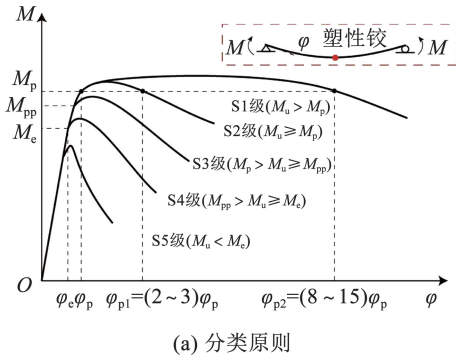
基金项目: 山西省基础研究计划优秀青年培育项目(202103021222007); 国家自然科学基金面上项目(51978437)

作者简介: 郭珮瑶(2000—),女,硕士研究生;程欣(1986—),女,教授,博士生导师

通信作者: 程欣, xchengtyut@163.com

板件宽厚比是影响钢结构变形和承载性能的关键参数,依据截面发展塑性及转动能力的不同,GB 50017《钢结构设计标准》^[1](简称《钢标》)将截面分为 5 个等级(S1 ~ S5 级),不同的截面类别对应着不同的设计准则,如图 1 所示。其中,S1、S2、S4、

S5 级截面分别对应着欧洲标准 EC3^[2]的 Class1 ~ Class4 截面,S3 级截面是《钢标》针对受弯构件部分发展塑性截面特别增设的一类截面。截面分类是各国钢结构设计的基础,同时也是《钢标》性能化抗震设计的基础,具有极其重要的作用。



注: M_u —极限抗弯承载力; M_p —全截面塑性弯矩; M_{pp} —部分塑性弯矩; M_e —边缘屈服弯矩; φ_e —达边缘屈服弯矩曲率; φ_p —达全截面塑性曲率; f_y —屈服应力。

图 1 截面分类原则

Fig. 1 Principles of cross-section classification

H 形截面构件是钢结构最常采用的构件形式之一,在对 H 形截面弯曲受力状态进行截面分类时,现行国内外规范基本遵循“单一板件准则”,即将腹板看作四边简支的单一板件,将翼缘看作三边简支一边自由的单一板件^[3],如图 2 所示。而实际上,在不同翼缘和腹板宽厚比组合情况下,相邻板件存在不同程度的非铰接约束作用,且该约束作用随着板件塑性发展的不断深入呈现出动态变化的特征^[4]。截面分类时所采用的“单一板件准则”,与板件间的真实约束情况不符,必然导致截面分类结果的不准确,进而对结构承载性能的计算造成偏差,影响结构的经济性与安全性。由于纯弯受力状态是各类复杂受力情况的基础,有必要对 H 形截面钢构件的板件相关作用进行深入研究,明确其影响机制,以实现 H 形截面塑性能力的充分利用,提高实际工程的经济效益^[5]。

的屈曲行为及板件相关作用展开了不同程度的研究。首先,针对 H 形截面钢构件在受弯状态下板件局部屈曲对其承载性能的影响,部分学者通过试验对不同材质、不同宽厚比翼缘及腹板的 H 形截面钢构件的受弯承载性能进行了研究。Lee 等^[6]、Shi 等^[7]、Sun 等^[8]及 Wu 等^[9]对 H 形截面钢构件进行了四点加载纯弯试验;Newell 等^[10]、Cheng 等^[11-12]及邓长根等^[13]对 H 形截面悬臂钢构件进行了弯曲试验研究。试验结果均表明,板件局部屈曲为截面受弯承载力退化的主要原因,板件宽厚比为影响屈曲发生时序的主要因素,且表明板件相关作用对于构件受弯承载能力的影响在构件截面发展弹性及弹塑性的全过程均存在。另一方面,为考虑 H 形截面翼缘和腹板之间的真实边界条件对受弯承载力的影响,部分学者致力于引入屈曲系数用于描述板件真实边界条件。例如,Johnson^[14]、张利若等^[15]、Wang 等^[16]及 Lee 等^[17]通过建立 ABAQUS 有限元模型提取 H 形截面构件屈曲应力,并基于所提屈曲应力进行反算与拟合,提出考虑板件相关作用的屈曲系数计算公式,所提屈曲系数与相邻板件宽厚比具有强相关性。此外,由于现行规范低估或未考虑板件相关作用对于截面分类的影响,部分学者提出了考虑板件相关作用的截面分类改进方法。Mehdi 等^[18]、付波等^[19]及宁克洋等^[20]针对 H 形截面受弯构件建立了 ABAQUS 或 ANSYS 有限元模型进行参数分析,基于构件延性或极限受弯承载力提出各级截面的分类限值,证实纯弯梁翼缘与腹板间相互约束作用在截面分类中不可忽略。

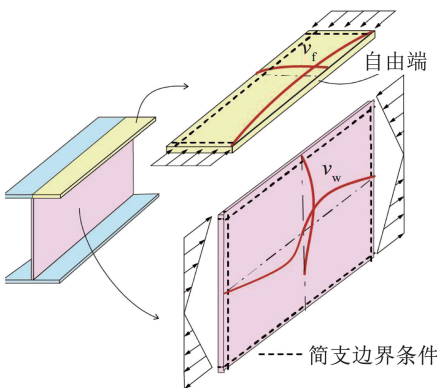


图 2 单板准则边界条件

Fig. 2 Boundary conditions in individual plate rule

国内外学者对于 H 形截面钢构件受弯状态下

由上述分析可知,现有研究从理论、试验及有限

元诸多方面均证实了板件相关作用对构件受弯承载能力具有重要影响,并较好地建立了弹性阶段板件真实边界条件与屈曲行为的联系。但对于以弹塑性局部屈曲为主导破坏模式的 H 形受弯构件,现有研究多停留在描述截面板件宽厚比与受弯承载力之间的宏观影响规律,较少从截面组成板件的力学特性对板件相关作用机制进行探究,且考虑板件相关作用的纯弯截面分类研究较为有限。因此,有必要对板件塑性屈曲相关行为及其对承载性能的影响机制进行进一步研究。本文以 H 形截面钢构件的板件宽厚比为主要控制参数,结合四点加载纯弯试验与 ABAQUS 有限元参数化建模,分析板件相关作用对受弯状态下 H 形截面构件的破坏模态、塑性发展及承载性能的影响,探讨构件受弯状态下板件相关作用机制,并提出考虑板件相关作用的 H 形截面受弯状态下 S2 ~ S4 级截面板件宽厚比限值,为实际工程设计提供参考。

1 弯曲试验设计

1.1 试件设计

为研究板件相关作用对 H 形截面钢构件纯弯状态下加载及变形性能的影响,对 4 根不同板件宽厚比的 H 形钢梁进行四点加载受弯试验。试件基本组成情况如图 3(a)所示,试件由同一批次 4 mm、6 mm 以及 8 mm 的 Q355B 钢板切割成不同尺寸的板件焊接而成,试件总长 3 000 mm,为防止加载时发生局部承压破坏,在支座及加载点处焊接 10 mm 厚加劲板。试件主要参数如表 1 所示,各试件宽厚比对比情况及依据《钢标》的截面分类结果如图 3(c)所示。其中,试件 H-1 ~ H-3 由相同腹板和不同宽厚比的翼缘组成,以此可体现不同翼缘对相同腹板塑性发展能力的影响;试件 H-4 的设置可研究翼缘和腹板均非常大的情况下 H 形钢构件的局部屈曲发展特性。

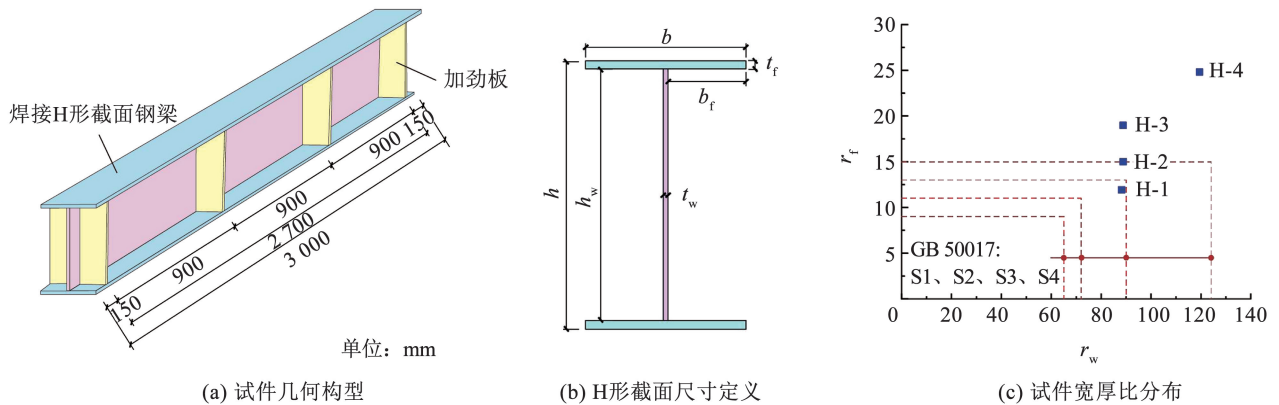


图 3 试件截面尺寸及宽厚比分布

Fig. 3 Specimen cross-section and width-thickness ratio distribution

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of specimens

试件 编号	$h \times b \times t_w \times t_f /$ mm × mm × mm × mm	r_w	r_f	规范(实测) 截面等级	$M_e /$ (kN · m)	$M_{pp} /$ (kN · m)	$M_p /$ (kN · m)	$u_e /$ mm	$M_{u, test} /$ (kN · m)	$u_{0.85} /$ mm	μ
H-1	300 × 160 × 4 × 8	107.83	12.24	S4(S2)	141.92	155.93	163.14	8.96	172.67	55.15	3.60
H-2	300 × 160 × 4 × 6	109.35	15.81	S5(S3)	101.82	116.36	126.91	8.18	125.96	47.99	4.23
H-3	300 × 200 × 4 × 6	109.35	19.96	S5(S5)	123.23	138.23	149.65	8.18	119.64	48.29	3.60
H-4	400 × 250 × 4 × 6	147.23	25.14	S5(S5)	209.76	235.69	255.59	6.14	175.69	44.71	4.89

注: $r_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{235}}$ 和 $r_f = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{f_{yf}}{235}}$ 分别为腹板和翼缘考虑强度等级的等效宽厚比, M_p 为全截面塑性弯矩, M_{pp} 为翼缘全部屈服腹板发展

1/4 截面高度塑性应力的部分截面塑性弯矩, $M_e = W_e f_{yf}$ 为边缘屈服弯矩, $u_e = \frac{23M_e L^2}{24EI}$ 为理论屈服位移, W_e 为受弯弹性截面模量, f_{yf} 和 f_{yw} 分别为翼缘和腹板的实测屈服强度, $L = 2 700$ mm 为试件两支座间距。

1.2 材性试验

按照 GB/T 228.1—2021《金属材料室温拉伸试验》^[21] 对试件所用钢板进行标准拉伸试验,材性试

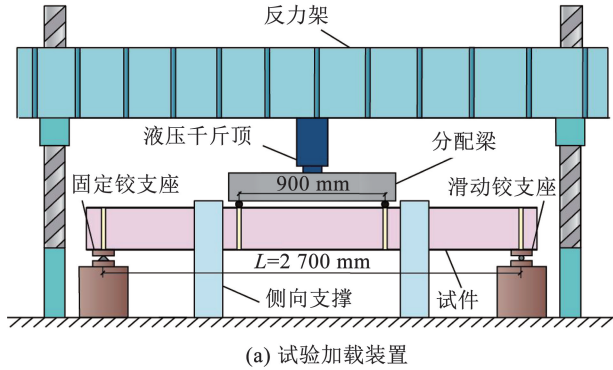
验试件与试验构件为同一批钢材,每种厚度板材取 3 个试样进行重复试验,材性试验结果见表 2。

表 2 板材实测材性结果

Tab.2 Measured material properties of steel plate

板件厚度/ mm	板件实测 厚度/mm	E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	f_u/f_y	伸长率
4	3.72	202	464.24	580.83	1.25	0.31
6	5.69	198	325.75	477.66	1.47	0.38
8	7.68	208	356.80	496.00	1.39	0.30

注: E 为钢材弹性模量, f_y 为钢材屈服强度, f_u 为钢材极限强度。



1.3 加载装置

试验采用四点加载的加载方式,加载装置如图 4(a)所示。千斤顶通过分配梁施加竖向荷载,形成两侧各 900 mm 剪弯段与中部 900 mm 纯弯段(图 4(b)),纯弯段弯矩 $M = FL/6$,其中, F 为千斤顶所施加的总荷载。为实现试件两端简支的边界条件,一端采用固定铰支座,一端采用滑动铰支座;为防止试件发生整体弯扭失稳,在试件弯剪段布置了两组侧向支撑装置。

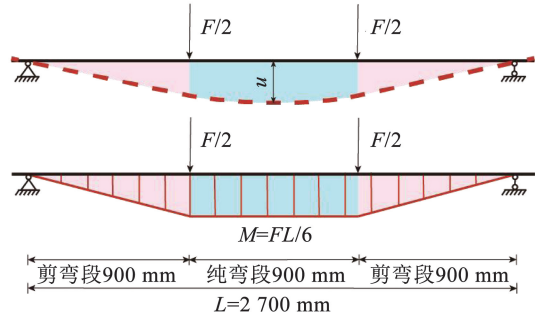


图 4 试验加载装置及加载受力示意

Fig.4 Diagram of test loading device and loading force

1.4 测试方案

4 个试件采用相同的测试方案,应变片及位移计测点布置方案如图 5 所示。共布置了 16 个单向应变片,其中, S1 ~ S8 成对布置于上翼缘板件上下侧,用于监测纯弯段受压翼缘塑性及屈曲发生及发展的情况; S9、S10 布置于跨中下翼缘外侧,以监测受拉翼缘塑性发展情况; S11 ~ S16 布置于跨中截面的腹板上,以监测腹板屈曲及塑性的发展情况。其中,在板件同一位置正反两侧成对布置的应变片可

用于观测屈曲后板件两侧相反的应力发展趋势,作为板件屈曲发生时刻的判定依据。

共布置了 10 个位移传感器,其中, D1 和 D2 分别布置在两端支座上翼缘用于监测加载过程中支座竖向位移状态; D3 和 D4 位于试件两端以监测加载过程中试件的轴向伸缩变形; D5 和 D6 用于监测试件加载过程中的面外位移; D7 和 D8 位于两加载点位置下翼缘处以监测试件加载点的位移; D9 和 D10 布置于跨中下翼缘用于测量试件的跨中挠度。

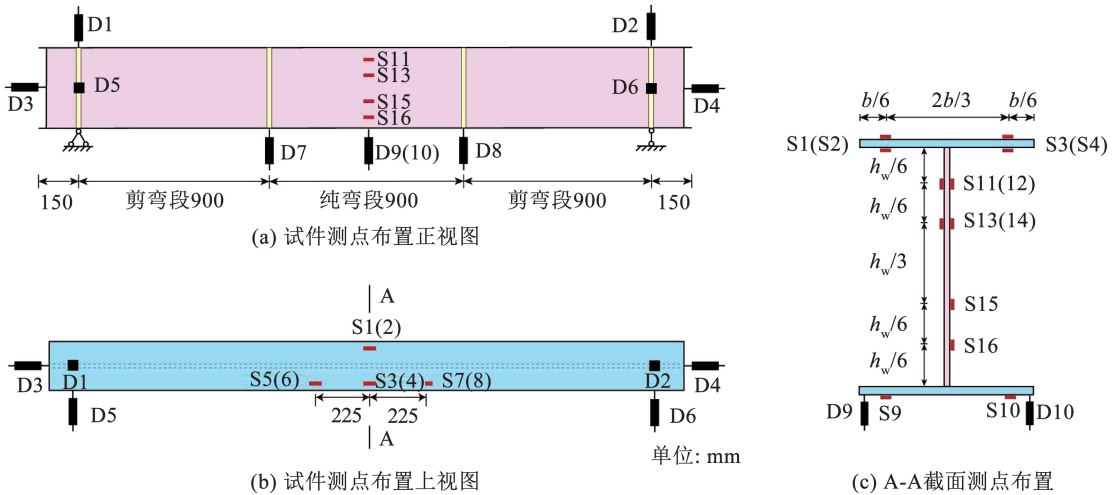


图 5 测点布置

Fig.5 Arrangement of measuring points

2 试验结果

2.1 破坏模式

将各试件最终破坏形式列于图 6 中,可以看出,所有试件均在纯弯段出现了明显的翼缘与腹板局部

屈曲破坏,未发生平面外的整体失稳破坏。各试件的破坏过程均呈现以下 3 个主要阶段:屈曲发生前未有明显变形现象,跨中部位受压翼缘与腹板同时发生局部屈曲,屈曲变形不断发展直至试件无法承载停止加载。

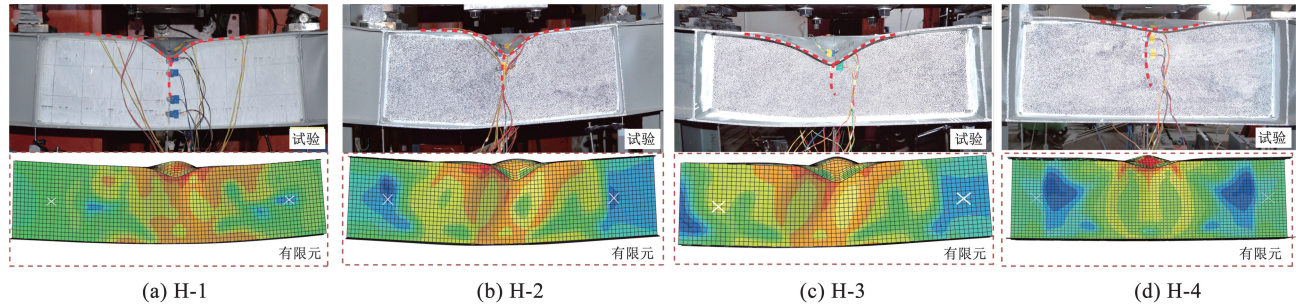


图 6 H-1 ~ H-4 试件与有限元最终变形

Fig. 6 Final deformation diagrams of specimens H-1-H-4 and finite element analysis

对于大宽厚比承受纯弯作用的 H 形钢构件,板件屈曲是关键破坏形式,因此,受压板件屈曲时刻的判定尤为重要。此处通过“凸面应变反转准则”^[22],即将板件因面外屈曲导致的凸起侧出现应变反向发展趋势的时刻确定为板件局部屈曲发生时刻。各试件受压翼缘及腹板屈曲的判定过程如图 7 所示,其中, u 为跨中挠曲位移(D9 和 D10 的平均值), M 为跨中弯矩, u_e 和 M_e 为表 1 所示屈服位移和边缘屈服弯矩。由图 7 可以看出,4 个试件翼缘和腹板均同

时发生屈曲,其中,试件 H-1 与 H-2 为塑性屈曲(屈曲时刻 $M/M_e > 1$),而试件 H-3 与 H-4 为弹性屈曲(屈曲时刻 $M/M_e < 1$);局部屈曲的发生基本对应着试件极限承载能力状态,说明局部屈曲对于承载性能的重要影响。还可发现试件 H-1 ~ H-3 腹板屈曲发生时刻分别为 $3.03u_e$ 、 $2.19u_e$ 与 $1.65u_e$,说明相同腹板在不同宽厚比翼缘的支撑作用下,腹板发展塑性和抵抗屈曲的能力产生明显差异,体现了板件相关作用对屈曲发生时序的显著影响。

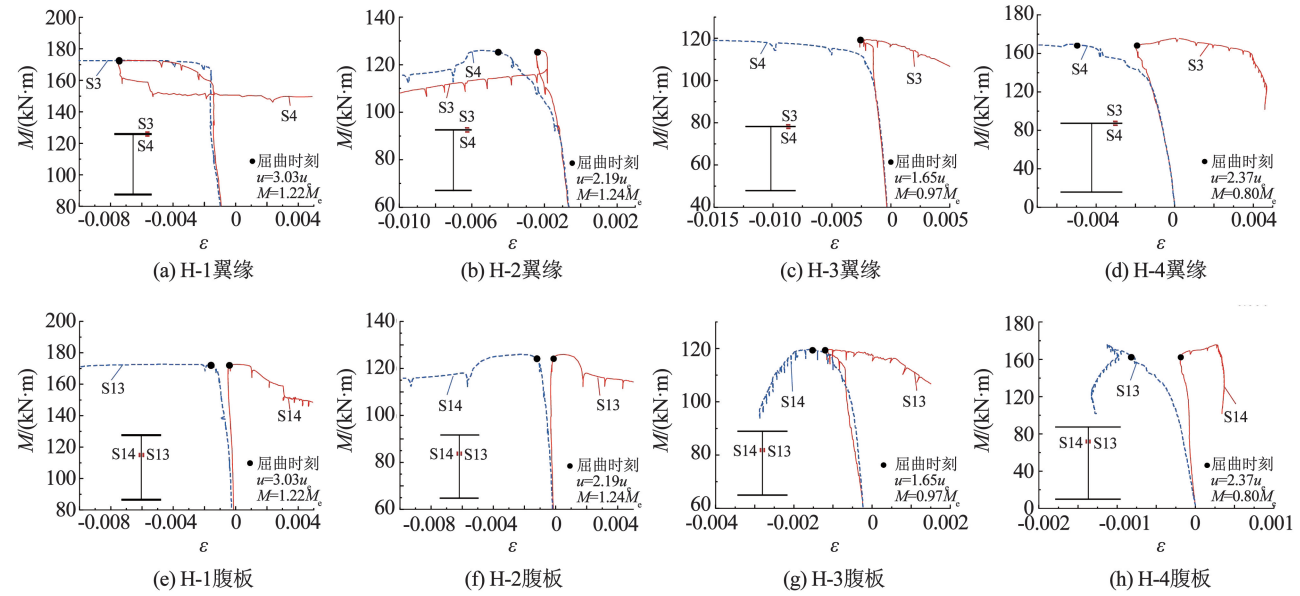


图 7 试件 H-1 ~ H-4 屈曲时刻判定

Fig. 7 Specimens H-1-H-4 buckling moment determination

为进一步探究大宽厚比 H 形截面钢构件纯弯状态下的受弯承载力发展机制,将各试件跨中截面应变发展过程汇总于图 8 所示,其中,相同位置若布置多个应变片则取该位置处应变的平均值。由图 8

可以看出,各试件屈曲前应变分布基本满足平截面假定,且中性轴基本位于 $h/2$ 处;试件屈曲后,截面应力发生重分布,受压区应变快速增长,中性轴向下移动,承载力开始退化。

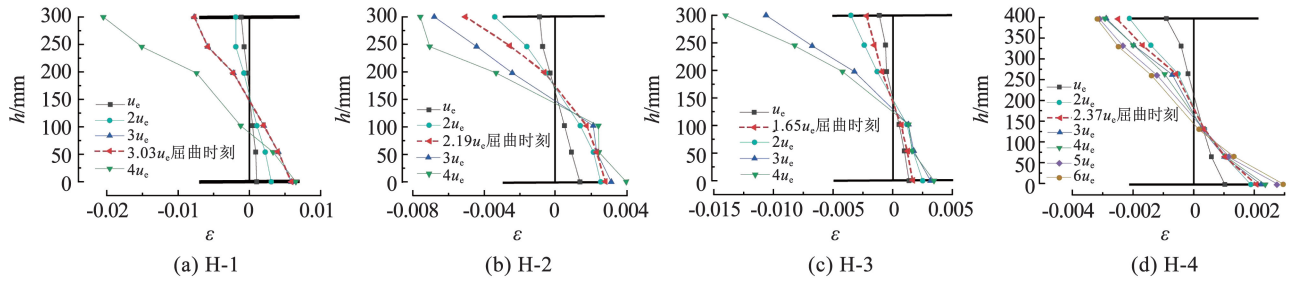


图 8 试件 H-1 ~ H-4 跨中截面应变发展

Fig. 8 Strain development in mid-span section of specimens H-1-H-4

2.2 $M-u$ 曲线

将各试件跨中弯矩-位移 ($M-u$) 曲线列于图 9 中。可以看出,各试件在达到 M_e 或屈曲发生前, $M-u$ 基本呈线性增长;屈服或屈曲发生后, $M-u$ 出现明显非线性特征。其中,试件 H-1 ~ H-3 屈曲时刻对应着极限承载力时刻,以屈曲时刻为分界点,展示出明显的屈曲前增长和屈曲后退化阶段;而试件 H-4 由于板件过薄,屈曲发生后,由于屈曲后强度的作用出

现一段较为有限的屈曲后增长阶段,随后承载力明显退化。还可看出由于板件宽厚比的不同,各试件屈曲前塑性发展程度差异较大,试件 H-1 和 H-2 均经历了一定的塑性发展阶段发生屈曲,试件 H-1 达到 M_p 之后依然可以发展塑性承载力;而试件 H-3 和 H-4 均在边缘屈服之前就发生了屈曲,属于弹性屈曲,因此,屈曲前曲线无明显非线性特征。

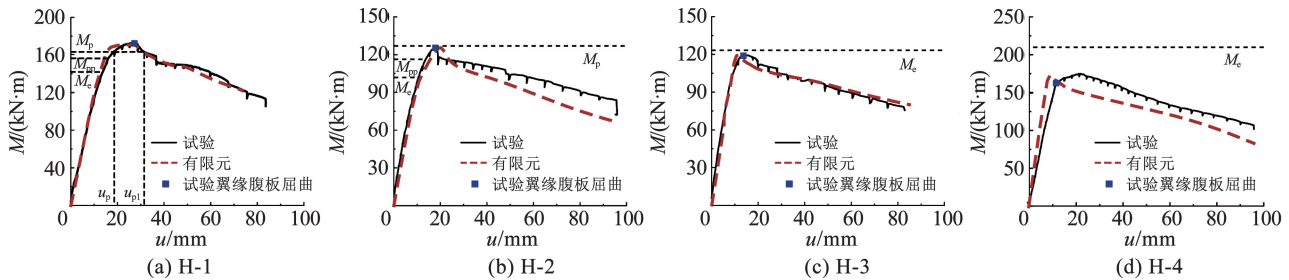


图 9 弯矩-位移曲线

Fig. 9 Bending moment-displacement curves

对比试件 H-1 ~ H-3 还可看出,3 个试件屈曲前塑性发展能力呈现出显著差异,再次说明板件间相关作用的存在,具体为不同宽厚比的翼缘对于相同腹板支撑作用不同,腹板呈现出不同的塑性发展能力,进而导致试件极限受弯承载能力以及塑性发展能力的不同。

2.3 延性与极限承载力

采用延性系数 $\mu = u_{0.85}/u_y$ 表征各试件塑性变形性能,其中, u_y 为通过 R-Park 法^[23] 确定的等效屈服位移, $u_{0.85}$ 为试件退化至 85% M_u 时的跨中位移。各试件延性系数 μ 计算结果如表 1 所示,可以看出,4 个试件均表现出较好的延性,说明大宽厚比构件在受弯条件下屈曲后依然具有一定的变形能力。

将各试件极限承载力 $M_{u, \text{test}}$ 及其归一化表示形式汇总于表 1 与图 10 中,其中, M_{pp} 和 M_p 分别为部分截面发展塑性弯矩与全截面塑性弯矩,具体定义见表 1。由图 10 可知,随着翼缘宽厚比的增大, $M_{u, \text{test}}/M_{pp}$ 、 $M_{u, \text{test}}/M_p$ 与 $M_{u, \text{test}}/M_e$ 呈减小趋势,截面

发展塑性能力减弱。依据截面分类的定义,各试件实际截面分类结果如表 1 所示,对于试件 H-1,由于 $M_u > M_p$,可认为其截面可发展全截面塑性,且其转动能力可通过 θ_{p1} 与 θ_p 的比值进行衡量,其中, $\theta_p = 6u_p/L$ 为截面达全截面塑性转角, $\theta_{p1} = 6u_{p1}/L$ 为极限转动能力转角。由图 9(a) 可知, u_p 与 u_{p1} 数值分别为 18.29 mm 与 31.50 mm,求得 $\theta_{p1}/\theta_p = 1.72$,试件 H-1 转动能力小于 3,属于 S2 级截面^[2];试件 H-2, $M_p > M_u > M_{pp}$,说明极限状态时腹板可发展 1/4 腹板高度塑性,但不能发展全截面塑性,属于 S3 级截面;试件 H-3 与 H-4 极限承载力未达截面边缘屈服弯矩,发生弹性屈曲,均属于 S5 级截面。其中,试件 H-1 与 H-2 依据《钢标》截面分类结果分别为 S4 和 S5 级截面,与实测结果相比过于保守,其原因除规范的安全冗余度外,主要缘于《钢标》进行截面分类时依据“单一板件原则”,未考虑翼缘与腹板的相关作用对截面受弯承载力的提高。对于试件 H-1 和 H-2,单一板件准则体现为不考虑厚实翼缘对于

较薄腹板塑性变形能力的有益支撑作用,与试验结果不符。因此,进行截面分类时非常有必要考虑真实板件约束条件即板件相关作用的影响。

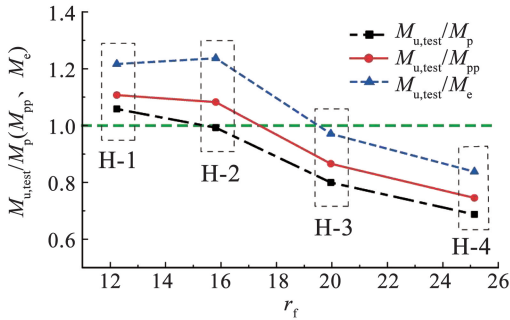


图 10 归一化极限承载力

Fig. 10 Normalized ultimate bearing capacity

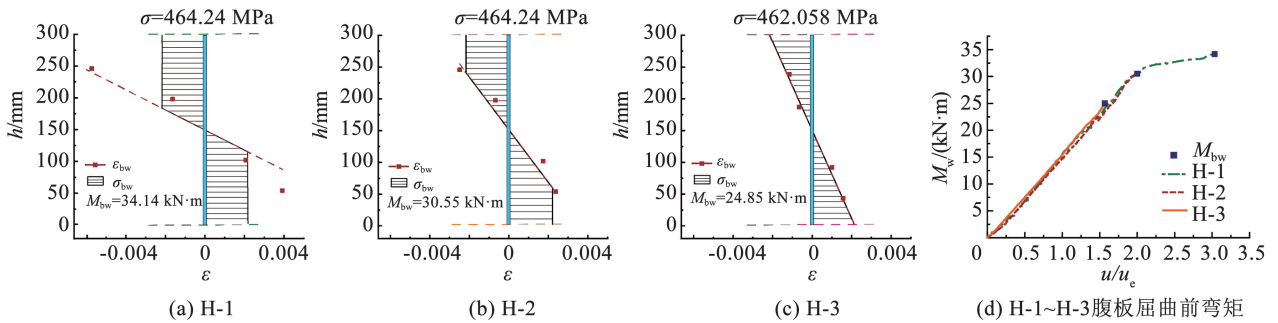


图 11 试件 H-1 ~ H-3 腹板屈曲前受弯承载力

Fig. 11 Web bearing capacity of specimens H-1-H-3

由图 11 可知,试件 H-1 ~ H-3 腹板屈曲时刻塑性发展程度显著不同,其中,试件 H-1 腹板塑性发展能力最强,板件屈服后有明显的塑性发展段;试件 H-2 腹板弯矩塑性发展能力较为有限;试件 H-3 腹板于弹性阶段发生屈曲。试件 H-1 ~ H-3 腹板屈曲弯矩差异也较大, M_{bw} 分别为 34.14、30.55、24.85 kN·m,说明随着翼缘宽厚比的增大,腹板所能提供的受弯承载力贡献值逐渐降低。上述分析表明,不同翼缘支撑作用下,相同腹板屈曲时刻的塑性发展程度不同,进而影响腹板受弯承载能力,此为实验板件相关作用对受弯承载力的作用机制。

3 有限元模型的建立及校核

3.1 有限元模型的建立及校核

为考察板件宽厚比对 H 形钢梁及单独板件受弯承载力影响,采用 Abaqus 软件对 H 形钢构件建立有限元模型进行非线性分析。有限元模型示意如图 12 所示,有限元模型采用 S4R 壳单元,考虑计算

2.4 腹板受弯承载力

为进一步探究板件相关作用的发展机制,将试件 H-1 ~ H-3 的腹板应变及承载力发展特性进行对比分析。由图 8 可知, H-1 ~ H-3 板件屈曲前基本满足平截面假定,提取 3 个试件屈曲时刻的腹板应变 ε_{bw} ,并基于材料理想弹塑性的假定,做出屈曲时刻腹板应力 σ_{bw} 的分布图,进一步求得屈曲时刻腹板的受弯承载力贡献值 M_{bw} ,计算过程列于图 11(a) ~ (c) 中。按照应变→应力→弯矩的方法,计算出各试件屈曲前腹板受弯承载力 M_w ,列于图 11(d) 中,可以看出在 3 条曲线共享的屈曲前位移部分承载力基本重合,证明了图 11(a) ~ (c) 试验应变计算腹板屈曲弯矩方法的正确性。

精度和时间成本最终选取网格尺寸为 15 mm × 15 mm;两支座端采用 Kinematic coupling 将截面的所有节点耦合在截面中心参考点 RP-1 与 RP-2 上,加载点采用 Rigid body 将刚面自由度赋予中心参考点 RP-3 与 RP-4 上;边界条件为一端固定简支,另一端滑动简支。施加图 13 所示的焊接 H 形截面残余应力分布模型^[24];考虑到初始几何缺陷影响,选择第一屈曲模态作为初始几何缺陷施加到构件上,缺陷峰值取 $h/200$ ^[25]。最后,通过控制位移加载,在参考点 RP-3 与 RP-4 施加竖向位移,以实现有限元构件与试验试件的受力模式相同。

采用本文弯曲试验对有限元模型进行校核,采用试验试件实测几何尺寸、材性数据和初始几何缺陷建立有限元模型。各试件有限元分析结果所得破坏模态及 $M-u$ 曲线分别如图 6 与图 9 所示,通过与试验结果对比可认为该有限元模型能够较好模拟试件的破坏模态及全过程 $M-u$ 曲线,因此,可采用上述模型进行参数分析。

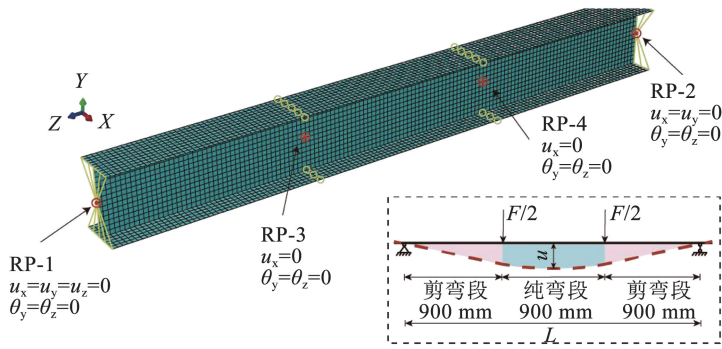


图 12 有限元模型示意

Fig. 12 Schematic of finite element model

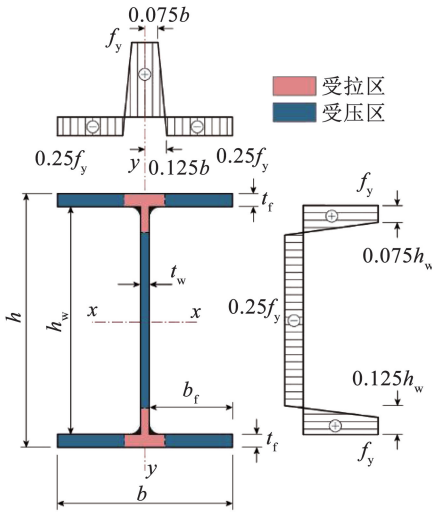


图 13 H 形截面残余应力分布模型

Fig. 13 Distribution model of residual stress of H-section

3.2 参数分析设定

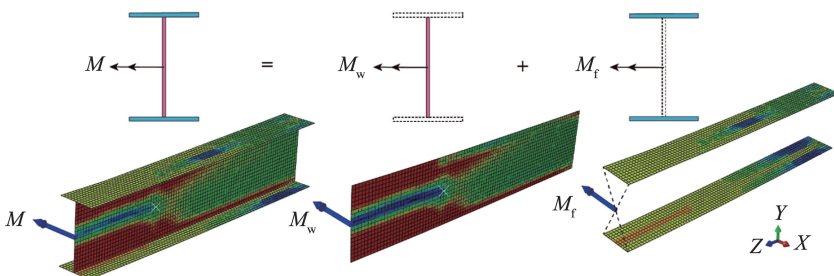
由试验结果可知,对于纯弯 H 形钢构件而言,其截面承载能力主要受翼缘和腹板宽厚比影响,改变板件宽厚比进行参数分析。采用图 12 所示加载模型,以翼缘宽厚比 r_f 和腹板宽厚比 r_w 为主要控制参数,为便于参数化建模分析,固定截面尺寸 $h \times b$ 为 $300 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$,通过变化板件厚度实现板件

宽厚比的变化。进行参数分析时选用 Q355 钢材,材料模型采用简化二次弹塑性模型^[26],选取钢材弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$,泊松比为 0.3,其余与 3.1 所述建模方法相同。设置翼缘宽厚比 r_f 取 8 ~ 30,步长为 2;腹板宽厚比 r_w 取 20 ~ 140,步长为 5。参数分析共建立了 324 个分析模型,包含了不同的翼缘与腹板宽厚比组。

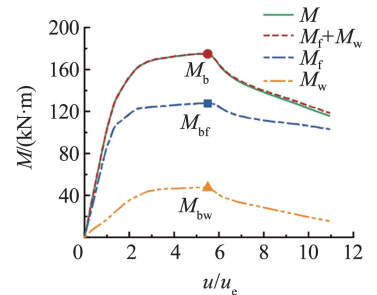
4 参数分析结果

4.1 板件相关作用分析

H 形截面的总弯矩 M 由上下翼缘弯矩 M_f 和腹板弯矩 M_w 组成,即 $M = M_f + M_w$,通过从有限元分析结果中分别提取翼缘弯矩 M_f 与腹板弯矩 M_w 进行分析,可揭示翼缘-腹板间相互约束对板件受弯承载性能的影响机制。提取过程如图 14(a) 所示,图中 M 为整体试件受弯承载力, M_w 为腹板受弯承载力, M_f 为上下翼缘共同受弯承载力。以试件 H-12-70($r_f = 12, r_w = 70$) 为例,其全过程弯矩拆解结果如图 14(b) 所示,并将截面计算弯矩 $M = FL/6$ 与翼缘和腹板弯矩之和 $M_w + M_f$ 进行对比,可以看出,全过程 M 与 $M_w + M_f$ 基本重合,证实了提取方法的正确性。



(a) 弯矩提取过程



(b) H-12-70 全过程弯矩拆解结果

图 14 翼缘与腹板弯矩提取过程

Fig. 14 Flange and web bending moment extraction process

为揭示板件相关作用对构件受弯承载能力的影响机制,即考虑板件宽厚比对相邻板件受弯承载能力的影响规律,提取 $r_f = 8、12、16$ 及 20 的翼缘在不同腹板支撑作用下的翼缘弯矩 M_f 列于图 15(a) ~ (d) 中,提取 $r_w = 60、80、100$ 及 120 的腹板在不同翼缘支撑作用下的腹板弯矩 M_w 列于图 15(e) ~ (h) 中,图中 $M_{ef} = bt_f(h - t_f)f_y/2$ 为单块翼缘边缘屈服弯矩, $M_{ew} = h_w^2 t_w f_y/6$ 为腹板边缘屈服弯矩。由图 15 可知,所有构件翼缘及腹板屈曲时刻均对应于单板

承载力峰值时刻,说明局部屈曲对单块板件承载性能具有决定作用。同时还可看出,相邻板件支撑条件不同的情况下,相同宽厚比翼缘或腹板的屈曲时刻呈现显著差异,表现为翼缘(腹板)宽厚比越大,腹板(翼缘)屈曲时刻可发展塑性的能力越差。综上,通过拆分单板承载能力发展过程,再次证明板件相关作用的根本机制为,不同相邻板件的支撑条件通过改变板件屈曲时刻影响截面塑性发展程度,从而影响构件整体承载性能。

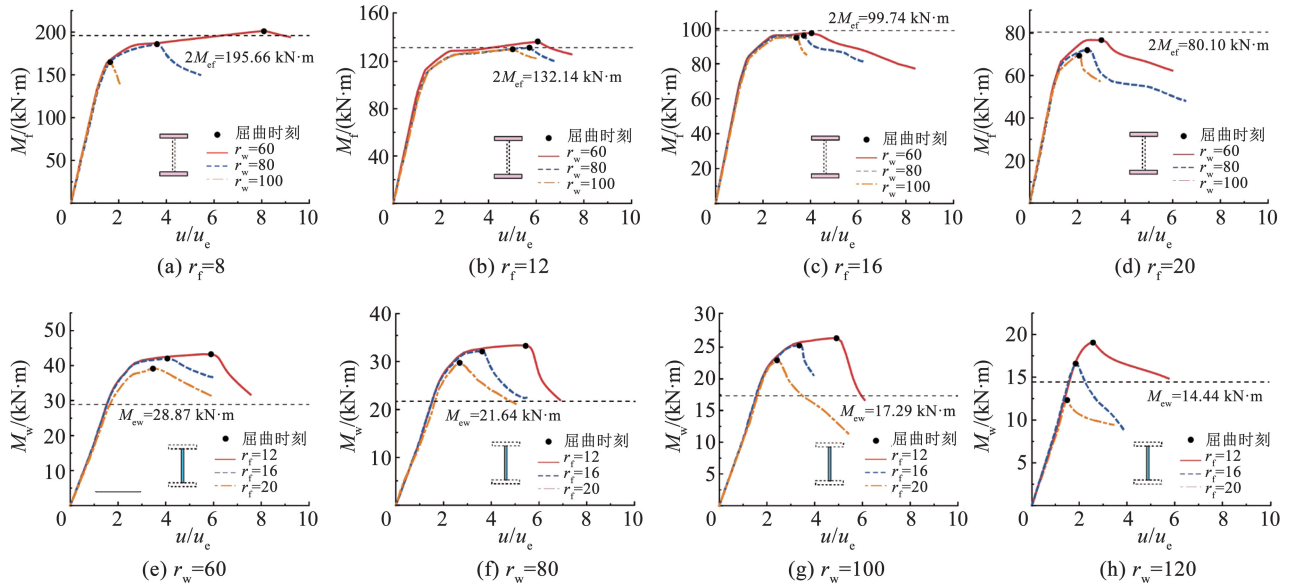


图 15 典型试件翼缘及腹板弯矩曲线

Fig. 15 Typical specimens flange and web bending moment curves

4.2 参数分析结果

试验和参数分析结果均表明 H 形截面构件翼缘-腹板间存在相关作用,且相关作用对构件受弯承载力及截面塑性变形能力产生影响。说明《钢标》由单-板件准则确定的截面分类方式将与真实情况不符,因此,需要提出考虑板件相关作用的纯弯截面分类方式。本节对构件在纯弯曲状态下的截面分类限值展开研究,基于构件截面极限承载力与塑性发展程度给出 S2 ~ S4 级截面分类限值。

为研究板件相关作用对构件截面分类的影响,分别采用 M_p 、 M_{pp} 和 M_e 对参数分析结果试件极限受弯承载力进行无量纲化处理,并以翼缘宽厚比 r_f 、腹板宽厚比 r_w 和无量纲化极限承载力为坐标轴建立三维坐标系,结果如图 16(a) ~ (c) 所示。可以看出, H 形截面受弯构件极限承载力与截面塑性发展程度受板件宽厚比变化影响,当翼缘宽厚比较小时,腹板宽厚比较大也可满足截面;而腹板宽厚比较小时,翼缘宽厚比较大的截面也显示出相同特征。

分别使用归一值为 1 的平面切割 3 个经无量纲化处理后的三维图,取切割平面上的有限元计算点

绘制于无量纲极限受弯承载力投影平面图中,见图 16(d) ~ (f)。可以看出,有限元计算点在 3 个平面图中的分布均随板件宽厚比变化存在明显趋势,当腹板宽厚比逐渐增大,计算点分布区翼缘宽厚比趋于减小,由此体现构件翼缘与腹板间呈现出强烈的板件相关特性。将各图中有限元计算点进行多项式拟合,可得到 S2、S3 与 S4 级截面宽厚比限值,拟合结果如下:

$$R_p = -0.13r_w + 27.72, 20 \leq r_w \leq 130 \quad (1)$$

$$R_{pp} = -0.18r_w + 35.68, 20 \leq r_w \leq 135 \quad (2)$$

$$R_e = -0.18r_w^2 - 0.52r_w + 52.54, 20 \leq r_w \leq 140 \quad (3)$$

式中: R_p 、 R_{pp} 和 R_e 分别为 S2 级、S3 级与 S4 级截面翼缘宽厚比上限值。当 $r_f \leq R_p$, 属于 S1 或 S2 级截面;当 $R_p < r_f \leq R_{pp}$, 属于 S3 级截面;当 $R_{pp} < r_f \leq R_e$, 属于 S4 级截面;当 $r_f > R_e$, 属于 S5 级截面。拟合结果列于图 16(d)、16(e), 通过拟合曲线的决定系数 R^2 评价曲线拟合程度, 3 类宽厚比限值 R^2 分别为 0.992、0.987 与 0.990, 证实拟合公式与截取的有限元计算点吻合程度良好。

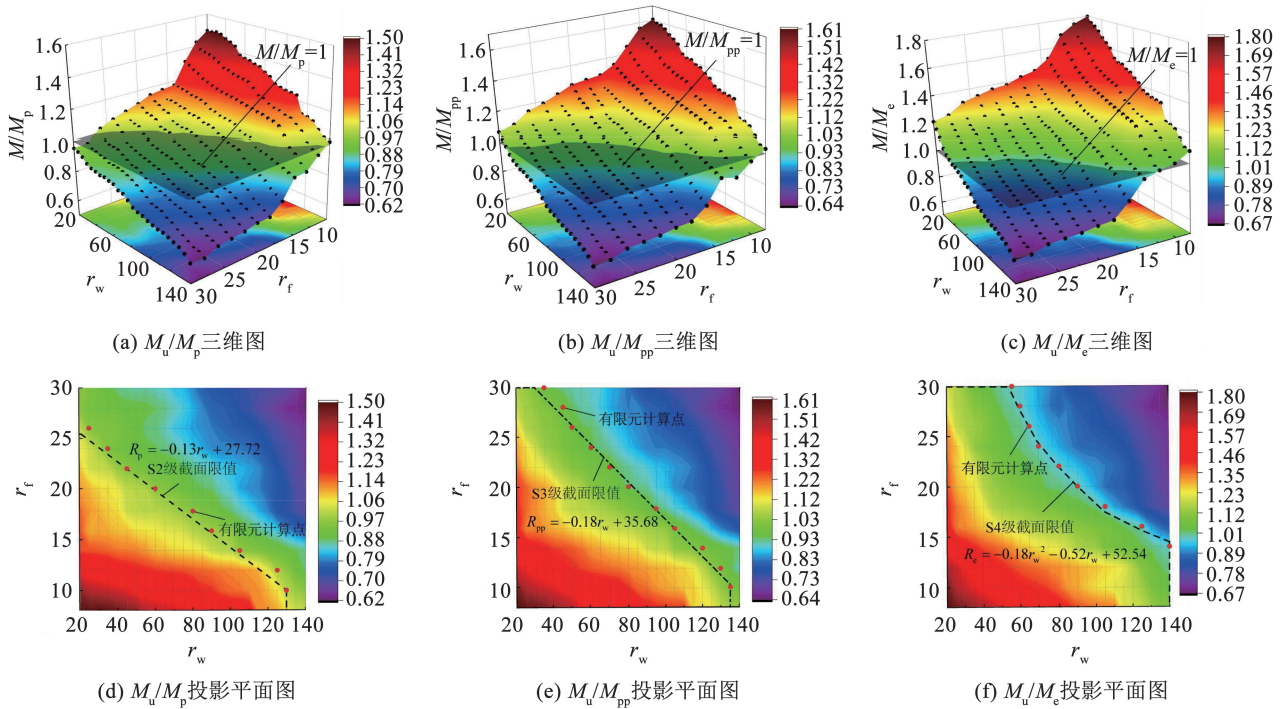


图 16 极限承载力归一化三维图及投影平面图

Fig. 16 Normalized three-dimensional diagram and projected plane diagram of ultimate bearing capacity

4.3 分类准则评价

将本文所提板件宽厚比限值曲线及《钢标》中截面分类限值列于图 17 中,并将试件实测截面分类结果列于图中。可以看出,本截面类别分类方法与试验结果完全一致,说明了本文分类结果的有效性。与《钢标》相比,本文提出的宽厚比限值充分考虑了板件相关作用对截面极限承载能力的影响,较为经济合理。

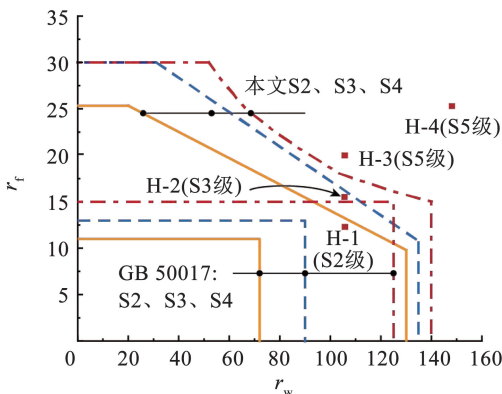


图 17 本文截面分类限值与规范对比结果

Fig. 17 Cross-section classification limits in this paper and results of comparison with norms

5 结论

1) 试验中 4 根试件均以局部屈曲为主要破坏模式,翼缘与腹板同时发生局部屈曲,且屈曲时刻大致对应于承载力峰值时刻,屈曲后试件依然具有一

定的变形能力,板件宽厚比对于试件破坏模式及承载性能具有重要影响。

2) 试件 H-1 ~ H-3 为相同宽厚比腹板,不同翼缘宽厚比的一组试件,3 根试件的腹板在屈曲时刻塑性发展程度显著不同,随着翼缘宽厚比的增大,腹板所能提供的受弯承载力贡献值逐渐降低。

3) 参数分析结果表明,参数分析范围内所有构件翼缘及腹板屈曲时刻均分别对应于单板自身承载力峰值时刻;不同相邻板件支撑条件下,相同宽厚比翼缘或腹板的屈曲时刻差异显著,导致板件屈曲时刻截面塑性发展程度不同,从而影响构件整体承载性能。

4) 本文提出的考虑板件相关作用的 H 形截面钢构件受弯条件下 S2、S3 和 S4 级截面分类限值,与试验结果吻合;与现行规范相比,更加符合受弯截面构件真实承载情况,可实现截面塑性性能的充分利用。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—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. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architectures & Building Press, 2017

[2] CEN. Eurocode 3; design of steel structures-Part1-5 plated structural elements[S]. Brussels: [s. n.], 2006

[3] CHEN Yiyi, CHENG Xin, NETHERCOT D A. An overview study

- on cross-section classification of steel H-sections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013 (80): 386. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.10.006
- [4] 程欣, 陈以一. 考虑板件相关作用的 H 形截面压弯钢构件抗弯承载力[J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 41
CHENG Xin, CHEN Yiyi. Moment resistance of H-section steel beam-columns considering the interactive effect of plate elements [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 41. DOI: 1000-4750(2015)03-0041-09
- [5] CHENG Xin, DU HuiBo, SHI Xiaopeng, et al. Ultimate biaxial bending resistance of H-section steel members under different loading paths [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 200: 107678. DOI: 10.1016/i.jcsr.2022.107678
- [6] LEE C, HAN K, UANG C, et al. Flexural strength and rotation capacity of I-shaped beams fabricated from 800-MPa steel [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(6): 1043. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000727
- [7] SHI Yongjiu, XU Kelong, SHI Gang, et al. Local buckling behavior of high strength steel welded I-section flexural members under uniform moment [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(1): 93. DOI: 10.1177/1369433217711616
- [8] SUN Yao, ZHAO Ou. Material response and local stability of high-chromium stainless steel welded I-sections [J]. *Engineering Structures*, 2019(178): 212. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.024
- [9] WU Tungyu, El-TAWIL S, MCCORMICK J. Effect of cyclic flange local buckling on the capacity of steel members [J]. *Engineering Structures*, 2019 (200): 109705. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109705
- [10] NEWELL J, UANG C. Cyclic behavior of steel wide-flange columns subjected to large drift [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134: 1334. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:8(1334)
- [11] CHENG Xin, CHEN Yiyi, PAN Lingli. Experimental study on steel beam-columns composed of slender H-sections under cyclic bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013 (88): 279. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.020
- [12] CHENG Xin, CHEN Yiyi. Ultimate strength of H-sections under combined compression and uniaxial bending considering plate interaction [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018 (143): 196. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.12.019
- [13] 邓长根, 应武挡, 崔凡承. 焊接 H 形截面纯弯钢构件弹塑性局部相关屈曲分析[J]. *建筑结构*, 2017, 47(13): 20
DENG Changgen, YING Wudang, CUI Fancheng. Elasto-plastic local interactive buckling analysis of welded H-section steel members under pure bending moment [J]. *Building Structure*, 2017, 47(13): 20. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.13.004
- [14] JOHNSON D L. An investigation into the interaction of flanges and webs in wide-flange shapes [C]//Proceedings 1985 Annual Technical Session. [S. l.]: Structural Stability Research Council, 1985
- [15] 张利若, 陈绍蕃, 顾强. 工形截面纯弯曲梁翼缘腹板的相关屈曲[J]. *西安建筑科技大学学报*, 1996, 28(4): 86
ZHANG Liruo, CHEN Shaofan, GU Qiang. Interaction of local buckling in welded I-section steel beams [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 1996, 28(4): 86
- [16] WANG Tao, ZHA Zhixiang, PAN Chonggen. Prediction for elastic local buckling stress and ultimate strength of H-section beam [J]. *Heliyon*, 2023, 9: e14700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14700
- [17] LEE J, KANG Y. Elastic local buckling coefficients of I-shaped beams considering flange-web interaction [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024(195): 111325. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111325
- [18] MEHDI S, SHI Yongjiu. Classification of I-section flexural members based on member ductility [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 95(4): 98. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.12.004
- [19] 付波, 童根树. 工字形截面的延性系数和面向抗震设计的钢截面分类[J]. *工程力学*, 2014, 31(6): 173
FU Bo, TONG Genshu. Ductility factors of I-section and section classification [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6): 173. DOI: 1000-4750(2014)06-0173-10
- [20] 宁克洋, 杨璐, 张允, 等. 奥氏体型不锈钢受弯构件截面分类研究[J]. *工程力学*, 2023, 40(9): 98
NING Keyang, YANG Lu, ZHANG Yun, et al. Research on section classification of austenitic stainless steel flexural members [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(9): 98. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0037
- [21] 钢铁研究总院. 金属材料室温拉伸方法: GB/T 228—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
Iron and Steel Research Institute. Metallic material tensile testing at ambient temperature: GB/T 228—2002 [S]. Beijing: China Standard Press, 2002
- [22] VANN W P, SEHESTED J. Experimental techniques for plate buckling [C]//International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Rolla: Missouri S&T, 1973: 82
- [23] PARK R. State of the art report ductility evaluation from laboratory and analytical testing [C]//Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1988: 605
- [24] ECCS. Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints [M]. Brussels: ECCS, 1984
- [25] CEN. Eurocode 3: design of steel structures-Part 1-1 general rules and rules for buildings; EN 1993-1-1 [S]. Brussels: ES-AENOR, 2005
- [26] 石永久, 王萌, 王元清. 结构钢材循环荷载下的本构模型研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(9): 92
SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Study on constitutive model of structural steel under cyclic loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 92. DOI: 10.6052/i.issn.1000-4750.2010.09.0711