

多钢种混用钢梁滞回性能试验研究与有限元分析

朱爱珠^{1*}, 李正¹, 冷荣¹, 余震², 王佳盟¹

(1. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074;

2. 湖北合瑞建筑工程有限公司, 武汉 430072)

摘要: 本文设计制作了4个H型钢梁试件,通过拟静力试验得到不同腹板高厚比以及不同钢种组合下钢梁的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线以及延性等,并评估了试件的滞回性能。随后利用有限元软件ABAQUS进行模拟验证,通过参数分析进一步补充了不同腹板高厚比和不同钢种组合对钢梁滞回性能的影响。结果表明:随着腹板高厚比的减小,钢梁的延性和滞回耗能能力均有所提高,且增大腹板厚度对钢梁延性的提高程度大于对钢梁极限承载力的提高程度;相比同钢种钢梁,多钢种混用钢梁的极限承载力提高了17.4%、延性降低5.6%。随着多钢种混用钢梁翼缘强度等级的增大,其极限承载力的提高程度和延性的降低程度均增大。

关键词: 多钢种混用钢梁; 腹板高厚比; 延性; 滞回性能; 翼缘强度等级; 有限元分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0013-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240123001

Experimental Research and Finite Element Analysis on Hysteretic Performance of Hybrid Steel Beams

ZHU Aizhu^{1*}, LI Zheng¹, LENG Rong¹, YU Zhen², WANG Jiameng¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Herui Construction Engineering Management Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

*Corresponding author: zhuai Zhu1228@hust.edu.cn

Abstract: Four H-shaped steel beam specimens were designed and manufactured. The failure modes, hysteretic curves, skeleton curves and ductility of specimens under different height-to-thickness ratio of web and strength grade combination of steel were obtained through quasi-static experiments, so as to evaluate the hysteretic performance of specimens. Then the finite element software ABAQUS was used to simulate and verify the experimental results. The effects of different height-to-thickness ratio of web and strength grade combination on hysteretic performance of steel beams were further supplemented by parametric analysis. The results show that, with the reduction of the height-to-thickness ratio of the web, the ductility and energy dissipation capacity of the steel beams are improved, and the degree of improvement of the ductility of the steel beams by increasing the thickness of the web is greater than the degree of improvement of the ultimate load carrying capacity. Compared with the steel beams made of a single steel grade, the ultimate load carrying capacity of the hybrid steel beam is improved by 17.4%, and the ductility is reduced by 5.6%. With the increase of the strength grade of the flanges of the hybrid steel beam, the degree of improvement in the ultimate load carrying capacity and the degree of reduction in the ductility increase continuously.

Keywords: hybrid steel beam; height-to-thickness ratio of the web; ductility; hysteretic performance; strength grade of flange; finite element analysis

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(52078230)

作者简介:

朱爱珠(1981—),女,博士,教授,主要从事钢结构疲劳、钢-混凝土组合结构力学性能等方面的研究。

E-mail: zhuai Zhu1228@hust.edu.cn。(通信作者)

李正(1998—),男,硕士,主要从事钢-混凝土组合结构力学性能方面的研究。

多钢种混用钢梁是指采用不同强度等级的钢材组合而成的钢梁。对于多高层物流仓储建筑,基于经济性考虑,采用纯钢结构的形式日益广泛。由于跨度大、楼面活载大等因素,框架梁需要较大的截面高度,考虑到腹板高厚比的构造要求,设计时腹板厚度往往大于翼缘板厚度,此时不能有效地提高钢梁的抗弯承载力。多钢种混用钢梁翼缘采用高强度钢材,能够充分提供抗弯能力;腹板采用低强度等级钢材能够放宽高厚比限制,厚度也不会过大,该种钢梁能更好地适应于多高层物流仓储结构的特点,其设计受到工程设计人员的广泛关注。

多钢种混用钢梁的研究起步于20世纪60~70年代,此时高性能钢逐渐问世^[1]。将结构中承载较大的部位采用高性能钢,承载较小的部位采用低等级钢材,能够降低造价、节约钢材。基于这种思想,多钢种混用钢梁静力性能研究得到一定发展。VELJKOVIC等^[2]对混用钢梁抗弯、抗剪、弯扭屈曲和抗疲劳性能进行了研究,认为其具有更好的经济性,并出于适用性考虑认为翼缘强度不应超过两倍的腹板屈服强度;EARLS^[3]通过试验对高性能混合工字型钢梁的抗弯性能和延性进行了研究,结果表明:翼缘宽厚比的增大使钢梁局部屈曲发生更早,降低了钢梁的延性,翼缘采用高强度钢材时应具有更严格的宽厚比限制。娄廷会等^[4]和王鹏飞等^[5]通过有限元分析研究了多钢种混用钢梁与匀质钢梁的差异性,发现当腹板采用低强度等级钢材时承载力下降并不显著,认为多钢种钢梁具有较好的经济性,同时通过回归分析得到了钢梁弹塑性弯扭屈曲临界弯矩计算公式;李清扬等^[6]利用有限元对波折腹板多钢种混用钢梁受力性能进行分析,翼缘采用更高强度等级钢材能够提升梁的整体稳定极限荷载,对屈曲后梁的刚度影响较小,而腹板采用较高强度等级钢材和较大厚度对其整体稳定性影响均较小。对于工字型钢梁,腹板高厚比能够影响其局部稳定性,众多学者针对腹板高厚比对钢梁滞回性能的影响也进行了一定研究。舒伟伟等^[7]和李少峰^[8]通过有限元分析研究了腹板高厚比对支撑框架结构滞回性能的影响,发现在一定范围内,腹板高厚比越大,钢梁耗能能力和延性越差;郭震等^[9]对钢结构梁柱节点进行了非线性数值模拟,发现腹板高厚比越大,腹板越早发生局部屈曲,进而使翼缘也更早屈曲,随着损伤演化,梁的承载力退化更快。

目前针对多钢种混用钢梁的研究主要集中在静力性能方面,翼缘采用高强度等级钢材对梁的抗弯承载力和整体稳定极限荷载均有所提升,具有较好的经济性,但关于其滞回性能方面的研究相对较少。通常腹板高厚比越大,结构的滞回性能越差。虽然多钢种混用钢梁腹板采用较低强度等级钢材时,腹板高厚比更容易满足规范^[10]限值要求,但此时多钢种混用钢梁的滞回性能尚不清楚。因此本文对不同腹板高厚比以及不同钢种组合下的H型

混用钢梁进行了拟静力加载试验,得到各试件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线,进而研究了延性等滞回性能,并利用有限元软件ABAQUS进行模拟验证,确保有限元建模的精确性。之后进一步开展参数分析,研究不同腹板高厚比和钢种组合对钢梁滞回性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

建筑结构梁柱和节点设计应满足“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”的要求,因此为简化设计,不考虑柱及节点核心区的破坏,只考虑钢梁的塑性破坏,更能直接反映不同设计参数对钢梁滞回性能的影响。多高层物流仓储建筑,其跨度通常在12 m及以上,梁端到反弯点长6 m及以上,梁高多为1~1.5 m,同时考虑到试验的实际条件,对构件进行1:3的缩尺比例设计。

试件梁长取为2.2 m,梁高0.3~0.5 m,翼缘尺寸设计满足抗震等级为二级时的板件宽厚比限值^[10],而腹板尺寸近于限值。本文共设计了4个H型钢梁试件,编号及尺寸如表1。其中M表示多钢种钢梁,其翼缘和腹板分别采用Q420和Q235钢材,S表示同钢种钢梁,翼缘和腹板均采用Q345钢材; h_w 、 t_w 、 b_t 和 t_t 分别表示腹板高、腹板厚、翼缘宽和翼缘厚, h_w/t_w 即为腹板高厚比, λ 表示相应钢材强度下规范给定腹板高厚比限值, k 为腹板高厚比与 λ 的比值。通过改变多钢种试件腹板高度来改变其高厚比,同时确保M-1和S-1的 k 相差不大,来研究多钢种钢梁腹板高厚比和不同钢种组合对钢梁滞回性能的影响。按照《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[11]采用梁翼缘局部加宽方法对连接部位进行加强,同时采用盖板及加腋板进行补强,以避免钢梁发生脆性破坏,加载点钢梁位置布置12 mm厚支承加劲肋,试件M-1整体尺寸如图1所示。

表1 各试件尺寸设计

Table 1 Dimension of specimens

试件编号	h_w/mm	t_w/mm	b_t/mm	t_t/mm	h_w/t_w	λ	k
M-1	340	5	130	10	68.0	72.0	0.94
M-2	360	5	130	10	72.0	72.0	1.00
M-3	380	5	130	10	76.0	72.0	1.06
S-1	340	6	130	10	56.7	59.4	0.96

1.2 材性试验

不同厚度的钢材均按相应规范^[12]进行材性试验,拉伸试样与构件取同一批材料,并制作成板状样式,每组试件3块,得到材性试验结果如表2。其中 t 表示板件的厚度, σ_y 、 σ_u 和 E_s 分别表示试验所得钢材的屈服强度、极限

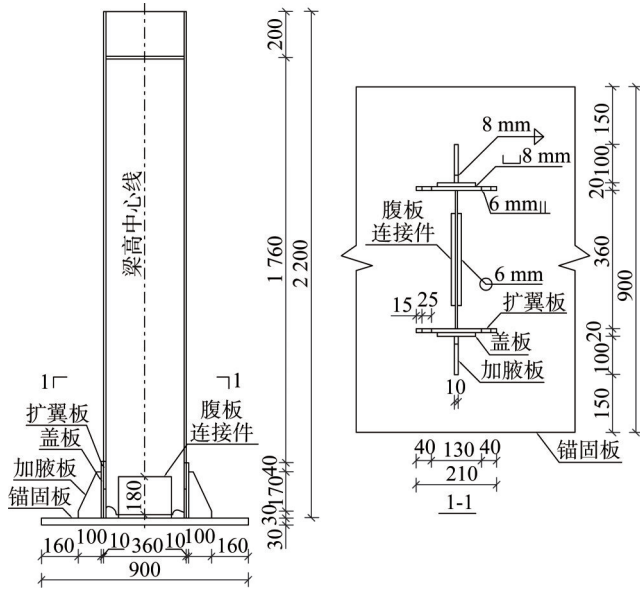


图1 试件M-1整体尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Overall dimensional drawing of the specimen M-1 (unit: mm)

强度和弹性模量,试验结果均取平均值, f_y 和 f_u 分别表示规范^[10]给定不同型号钢材屈服强度和极限强度指标。

表2 材性试验结果

Table 2 Material property test results

钢材型号	t/mm	σ_y /MPa	σ_u /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /GPa
Q235	5	298	428	235	375	213.6
Q345	6	338	478	345	470	210.4
Q345	10	344	524	345	470	206.3
Q420	10	427	505	420	520	211.7

从表中可以看出:Q235钢材屈服强度和极限强度均存在较大的强度富余,安全系数较高;而Q345钢材和Q420钢材试验得到的强度值均较低,与规范相应强度标准值接近。

1.3 加载方案与测点布置

1.3.1 加载方案

锚固板通过预留孔位和地锚螺栓固结于地面沟槽上,利用侧撑体系对钢梁一定位置处上下翼缘进行夹持,以提高钢梁整体稳定性,侧撑底部同样锚固于地槽上。通过传力装置将作动器与钢梁相连,作动器对试件进行往复加载,利用高强螺栓和梁端预留孔位将钢梁与传力装置连接起来,并在钢梁相应上下翼缘位置增设垫块,以避免翼缘直接承压破坏。加载装置如图2所示。其中钢梁靠近作动器一侧翼缘为下翼缘,远离作动器一侧为上翼缘。

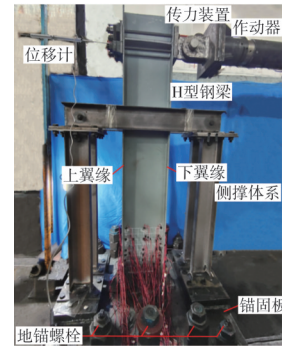


图2 加载装置

Fig. 2 Loading setup

1.3.2 加载制度

参考相应规范^[13],试验加载采用位移控制法,加载前检查试验装置并进行预加载。正式加载时:在钢梁屈服前,每级加载循环一次,共分为3级;在梁翼缘达到屈服强度后,按照 Δ_y 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 、 $4\Delta_y$...进行加载,每级位移加载循环三次。当试件承载力退化到0.85倍的极限荷载时停止加载。图3为试验加载制度,试验时以拉为正,推为负。

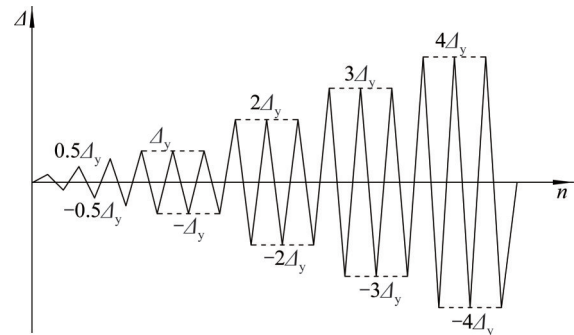


图3 试验加载制度

Fig. 3 Test loading system

1.3.3 测点布置

滞回性能试验主要测出钢梁加载端的水平位移和扩翼末端钢梁的应变。由文献[14]可知当钢梁采用扩翼方式进行加强时,试验主要破坏区域为扩翼板末端沿梁长 h 的范围,因此将其作为重点关注区域,对于翼缘和腹板分别粘贴应变片和应变花。为监测连接部位是否牢固,在相应的焊缝周围也布置了一定数量的应变片,位移计布置见图2,试件应变片及应变花布置见图4。

2 试验过程及结果分析

试件按M-1、M-2、M-3、S-1的顺序依次进行加载,试验前结合有限元分析和理论计算得到各试件屈服位移均在14.0 mm左右。而在试件M-1预加载时,结合钢梁应变数据线性外推发现其屈服位移可达到2倍的理论计

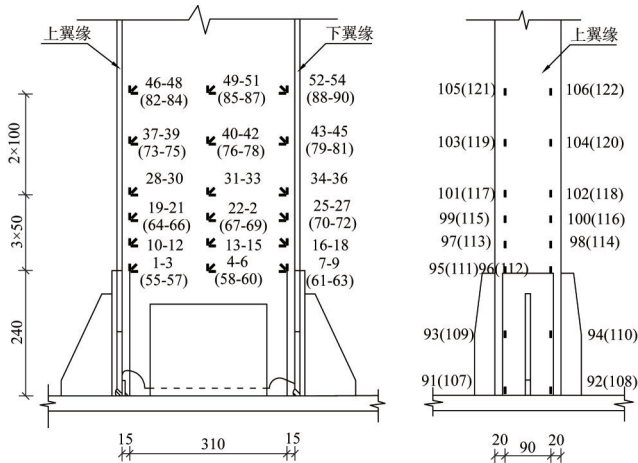


图4 应变测点布置图(单位: mm)

Fig. 4 Arrangement of strain measurement points
(unit: mm)

算值及以上,可能原因为锚固板平面尺寸较大且与地面之间存在一定的空隙,使其并非为完全固接状态。为避免加载过程中屈服位移取值过大而错过加载过程中的重要细节,加载中M-1的 Δ_{y1} 取为28.0 mm, M-1试验完成后发现,所取屈服位移较小,偏于保守。后续试件的 Δ_y 均按预加载应变进行设定,各试件试验过程中 Δ_{y1} 、 Δ_{y2} 、 Δ_{y3} 和 Δ_{y4} 分别设定为28.0 mm、44.0 mm、56.0 mm、56.0 mm。由于千斤顶存在一定的加载误差,使得试件M-2、M-3和S-1屈服位移计算存在一定偏差。

2.1 试验现象与破坏形态

部分试件主要试验现象如图5。在加载初期加载位移较低时,试件均处于弹性阶段,位移每次恢复至0时,荷载基本为0。随着加载位移达到实际屈服位移后,加载过程中不断能听到开裂响声,并可观察到拉推过程中,上下翼缘处加腋板与锚固板之间的连接焊缝出现一定程度开裂,并且裂缝随着位移的增大逐渐扩展。各试件焊缝开裂对应加载位移分别为 $2\Delta_{y1}$ (56.0 mm)、 $2\Delta_{y2}$ (88.0 mm)、 Δ_{y3} (56.0 mm)、 Δ_{y4} (56.0 mm),由于试件M-1和M-2设定加载屈服位移偏小,故其焊缝开裂对应位移较大。

试件M-1位移增大到-84.0 mm时,钢梁出现了明显的扭转变形,如图5a),使侧撑槽钢产生了较大的挤压变形,当位移回至0时,扭转变形也会消失,而在正向加载过程中均无扭转现象的发生。试件M-2位移增大到-88.0 mm时同样观察到较为严重的扭转变形。后续试件的试验为避免该类现象的产生,加强了对千斤顶的侧向约束。

试件M-1位移增大至等级 $4\Delta_{y1}$ 的峰值位移+112.0 mm时,在钢梁扩翼末端上翼缘及其附近腹板区域出现一定程度的屈曲变形,其余试件在位移达到+110.0 mm左右

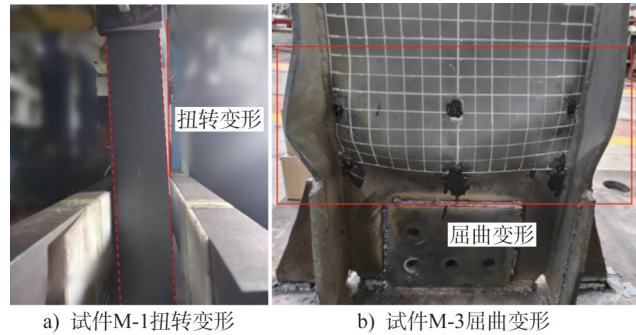


图5 试件试验现象图

Fig. 5 Phenomena of specimens

时也出现相同现象,此时各试件均已达到极限承载。当位移达到-110.0 mm左右时在钢梁扩翼末端下翼缘及其附近腹板区域也出现屈曲变形。随着后续加载循环次数增加,每次位移回至0时不可恢复变形逐渐增大,且每次位移循环对应的峰值荷载逐渐减小。由于试件M-1和M-2加载过程中出现了较为严重的扭转变形,侧撑槽钢也出现较大位移,为确保安全而较早停止了试验,试件最终均只在上翼缘附近出现较大程度变形。而试件M-3和S-1均在峰值荷载达到最大要求时停止加载,最终在扩翼末端整个截面内存在较大程度屈曲变形。试件M-3破坏现象如图5b)所示,各试件最终破坏形态见图9,对应停止加载时的位移分别为 $4\Delta_{y1}$ (112.0 mm)、 $3\Delta_{y2}$ (132.0 mm)、 $3\Delta_{y3}$ (168.0 mm)和 $3\Delta_{y4}$ (168.0 mm)。

由于各试件尺寸相差不大,且均采用扩翼板进行加强,故试件破坏形态均为在加强侧板末端一定范围内钢梁出现屈曲变形,可见对梁端进行加强能够有效使钢梁塑性铰进行转移,避免脆性破坏。

2.2 滞回曲线和骨架曲线

通过滞回曲线可充分了解结构或构件在循环荷载作用下的刚度、耗能能力、延性等滞回性能。图6为各试件梁端加载点的荷载-位移滞回曲线,其中 P_{exp} 、 P_{FEM} 分别为试验结果和有限元计算结果。

从图中可以看出,由于试件M-1、M-2在加载过程中出现较为严重的扭转变形而停止加载,其滞回曲线并不完整。从试件M-3和S-1曲线整体趋势中可以看出,试件滞回曲线均较为饱满,滞回环的面积较大,具有较好的耗能能力。由于传力装置之间可能存在一定间隙,每次位移循环至初始位置附近时,曲线斜率均较小。试件M-2由于最后一次反向加载时出现较为严重的扭转变形,试件严重损伤,故其后续正向加载曲线出现较大程度的偏离。

通过连接滞回曲线上每次循环加载的峰值点可以得到试件的骨架曲线,骨架曲线可以反映试件受力和变形之间的关系,得到构件的屈服荷载、极限荷载和延性

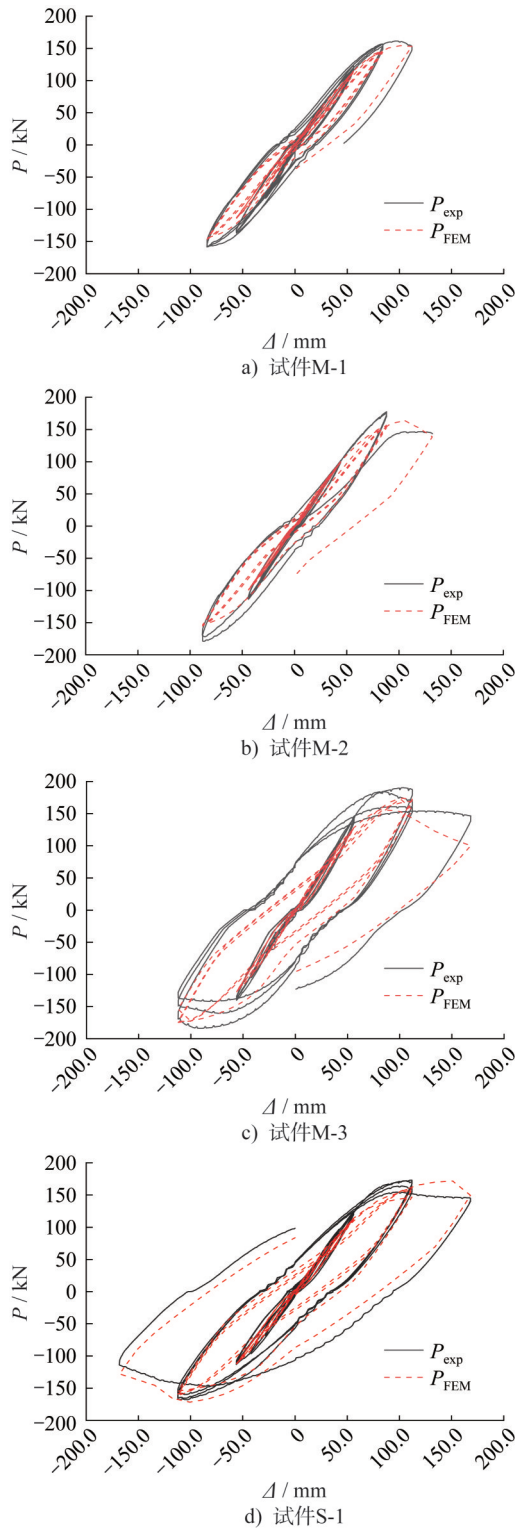


图6 各试件有限元与试验滞回曲线对比

Fig. 6 Comparison of hysteresis curves between FEA and test of specimens

等主要参数指标。将各试件骨架曲线汇总于图7所示。

从图中可以看出,各试件骨架曲线在位移较小时均能保持很好的线性,随着翼缘或腹板屈服,曲线逐渐表现出非线性,钢梁截面应变迅速变大,翼缘和腹板逐渐出现

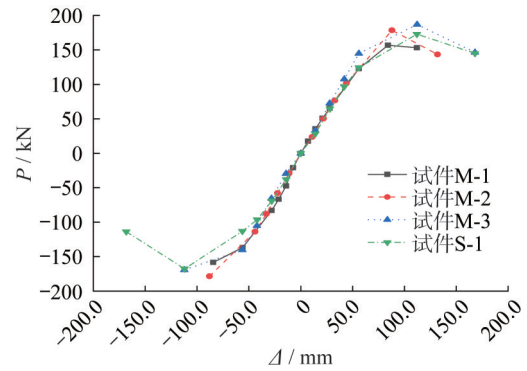


图7 各试件骨架曲线图

Fig. 7 Skeleton curves of specimens

屈曲变形,当试件达到全截面屈服时,此时钢梁近似达到极限承载能力。随着位移增大,钢梁变形程度不断增大,承载能力减小,曲线不断下降。

通过对比骨架曲线可以发现:由于截面高度较大,试件M-3弹性阶段刚度较大;试件M-1、M-2、M-3、S-1极限荷载对应位移分别为97.0 mm、88.0 mm、101.0 mm、112.0 mm,试件M-2由于扭转变形损伤而较早破坏,其对应极限荷载下位移相对较小;由于截面高度的增大,试件M-3极限荷载对应位移大于M-1。相对而言,同钢种钢梁试件S-1虽然截面高度较小,但极限荷载下的位移最大,这是因为同钢种钢梁翼缘和腹板屈服点一致,极限破坏时二者塑性发展一致且发展程度相对较大,而多钢种钢梁翼缘强度较高,塑性相对较差,尽管达到极限弯矩时腹板塑性得到一定发展,但总体上多钢种钢梁的变形能力略差。

2.3 延性

延性是指试件或结构达到屈服强度后自身塑性变形的能力。本文采用位移延性系数 μ 来表示延性性能指标,其计算式如下:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中: Δ_y 表示试件达到屈服状态时对应的位移; Δ_u 表示试件承载力下降到极限荷载的85%时对应的位移。

通过骨架曲线计算得到各试件的 μ 见表3。其中 v_μ 表示相比于试件M-1,各试件延性系数的提高程度。

表3 各试件延性系数

Table 3 Ductility coefficient of specimens

试件编号	Δ_y /mm	Δ_u /mm	μ	v_μ /%
M-1	43.3	145.1	3.35	—
M-2	46.9	122.4	2.61	-22.1
M-3	44.5	145.0	3.26	-2.7
S-1	45.3	165.0	3.65	9.0

从表中可以看出,试件M-2由于出现较大扭转变形导致提前破坏,极限位移及延性系数均较小。对于多钢种钢梁试件M-1和M-3,随着腹板高厚比的增大,试件M-3的延性系数略有减小,但变化不大,可能是因为二者腹板高厚比相差不大,屈服到极限过程中试件受力状态相差不大,所以腹板高厚比对延性系数影响较小。相比于多钢种钢梁M-1,同钢种钢梁S-1延性系数有9%的提高,虽然其腹板高厚比同样接近临界状态,但由于同钢种钢梁翼缘采用低强度等级钢材,板件强屈比较大,其变形能力相对较好,对应极限状态下其位移也较大,因此同钢种钢梁S-1的延性略好。

3 有限元分析

为深入研究不同腹板高厚比和翼缘腹板钢种组合对多钢种混用钢梁滞回性能的影响,本文采用有限元软件ABAQUS对试验结果进行模拟验证和参数分析。

3.1 有限元模型建立

有限元模型中钢材的本构选用混合强化模型,该模型可以较好地考虑构件屈服过程中的包辛格效应,同时通过耦合各向同性强化和随动强化机制,可以反映屈服面在应力空间中的均匀膨胀和整体平移。对于钢材的应力-应变曲线,有限元验证中选用材性试验的结果,由于规范更新了Q345钢强度指标,因此参数分析中采用相应规范强度标准值及抛物线本构^[15]。采用绑定的方式考虑板件之间的焊接。在模型相应位置对钢梁施加 z 方向的位移约束以考虑侧撑作用,在锚固板底部建立解析刚体以考虑实际约束,通过在螺栓孔位置施加一定压应力来模拟螺栓预紧力。有限元位移加载同试验设计相同,通过幅值控制每级位移的大小及循环次数,各部位约束情况如图8所示。

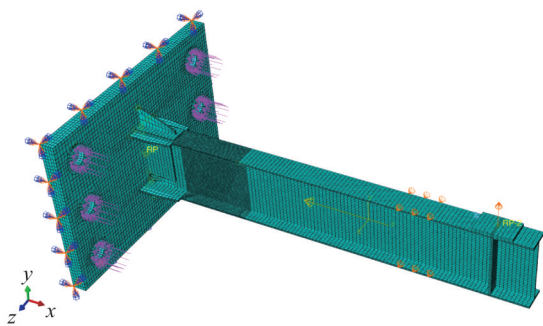


图8 有限元模型边界条件

Fig. 8 Finite element model boundary condition

各板件均采用C3D8R三维实体单元进行模拟,并在板件厚度方向均划分至少2个单元,从而避免计算结果失真。通过静力单调加载进行网格敏感性分析,从而确定整体网格尺寸为20 mm,重点关注部位网格尺寸为

5 mm,以此作为有限元分析的基础。

3.2 有限元验证

计算得到各试件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线以及极限荷载等,将其与试验结果进行对比以验证有限元模型的准确性。

各试件有限元分析与试验结果破坏形态对比如图9所示。有限元模型M-1、M-2、M-3、S-1对应出现屈曲变形的荷载等级分别为 $4\Delta_{y1}$ 、 $3\Delta_{y2}$ 、 $2\Delta_{y3}$ 、 $2\Delta_{y4}$ 的第一个循环,与试验结果相同。从图中可以看出,各试件屈曲破坏形态与实际情况较为符合,试件翼缘和腹板均发生了较明显的屈曲,且试验和有限元屈曲范围较为接近,均在翼缘加强末端梁长方向300 mm范围内。循环荷载作用下得到各试件有限元模型的滞回曲线,将其与试验结果进行对比,如图6所示。

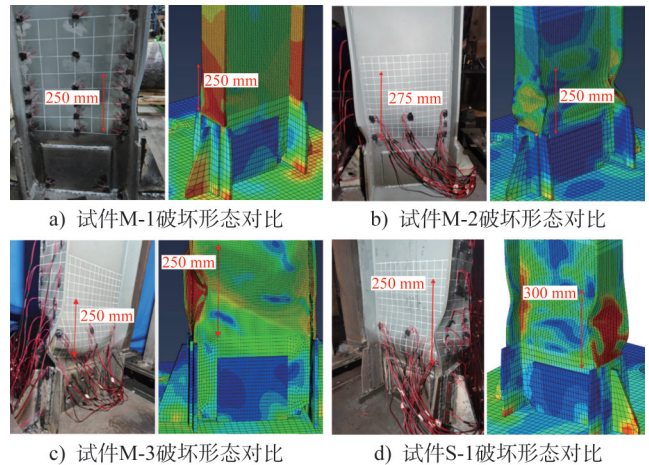


图9 各试件有限元与试验破坏形态对比

Fig. 9 Comparison of failure modes between FEA and test of specimens

从图6中可以发现,四个试件的有限元模型与其对应试验的滞回曲线拟合情况较好。加载初期试件处于弹性阶段时,有限元分析与试验得到的滞回曲线基本重合,且在位移循环至初始位置时曲线均存在斜率较小的现象,从有限元结果中发现这与加载初期锚固板存在一定翘起有关,其与地面并非为完全固结状态,从而也说明试验所取屈服位移较大;进入塑性阶段后,四个试件试验得到的滞回曲线较有限元结果更加饱满。在相同位移下,试验对应的荷载值略大,这与锚固板的实际约束情况有关:试验中,侧撑体系的底板对锚固板具有一定的竖向约束作用,当位移较大时,底板能够一定程度约束锚固板的翘起。而有限元中未考虑该作用影响,因此在相同位移下,试验对应的荷载值稍大。

图10为有限元计算与试验结果骨架曲线的对比图。从图中可以看出:在弹性阶段有限元与试验所得初始刚

度基本相同,骨架曲线近似重合;到加载后期,试件逐渐进入塑性阶段,有限元与试验对应极限荷载下的位移相同,且曲线刚度下降趋势相同,有限元模拟情况较好。

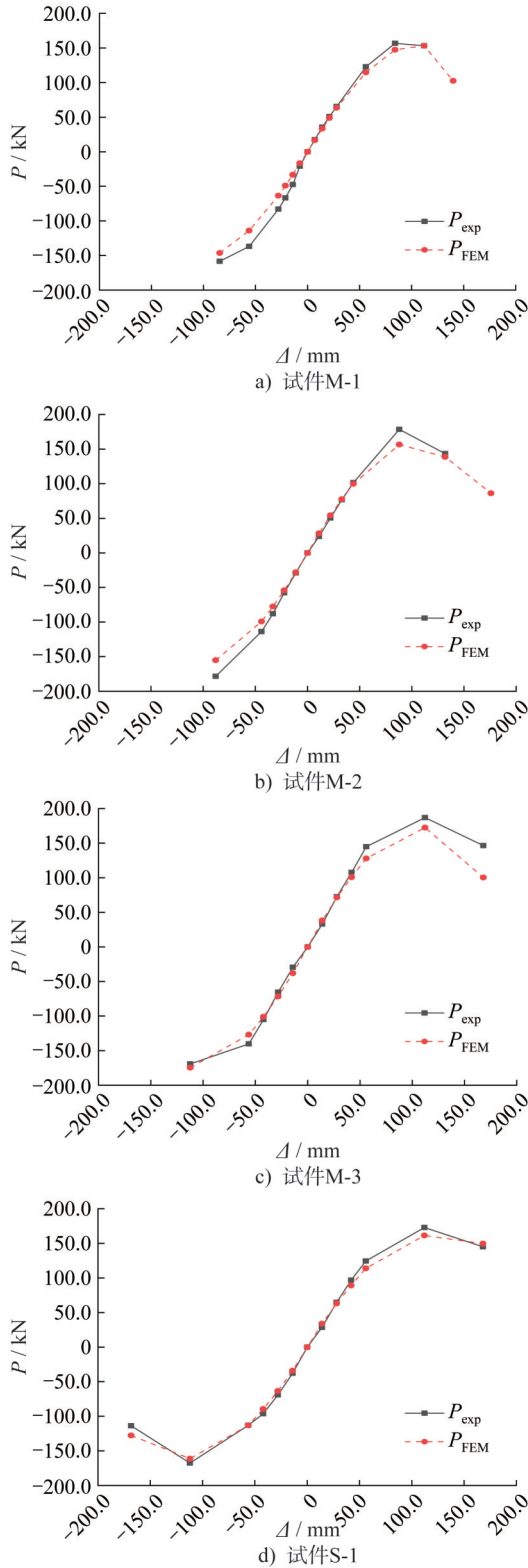


图 10 各试件有限元与试验骨架曲线对比
Fig. 10 Comparison of skeleton curves between FEA and test of specimens

表 4 给出了各试件极限荷载有限元分析与试验结果的对比,其中 $P_{u,exp}$ 和 $P_{u,FEM}$ 分别表示极限荷载试验值与有限元结果, δ_{Pu} 表示有限元计算得到极限荷载与试验值的相对误差。

由表 4 可以发现,四个试件有限元模拟得到的结果均小于试验值,可能是因为实际情况中,钢材在反复荷载作用下屈服强度会有所提高,而有限元分析时并未很好地考虑钢材该特性,使得有限元计算结果偏小。但极限荷载平均误差在 7% 左右,模拟情况较好。

表 4 各试件有限元与试验极限荷载对比
Table 4 Comparison of ultimate loads between FEA and test of specimens

试件编号	$P_{u,exp}/kN$	$P_{u,FEM}/kN$	$\delta_{Pu}/\%$
M-1	172.8	161.2	-6.7
M-2	161.2	154.0	-4.5
M-3	177.5	163.9	-7.7
S-1	190.4	174.2	-8.5

整体而言,有限元分析得到的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线与极限荷载等与试验所得结果均较为吻合,说明有限元模拟方法的准确性。

3.3 参数分析

由于试验试件数量有限,所研究的多钢种混用钢梁腹板高厚比变化范围较小,且翼缘和腹板不同钢种组合对钢梁滞回性能的影响也未能详细考虑,故基于所建立的多钢种混用钢梁有限元模型,研究考虑不同腹板高厚比、不同钢种组合翼缘和腹板时钢梁的滞回性能。表 5 为参数分析各试件尺寸设计,钢梁其余尺寸设计均与试验相同,变量含义同表 1。

表 5 试件尺寸设计
Table 5 Dimension of specimens

腹板强度	翼缘强度	h_w/mm	t_w/mm	h_w/t_w	λ	k
Q355	Q355	340	6	56.7	59.4	0.96
		260	6	43.3		0.73
		200	6	33.3		0.56
		340	8	42.5		0.72
		340	10	34.0		0.57
Q235	Q355, Q420, Q460	410	6	68.3	72.0	0.95
		310	6	51.7		0.72
		240	6	40.0		0.56
		410	8	51.3		0.71
		410	10	41.0		0.57

设计一组同钢种钢梁试件作为对比,三组多钢种钢梁试件,其翼缘分别采用Q355、Q420和Q460钢材,以研究不同强度组合下多钢种钢梁的滞回性能。每种强度组合下共设计5个试件,分别改变其腹板厚度和高度,如同钢种钢梁在腹板高度为340 mm时,改变腹板厚度分别为6 mm、8 mm、10 mm。在厚度为6 mm时,改变腹板高度分别为410 mm、310 mm、240 mm,同时控制部分试件高厚比相同,从而能够更全面研究腹板高厚比对钢梁滞回性能的影响。多钢种钢梁腹板尺寸设计同理,并且控制同钢种钢梁和多钢种钢梁对应试件的腹板厚度以及 k 值基本相同,从而能够研究在腹板高厚比满足相同限值的条件下,多钢种钢梁和同钢种钢梁滞回性能的差异。

耗能能力是评估结构抗震性能的主要指标,一般用荷载-位移曲线所包含的图形面积来衡量,从而定量分析试件的能量耗散能力。如图11所示,本文通过等效黏滞系数 h_e 来评价构件的耗能能力。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABCD}}{S_{\Delta OBE} + S_{\Delta ODF}} \quad (2)$$

各试件均采用梁局部加宽式连接进行加强,且扩翼板和腹板连接件尺寸均按同一标准进行确定。通过有限元计算得到各试件的滞回曲线和骨架曲线,经过处理得到其极限承载力 P_u 、等效黏滞系数 h_e 和延性系数 μ ,

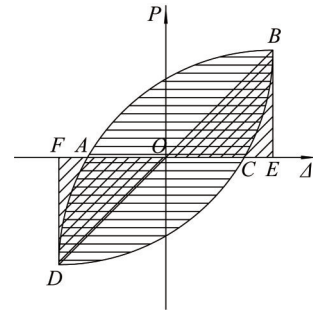


图11 等效黏滞系数计算简图
Fig. 11 Equivalent viscosity coefficient calculation sketch

从而来评价不同参数对钢梁滞回性能的影响。表6给出了同钢种钢梁和多钢种钢梁各试件有限元计算结果, v_{Pu1} 、 v_{he1} 和 $v_{\mu1}$ 分别表示随着腹板高厚比变化,试件极限承载力、等效黏滞系数和延性系数的提高程度, v_{Pu2} 、 v_{he2} 和 $v_{\mu2}$ 分别表示相比同钢种钢梁,多钢种钢梁极限承载力、等效黏滞系数和延性系数的提高程度。

分析腹板高厚比对钢梁滞回性能的影响可以发现:随着腹板高度的减小或腹板厚度的增大,试件的 h_e 和 μ 均有所提高,但整体上看, h_e 提高程度均在16%以内,腹板高厚比对耗能能力的影响较小。如图12为多钢种钢梁腹板和翼缘强度分别为Q235和Q355时,不同腹板尺

表6 参数分析中各试件计算结果

Table 6 Calculation results of all specimens in parameter analysis

腹板强度	翼缘强度	h_w/mm	t_w/mm	P_u/kN	h_e	μ	$v_{Pu1}/\%$	$v_{he1}/\%$	$v_{\mu1}/\%$	$v_{Pu2}/\%$	$v_{he2}/\%$	$v_{\mu2}/\%$
Q355	Q355	340	6	142.6	0.370	3.84	—	—	—	—	—	—
		260	6	102.6	0.409	4.72	-28.1	10.5	22.9	—	—	—
		200	6	73.9	0.429	5.39	-48.2	15.9	40.4	—	—	—
		340	8	160.3	0.395	4.72	12.4	6.8	22.9	—	—	—
		340	10	176.2	0.416	5.55	23.6	12.4	44.5	—	—	—
	Q355	410	6	170.3	0.372	3.78	—	—	—	19.4	0.5	-1.6
		310	6	117.6	0.409	4.67	-30.9	9.9	23.6	14.6	0	-1.1
		240	6	87.2	0.413	4.88	-48.8	11.0	29.3	18.0	-3.7	-9.5
		410	8	190.8	0.406	4.49	12.0	9.1	18.7	19.0	2.8	-4.9
		410	10	204.1	0.424	5.04	19.8	14.0	33.5	15.8	1.9	-9.2
Q235	Q420	410	6	187.9	0.378	3.17	—	—	—	31.8	2.2	-17.4
		310	6	134.6	0.402	3.71	-28.4	6.3	17.2	31.2	-1.7	-21.4
		240	6	98.1	0.426	4.48	-47.8	12.7	41.4	32.7	-0.7	-16.9
		410	8	209.9	0.390	3.69	11.7	3.2	16.7	30.9	-1.3	-21.8
		410	10	224.1	0.418	4.64	19.3	10.6	46.6	27.2	0.5	-16.4
	Q460	410	6	201.7	0.358	2.76	—	—	—	41.4	-3.2	-28.1
		310	6	143.0	0.408	3.60	-29.1	14.0	30.4	39.4	-0.2	-23.7
		240	6	105.0	0.411	3.69	-47.9	14.8	33.6	42.1	-4.2	-31.5
		410	8	223.9	0.406	3.46	11.0	13.4	25.4	39.7	2.8	-26.7
		410	10	239.2	0.407	3.72	18.6	13.7	34.7	35.6	-2.2	-33.0

寸下各试件的骨架曲线图,其中试件编号 S240-6 表示腹板高度为 240 mm、厚度为 6 mm 的试件,其他试件编号同理。

由图 12 和表 6 可以看出:腹板和翼缘强度等级分别为 Q235 和 Q355 时,随着腹板厚度由 6 mm 增大至 10 mm,试件屈服位移几乎不变,但极限状态下的位移有所提高,因此延性系数增大了 33.5%,且极限承载力提高了 19.8%,极限承载力提高程度远小于延性提高程度;腹板高度由 410 mm 减小到 240 mm 时,虽然屈服位移有所提升,但对应极限状态下的位移提升程度更大,因此延性也提高了 29.3%,而极限承载力降低了 48.8%。改变腹板高度对钢梁极限承载力的影响远大于腹板厚度对极限承载力的影响,且不论是减小腹板厚度还是增大腹板高度,在高厚比相同的情况下,试件的延性相差不大。其他翼缘腹板强度组合下多钢种钢梁和多钢种钢梁延性系数与腹板高厚比的关系均类似,说明钢梁的延性主要受腹板高厚比的控制。当对承载力提升要求不高时,可适当增大腹板厚度以提高钢梁滞回性能。

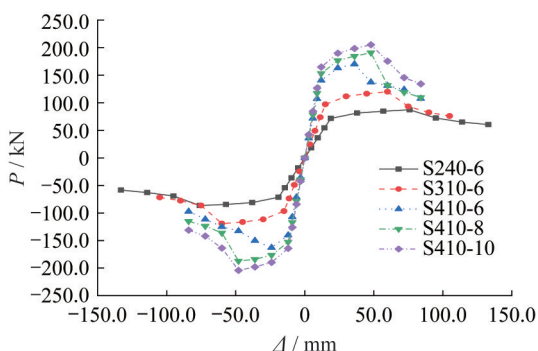


图 12 腹板 Q235 翼缘 Q355 时各试件骨架曲线图

Fig. 12 Skeleton curves of specimens with Q235 web and Q355 flange

分析钢梁滞回性能的差异可以发现:当腹板高厚比满足相同程度限值时,多钢种钢梁腹板强度等级相比同钢种钢梁腹板强度等级低,其截面高度更大,对应极限承载力有所提高;但不同翼缘强度等级下的多钢种钢梁延性均有所降低,耗能能力相差不大。且随着翼缘强度等级的提高,极限承载力提高程度和延性降低程度在不断增大。翼缘强度由 Q355 提高至 Q460 时,极限承载力提高程度由 17.4% 增大至 39.6%,但延性降低程度由 5.26% 增大至 28.6%。对于实际结构中的钢材,强度等级越高,强屈比越小,板件自身变形能力越差。因此作为主要受弯的翼缘采用高等级强度钢材时,试件塑性变形能力有所下降。即同钢种钢梁延性更好,这与试验结果相符。实际结构中,考虑使用多钢种钢梁时,若对钢梁滞回性能要求较高,可适当降低其翼缘强度等级,在提高钢

梁极限承载力的同时,减小延性的降低程度。

4 结论

本文通过试验和有限元分析研究了不同腹板高厚比以及不同钢种组合下钢梁的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线以及延性等性能,得到的结论如下:

(1) 随着多钢种混用钢梁腹板高厚比的增大,钢梁的初始刚度和极限承载力均有所提高,延性系数有所减小,但基于各试件腹板高厚比相差不大,延性降低程度有限。

(2) 相比多钢种混用钢梁,同钢种钢梁到达屈服状态后塑性变形能力更强,对应极限状态下位移稍大,钢梁延性略好。在腹板高厚比满足相同程度限值的条件下,同钢种钢梁延性系数较多钢种钢梁高 9% 左右。

(3) 钢梁的延性和耗能能力受腹板高厚比的影响较大,随着腹板高厚比的减小,钢梁延性和耗能能力均有所提高,且增大腹板厚度对延性系数的提高程度大于极限承载力的提高程度。当对承载力提升要求不高时,可适当增大腹板厚度。

(4) 相比同钢种钢梁,多钢种钢梁翼缘强度等级由 Q355 提升至 Q460 时,其极限承载力提高程度由 17.4% 增大至 39.6%,延性降低程度由 5.26% 增大至 28.6%。当对多钢种钢梁滞回性能要求较高时,其翼缘可适当采用较低强度等级钢材。

参考文献:

- [1] 贾良玖,董洋. 高性能钢在结构工程中的研究和应用进展[J]. 工业建筑, 2016, 46(7): 1-9. DOI: 10.13204/j.gyjz201607001. JIA Liangjiu, DONG Yang. Review on research and application of high-performance steel in structural engineering [J]. Industrial Construction, 2016, 46 (7) : 1-9. DOI: 10.13204/j.gyjz201607001. (in Chinese)
- [2] VELJKOVIC M, JOHANSSON B. Design of hybrid steel girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60 (3/4/5): 535-547. DOI: 10.1016/S0143-974X(03)00128-7.
- [3] EARLS C J. Influence of material effects on structural ductility of compact I-shaped beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126 (11) : 1268-1278. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:11(1268).
- [4] 娄廷会,吴冲. 混合钢梁及其极限承载力研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(6): 841-851. LOU Tinghui, WU Chong. Study of hybrid steel girders and its ultimate bearing capability [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37 (6) : 841-851. (in Chinese)
- [5] 王鹏飞,杨晓明,李海峰. 多钢种混用工字钢梁抗弯极限承载力研究[J]. 青岛理工大学学报, 2012, 33(2): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2012.02.007.

- WANG Pengfei, YANG Xiaoming, LI Haifeng. Study on ultimate bearing capacity of hybrid girder [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2012, 33(2): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2012.02.007. (in Chinese)
- [6] 李清扬, 苗歆雨, 闫冰川, 等. 波纹腹板多钢种混用悬臂梁整体稳定性能研究[J]. 钢结构, 2019, 34(11): 20-25, 32. DOI: 10.13206/j.gjg201911003.
- LI Qingyang, MIAO Xinyu, YAN Bingchuan, et al. Research on the overall stability of cantilever beams with corrugated web and multi-steel mixtures [J]. Steel Construction, 2019, 34 (11) : 20-25, 32. DOI: 10.13206/j.gjg201911003. (in Chinese)
- [7] 舒伟伟, 苏明周, 连鸣. 高强钢组合 Y 型偏心支撑框架滞回性能研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2014, 39(4): 716-723. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2014.04.020.
- SHU Weiwei, SU Mingzhou, LIAN Ming. Analysis on hysteretic behavior of high strength steel Y-type eccentrically braced frame [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(4) : 716-723. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2014.04.020. (in Chinese)
- [8] 李少锋. 偏心支撑钢框架消能梁段板件宽厚比的限值研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- LI Shaofeng. Analysis of web height-thickness ratio on eccentrically braced frames link [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [9] 郭震, 毕于瑞, 夏大明. 多层住宅钢结构节点延性性能分析[J]. 中外建筑, 2003(6): 88-92.
- GUO Zhen, BI Yurui, XIA Daming. Analysis of ductility performance of steel structure nodes in multi story residential buildings [J]. Chinese and Overseas Architecture, 2003(6) : 88-92. (in Chinese)
- [10] 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: 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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for steel structure of tall building: JGJ 99—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 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—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- 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—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [14] 王燕, 王玉田, 郁有升. 扩翼式连接钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(1): 8-14, 64.
- WANG Yan, WANG Yutian, YU Yousheng. Experimental study on seismic performance of steel frames with widened beam flange connections [J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(1): 8-14, 64. (in Chinese)
- [15] 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): 92-98, 105. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.09.0711.
- SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Study on constitutive model of structural steel under cyclic loading [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (9) : 92-98, 105. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.09.0711. (in Chinese)