文章编号:1674-2974

Q500GJ 高强度钢材焊接 H 形柱抗震性能试验研究

李元齐[1†],潘斯勇[1],李丽[2],朱晶[1]
(1. 同济大学 建筑工程系,上海 200092;2. 南京钢铁集团有限公司,南京 210035)

摘 要:为促进 Q500GJ 高强钢材在钢结构工程中的应用,进行了 5 个 Q500GJ 高强钢焊接 H 形截面试件的水平往复加载试验研究,分析了试件的长细比、绕强弱轴加载等因素对试件破坏模式、变形能力、抗震耗能能力的影响. 结果表明,所有试件荷载-位移滞回曲线饱满,滞回性能良好. 骨架曲线正、反向基本对称,走势相似,从弹性变形到屈服点,荷载达最大后,开始下降直至塑性破坏. 试件绕强轴反复荷载,板件局部弹塑性失稳破坏,截面塑性发展不充分,试件绕弱轴反复荷载,全截面进入塑性破坏,试件绕弱轴反复荷载下延性系数要高于绕强轴反复荷载下的延性系数. 试件最大层间位移角为 1/20,最小层间位移角为 1/26,均满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中多、高层钢结构弹塑性位移角 1/50 的限值要求.

关键词:Q500GJ 高强度钢材;反复加载;抗震性能;焊接 H 形柱
中图分类号:TU391 **文献标志码**:A

Experimental Study on Seismic Performance of Q500GJ High-strength Steel Welded H-section Columns

LI Yuanqi[1†], PAN Siyong[1], LI Li[2], ZHU Jing[1]
(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Nanjing Iron and Steel Group Corp, Ltd, Nanjing 210035, China)

Abstract: In order to promote the application of Q500GJ high-strength steel in steel structure engineering, five specimens of Q500GJ high-strength steel welded H-section columns were tested under horizontal reciprocating loading. The effects of slenderness ratio and loading conditions around the strong or weak axis on the failure mode, deformation capacity and seismic energy dissipation capacity of specimens were studied. The results show that the load-displacement hysteretic curves of all specimens are rich and the hysteretic performance is good. The skeleton curves are basically symmetrical in both the right and reverse direction with similar trend . From elastic deformation to yield point, after reaching the maximum load, the skeleton curves begin to decline until the plastic failure. The specimens under cyclic loading around the strong axis fail due to local elastic-plastic instability of the plate, and the plasticity develops insufficiently. While the specimens under cyclic loading around weak axis fail due to the whole section into plasticity. The ductility coefficient of specimens under cyclic loading around weak axis is much higher than that under cyclic loading around strong axis. The maximum and minimum inter-story displacement deflection of the specimens are 1/20 and 1/26, respectively, which meet the limit requirements, i.e., 1/50 of elastic-plastic inter-story displace-

* **收稿日期**:2019-11-27
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703809),National Key R&D Program of China(2017YFC0703809)
作者简介:李元齐(1971—),男,湖北云梦人,同济大学教授,博士
† 通讯联系人,E-mail:liyq@tongji.edu.cn

ment deflection, for multi-story and high-rise steel structures in GB 50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings.

Key words: Q500GJ high strength steel; reciprocating loading; seismic behavior; welded H-section column

相对于普通钢材，钢结构采用高强度钢材具有以下优点:能够减小构件尺寸和结构重量,减少各种涂层的用量和施工工作量；增加建筑物的使用净空间;能够减小板厚,从而减小焊缝厚度,改善焊缝质量,提高结构疲劳使用寿命;能够降低钢材用量,从而大大减少资源消耗. 以上均能够创造良好的经济效益[1-2].

高强度钢材力学性能的变化，必然导致其结构构件承载性能的改变，但国内外钢结构设计规范均没有专门针对高强度钢材钢结构的设计方法和计算理论. 我国 2017 版钢结构设计标准涵盖的最高强度钢材仅为 Q460 钢材，尚不涉及超高强度钢材钢结构. 高强钢相较于普通钢屈服平台长度较短、屈强比较高,难以满足抗震规范要求[3],阻碍了高强钢在抗震结构中的应用[4]. 近年来国内外对高强钢的轴压性能试验做了较多的研究[5-6],但对高强钢的抗震性能的试验研究还很少. 清华大学[7-8]做了 Q460C 高强钢焊接箱形和工字形截面压弯构件水平往复加载试验研究,同济大学[9-18]进行了 Q460、Q460C、Q690D 高强钢焊接截面低周反复加载试验研究及节点试验研究. 目前国内外对 Q500GJ 高强钢柱的抗震性能研究还较少. 本文进行了 5 个 Q500GJ 高强钢焊接 H 形柱在常轴力、水平反复荷载下的试验,研究Q500GJ 高强钢 H 形柱在反复荷载作用下的性能，从承载力、变形和耗能等方面评估 Q500GJ 高强钢柱的抗震性能.

1　试验设计

1.1　试件设计

根据南京钢铁集团公司提供的 2 种钢板厚度(20 mm,32 mm)，设计了 2 种 H 形钢截面，分别为 H250×250×20×20,H300×300×20×32. H250×250×20×20 绕强轴反复推拉设计 1 种长细比的试件,H300×300×20×32 绕强轴反复推拉设计 2 种长细比的试件,绕弱轴反复推拉设计 2 种长细比的试件. 考虑到加工的方便以及试验装置的尺寸，试件的长度稍作调整,全部取整,见表 1.

表 1　截面参数

Tab.1　Section parameters

试件编号	H/mm	B/mm	t_w/mm	t_f/mm	试件长 L/mm	转动轴
YWZHH-45-1	250	250	20	20	1 600	强轴
YWZHH-45-2	300	300	20	32	1 900	强轴
YWZHH-60-2	300	300	20	32	2 600	强轴
YWZHH-60-3	300	300	20	32	1 600	弱轴
YWZHH-90-3	300	300	20	32	2 400	弱轴

试件设计时考虑钢结构设计规范对实腹受压构件不出现局部失稳的板件宽厚比要求，试件截面的宽厚比均满足要求. 其中 h、b、t_w、t_f、H、B 含义见图 1.

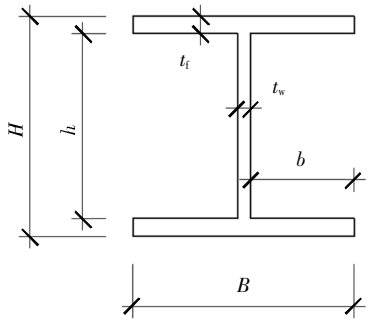


图 1　试件尺寸

Fig.1　Specimen dimension

试件加工中加劲板均采用 Q345B 材质. 焊接 H 形钢本体焊缝、H 形钢与端板焊缝均采用坡口全熔透焊缝,并匹配南京钢铁集团公司推荐的 Q500GJ 等强度的高强焊丝焊接而成. 加劲板与 H 形钢及端板的焊接均采用角焊缝焊接.

1.2　试验装置及支座设计

本试验采用同济大学建筑结构实验室 10 000 kN 大型多功能结构试验机系统进行加载，如图 2 所示.

试验采用悬臂柱模型，柱底部端板采用高强螺栓与底座刚接,柱顶施加水平力和竖向轴力,柱顶采

用销轴连接(如图 3 所示),销轴可自由转动,释放弯矩,满足荷载施加条件.

图 2 大型结构试验机系统

Fig.2 Large-scale structural experiment system

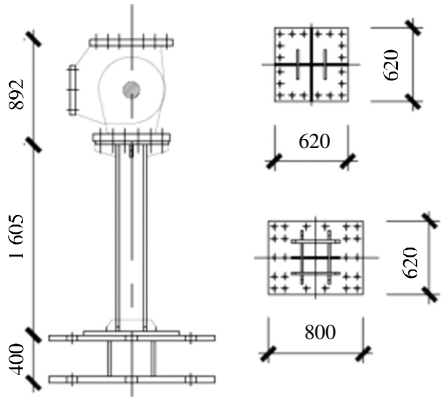


图 3 试件加工图

Fig.3 Factory drawing for specimens

1.3 加载方案

试件安装时将上下支座调平对中, 并使试件的上下端板投影重合. 试件安装完毕后先实施预加载,检查应变仪、位移计等监测设备的运行状况,判定位移计方向. 初始偏心在加载前已测量完毕,预加载阶段不再进行物理对中, 只判断截面应力应变情况是否与初始缺陷情况相符合. 各项准备工作检查无误后进行正式加载.

本试验正式加载时先以荷载控制在柱顶部一次施加轴力到预定值,轴压比统一取 0.4,后保持不变,将所有螺栓全部拧紧; 以位移控制施加反复水平荷载. 加载制度按照规范 ATC-24 中选用,如图 4 所示. 此处 Δ_y 是试件最外边缘开始屈服时的柱顶侧向位移. 在屈服位移范围内,每级循环 2 圈;超过屈服位移加载,每级循环 3 圈.

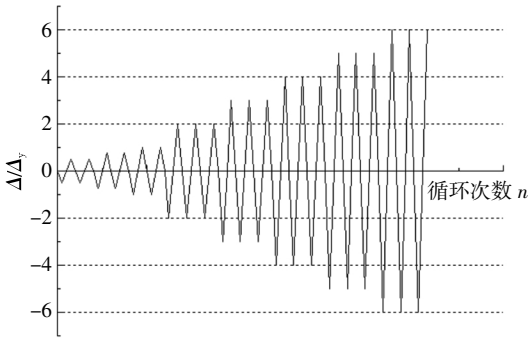


图 4 压弯试件水平位移加载制度

Fig.4 Horizontal displacement loading mechanism of compression bending specimens

1.4 材料性能试验

朱晶[19]根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)[20] 对该 Q500GJ 高强钢材 20 mm 及 32 mm 板进行了材料性能试验,结合南京钢铁集团公司提供的相应板材的材料性能试验数据,得到材料屈服强度 f_y、抗拉强度 f_u、屈强比 f_y/f_u、断后伸长率 δ_5 等结果,见表 2.

表 2 Q500GJ 钢板静力拉伸力学性能参数(综合)

Tab.2 Mechanical properties of Q500GJ steel plate

厚度/mm	试件数量	f_y/MPa	f_u/MPa	f_y/f_u	δ_5/%
20	19	544.72	655.58	0.831	22.35
32	19	538.19	665.41	0.809	23.19

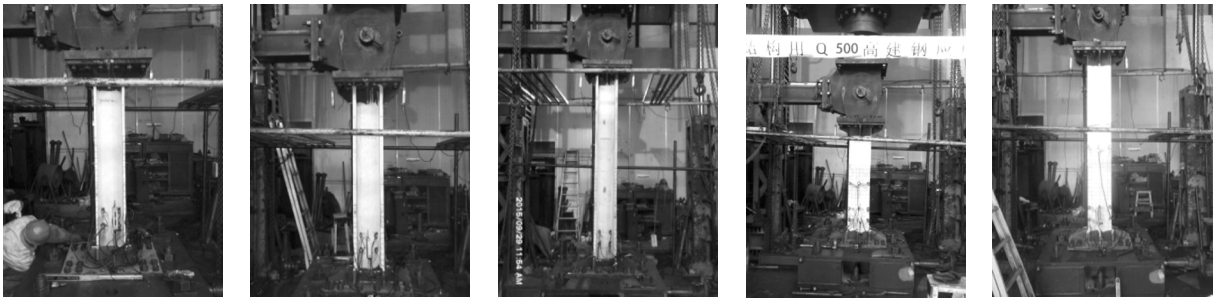
2 试验现象

试验中试件破坏前后形态如图 5 所示. 试件 YWZHH-45-1 加载到 $3\Delta_y$ 时,翼缘出现轻微外鼓. 翼缘局部屈服,构件耗能开始明显,滞回环面积加大. 加载到 $5\Delta_y$ 时,北侧底部翼缘外鼓严重,南侧加劲肋往上 0~500 mm 范围内,翼缘呈蛇形鼓曲,平面外呈 S 形. 试件端部形成塑性铰,水平承载力及刚度降低明显,试件耗能能力达到最大,滞回曲线饱满,停止加载.

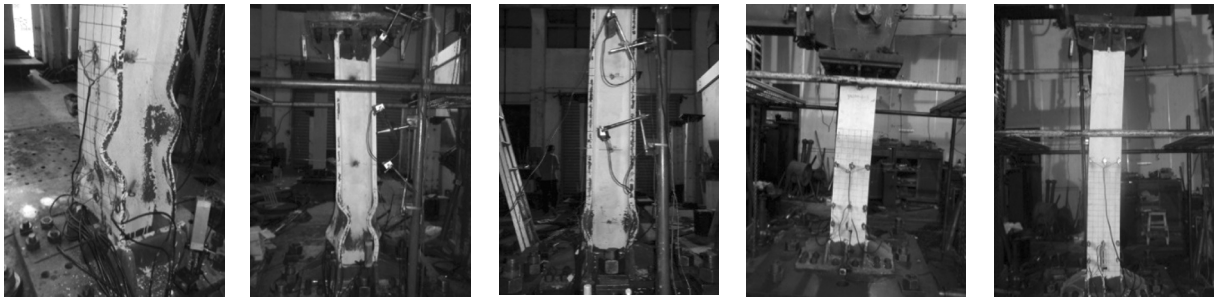
试件 YWZHH-45-2 加载到 $6\Delta_y$ 时,北侧底部翼缘外鼓严重,加劲肋往上 0~500 mm 范围内,翼缘呈蛇形鼓曲, 平面外呈 S 形. 试件端部形成塑性铰,水平承载力及刚度降低明显,试件耗能能力达到最大,滞回曲线饱满,停止加载.

试件 YWZHH-60-2 加载到 $4\Delta_y$ 时,南侧底部 0~250 mm 范围翼缘外鼓严重,试件向南倾,平面外呈反 S 形. 局部屈曲严重, 水平承载力及刚度降低,滞回曲线饱满,停止加载.

试件 YWZHH-90-3 加载到 $6\Delta_y$ 时,除强度及刚



(a1)YWZHH-45-1 破坏前　(b1)YWZHH-45-2 破坏前　(c1)YWZHH-60-2 破坏前　(d1)YWZHH-60-3 破坏前　(e1)YWZHH-90-3 破坏前



(a2)YWZHH-45-1 破坏后　(b2)YWZHH-45-2 破坏后　(c2)YWZHH-60-2 破坏后　(d2)YWZHH-60-3 破坏后　(e2)YWZHH-90-3 破坏后

图 5　试件破坏前后比较

Fig.5　Comparison before and after failure of specimens

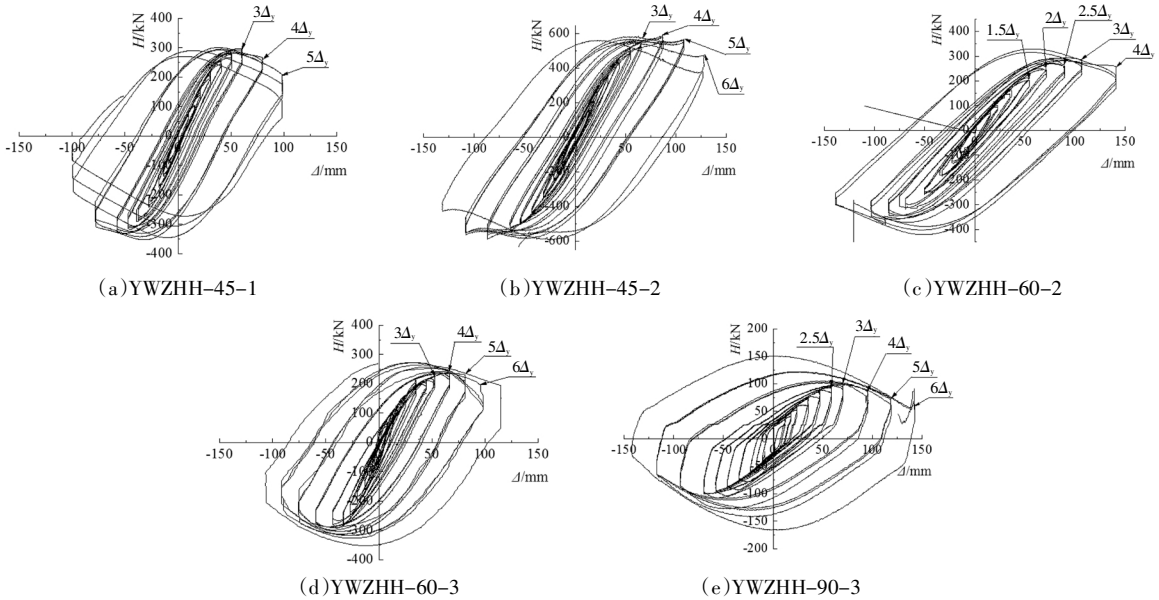
度降低明显外,未出现明显屈曲,试件全截面屈服形成塑性铰. 滞回曲线饱满,停止加载.

3　试验结果分析

3.1　滞回性能

根据试验数据，可得出 H 形截面柱的水平荷载和位移滞回曲线(H-Δ),如图 6 所示.

随着位移幅值增大，试件 YWZHH-45-1、YWZHH-45-2、YWZHH-60-2 底部翼缘均先出现局部屈曲. 该试件均为绕截面强轴滞回加载,随着塑性变形的充分发展,柱底形成塑性铰,试件失去承载能力,试件破坏表现为板件的局部弹塑性失稳破坏,而试件 YWZHH-60-3、YWZHH-90-3 均未出现明显局



(a)YWZHH-45-1　(b)YWZHH-45-2　(c)YWZHH-60-2

(d)YWZHH-60-3　(e)YWZHH-90-3

图 6　试件滞回曲线

Fig.6　Hysteretic curves of specimens

部屈曲,该试件均为绕截面弱轴滞回加载,试件材料进入塑性后,塑性充分发展至全截面塑性破坏,滞回曲线相对更为饱满. 材料的高强度得到充分的发挥. 5 个试件滞回曲线基本对称,各试件曲线较饱满,滞回性能较好.

3.2 骨架曲线

图 7 给出了所有试件的水平荷载–侧移骨架曲线. 所有骨架曲线正、反向基本对称,走势相似,从弹性变形到屈服点,达最大荷载后,开始下降直至塑性破坏. 对同一长细比,如图 8(a)所示,截面越大,试件的刚度越大,峰值荷载越大.

对同一种截面,同时绕强轴(见图 8(b))或同时绕弱轴(见图 8(c))加载时,长细比越小,试件的峰值荷载越大,侧移越小,峰值过后刚度退化越快.

对同一种截面,同一长细比,见图 8(d),绕弱轴刚度大于绕强轴刚度.

3.3 位移延性系数及位移角

延性是衡量材料、构件或结构变形能力的重要参数,是指构件(材料或结构)破坏之前,在承载力无明显降低的条件下,经受塑性变形的能力.本文采用位移延性系数 m 表达构件的延性,计算公式为:$m=\Delta_u/\Delta_y$. 式中,Δ_u 为构件的极限位移,取骨架曲线峰值荷载下降 15%时对应的位移,对应的极限荷载为 H_u;Δ_y 为构件的屈服位移,采用等能量法[21]由骨架曲线计算得到,对应的屈服荷载为 H_y;Δ_m 为骨架曲线峰值荷载时对应的位移,峰值荷载为 H_{max};等能量法的原理如图 9 所示,计算原则如下:通过坐标原点 O 点作 H–Δ 曲线的切线,过最高水平荷载点作一斜线相交于 A 点,使得 OAB 阴影面积与 BCB 阴影面积相等,则 A 点所对应的横、纵坐标即为屈服位移 Δ_y

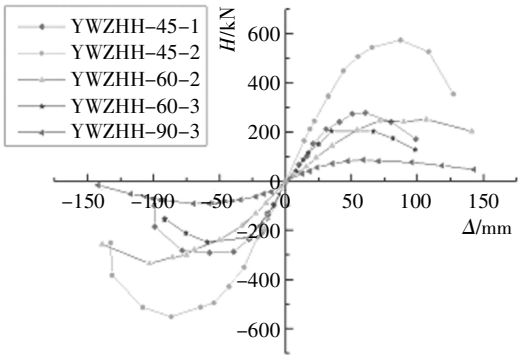
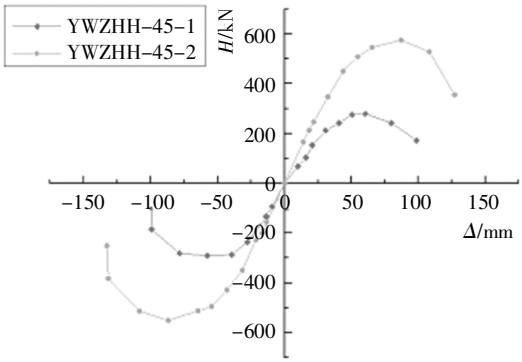
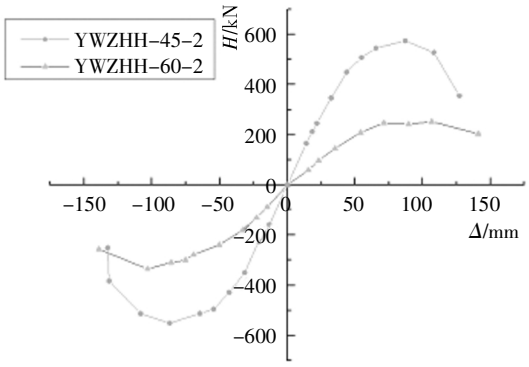


图 7 试件荷载–位移骨架曲线

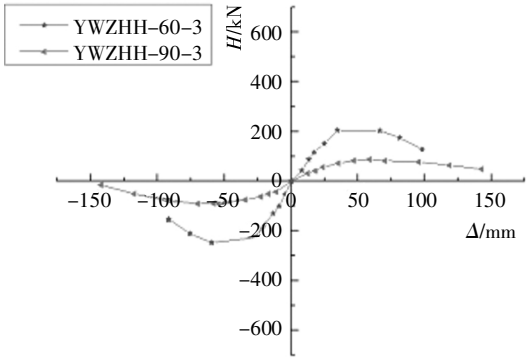
Fig.7 Lateral load vs. displacement curves



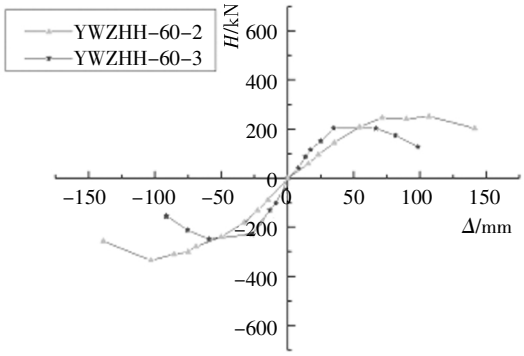
(a)YWZHH–45–1 和 YWZHH–45–2



(b)YWZHH–45–2 和 YWZHH–60–2



(c)YWZHH–60–3 和 YWZHH–90–3



(d)YWZHH–60–2 和 YWZHH–60–3

图 8 骨架曲线对比

Fig.8 Lateral load vs. displacement curves comparison

和屈服荷载 V_y.

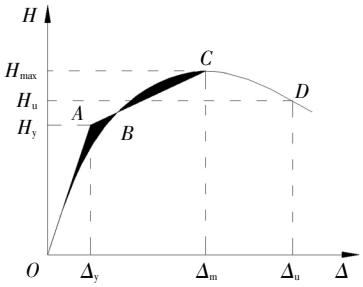


图 9　等能量法

Fig.9　The equal energy method

根据以上计算方法，表 3 给出了各试件的延性系数. 从表中延性数据可看出,试件绕弱轴反复荷载下延性系数要高于绕强轴反复荷载下的延性系数. 这也与前面试件反复荷载下的破坏模式对应起来. 试件 YWZHH-45-1、YWZHH-45-2、YWZHH-60-2 绕截面强轴滞回加载，表现为板件的局部弹塑性失稳破坏,截面的塑性发展不充分;而试件 YWZHH-60-3、YWZHH-90-3 绕截面弱轴滞回加载，均未出现局部屈曲,试件全截面进入塑性后,塑性充分发展至破坏.

表 3　试件延性系数及位移角计算

Tab.3　Calculation of ductility coefficient and inter-story drift ratio of specimens

试件编号	轴向荷载 N/kN	轴压比 n	水平承载力 H/kN	Δ_y/mm	Δ_m/mm	Δ_u/mm	L/mm	m	θ_u/%
YWZHH-45-1	3 141	0.4	294.9	24	56	80	1 912	3.33	4.2
YWZHH-45-2	5 207	0.4	574.7	35	85	112	2 212	3.20	5.1
YWZHH-60-2	5 207	0.4	252.4	48	100	140	2 912	2.92	4.8
YWZHH-60-3	5 207	0.4	224.4	23	54	78	1 912	3.39	4.1
YWZHH-90-3	5 207	0.4	97.3	26	60	106	2 712	4.08	3.8

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)对多、高层钢结构层间位移角的限值要求,试件最大层间位移角 $\theta_u = \Delta_u/L$，计算结果见表 3. 其中计算长度 L 按照销轴中心至柱脚底部加劲肋上部位置计算. 总体来看,5 根构件塑性发展和延性发展充分,具有很好的抗震性能,层间位移角均满足《建筑抗震设计规范》中对多、高层钢结构弹塑性层间位移角大于 1/50 的限值要求. 其中构件最大层间位移角为 5.1%.

3.4　耗能能力

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—1996)[22]计算试件的能量耗散系数 E,其随加载过程的变化如图 10 所示. 可以看出,对于同一个试件,随着水平位移加载幅值的增大,其塑性变形量增大,因此能量耗散系数不断增大.

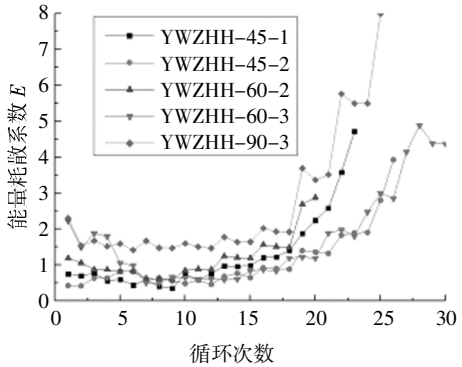


图 10　各试件能量耗散系数 E 与循环次数曲线

Fig.10　Energy dissipation coefficient vs. load cycle number curve

图 11 给出了以水平位移 Δ 为横坐标的各试件能量耗散系数. 相同位移下，试件 YWZHH-90-3、YWZHH-60-3 明显比试件 YWZHH-45-2、YWZHH-60-2 耗能能力强，这也印证了前面绕弱轴滞回比绕强轴滞回延性好的结论. 试件 YWZHH-90-3 与试件 YWZHH-60-3 的耗能能力以及试件 YWZHH-45-2 与试件 YWZHH-60-2 的耗能能力规律不明显,限于本文样本数量较少,不能说明长细比对试件耗能能力影响的规律.

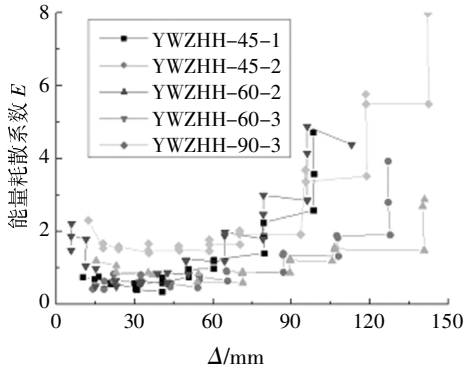


图 11　能量耗散系数与水平位移曲线

Fig.11　Energy dissipation coefficient vs. horizontal displacement curve

3.5　不同等级高强钢构件位移延性对比

本文列举了其他学者关于高强钢抗震性能试验数据，见表 4. 本文 H 形截面延性系数平均值为 3.38,周峰等[14]的 H 形截面延性系数平均值为 3.8,陈

表 4 不同等级高强钢延性对比

Tab.4 Ductility comparison among different grade high strength steels

	试件编号	轴向荷载 N/kN	轴压比 n	水平承载力 H/kN	m	θ_u/%	备注
Q500GJ(本文)	YWZHH-45-1	3141	0.4	294.9	3.33	4.2	H 截面
	YWZHH-45-2	5207	0.4	574.7	3.20	5.1	H 截面
	YWZHH-60-2	5207	0.4	252.4	2.92	4.8	H 截面
	YWZHH-60-3	5207	0.4	224.4	3.39	4.1	H 截面
	YWZHH-90-3	5207	0.4	97.3	4.08	3.8	H 截面
	平均值				3.38	4.4	
Q460(周锋等[14])	H10-n3	690	0.3	293.9	3.42		H 截面
	H10-n5	1150	0.5	298.2	2.86		H 截面
	H12-n3	830	0.3	343.2	5.25		H 截面
	H12-n5	1380	0.5	360.4	3.65		H 截面
	平均值				3.80		
Q460C(施刚等[7])	HH-1	493.1	0.2	120.5		6.4	H 截面
	HH-2	651.4	0.2	256.3		4.3	H 截面
	HH-3	739.7	0.2	298.9		4.3	H 截面
	HH-4	872.2	0.2	346.8		3.6	H 截面
	HH-5	927.4	0.2	424.0		2.9	H 截面
	HH-6	1109.5	0.3	270.5		3.3	H 截面
	平均值					4.13	
Q460C(施刚等[8])	HB-1	1006.8	0.2	274.4	3.32	5.1	箱形截面
	HB-2	1271.8	0.2	440.5	2.50	3.5	箱形截面
	HB-3	1404.3	0.2	546.7	2.43	2.7	箱形截面
	HB-4	1140.8	0.2	421.4	1.56	2.1	箱形截面
	HB-5	2543.6	0.4	358.1	1.94	1.8	箱形截面
	平均值				2.35	3.04	
Q690D(陈素文等[12])	H-1		0.35		3.79	5.81	H 截面
	H-2		0.35		2.84	4.34	H 截面
	B-1		0.35		2.84	4.34	箱形截面
	B-2		0.35		2.84	4.34	箱形截面
	平均值				3.08	4.71	

素文等[12]的 H 形截面、箱形截面延性系数平均值分别为 3.32、2.84,施刚等[8]的箱形截面延性系数平均值为 2.35. 可以看出, 相较于箱形截面,H 形截面的延性更好. 各试验是在不同轴压比、不同长细比下的结果,总体来看,并没有出现强度等级越高,构件的延性系数越低的结论. Q500GJ 试验轴压比为 0.4,轴压比越高, 二阶效应的影响越大,Q500GJ 试件的延性系数及位移角结果处于中上水平,表明 Q500GJ 有较好的抗震性能.

4 结 论

对 5 个 Q500GJ 焊接 H 形钢试件进行了低周反复荷载试验研究,主要结论如下:

1)3 个绕强轴滞回的试件均出现了底部板件局部屈曲,随着位移幅值增大,形成塑形铰直至破坏. 2 个绕弱轴滞回的试件均未出现明显的局部屈曲,随着位移幅值增大, 全截面进入塑性形成塑形铰直至破坏. 材料的高强度得到充分的发挥. 绕弱轴荷载的试件截面的塑性发展比绕强轴荷载更充分.

2)所有试件荷载-位移滞回曲线饱满,滞回性能良好. 骨架曲线正、反向基本对称,走势相似. 试件具有良好的变形能力、耗能能力及抗震性能.

3)试件绕弱轴反复荷载下延性系数要高于绕强轴反复荷载下的延性系数. 试件最大层间位移角为 1/20,最小层间位移角为 1/26,均满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中多、高层钢结构弹塑性位移角 1/50 的限值要求.

参考文献

[1] 施刚,班慧勇,石永久,等. 高强度钢材钢结构的工程应用及研究进展[J]. 工业建筑,2012,42(1):1—7.
SHI G,BAN H Y,SHI Y J,*et al*. Engineering application and recent research progress on high strength steel structures [J]. Industrial Construction,2012,42(1):1—7. (In Chinese)

[2] 施刚,班慧勇,石永久,等. 高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学,2013,30(1):1—13.
SHI G,BAN H Y,SHI Y J,*et al*. Overview of research progress for high strength steel structures [J]. Engineering Mechanics,2013,30(1):1—13. (In Chinese)

[3] 罗永峰,王熹宇,强旭红,等. 高强钢在工程结构中的应用进展[J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版),2015,48(S):134—141.
LUO Y F,WANG X Y,QIANG X H,*et al*. Progress in application of high strength steel to engineering structures [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2015,48(S):134—141. (In Chinese)

[4] 李国强,王彦博,陈素文,等. 高强度结构钢研究现状及其在抗震设防区应用问题[J]. 建筑结构学报,2013,34(1):1—13.
LI G Q,WANG Y B,CHEN S W,*et al*. State-of-the-art on research of high strength structural steels and key issues of using high strength steels in seismic structures [J]. Journal of Building Structures,2013,34(1):1—13. (In Chinese)

[5] IABSE. Use and application of high-performance steels for steel structures[M]. Zurich:IABSE,2005.

[6] POCOCK G. High strength steel use in Australia,Japan and the US [J]. The Structural Engineer,2006,84(21):27—30.

[7] 施刚,邓椿森,班慧勇,等. Q460 高强度钢材工形压弯构件抗震滞回性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(9):53—61.
SHI G,DENG C S,BAN H Y,*et al*. Experimental study on the seismic behavior of Q460 high strength steel I-columns [J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(9):53—61. (In Chinese)

[8] 施刚,邓椿森,班慧勇,等. 高强度钢材箱形柱滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(3):1—7.
SHI G,DENG C S,BAN H Y,*et al*. Experimental study on the seismic behavior of Q460 high strength steel I-columns [J]. Journal of Building Structures,2012,33(3):1—7. (In Chinese)

[9] 王彦博. Q460 高强钢焊接截面柱极限承载力试验与理论研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2012:60—118.
WANG Y B.Experimental and theoretical study on the ultimate strength of welded Q460 high strength steel columns [D].Shanghai: College of Civil Engineering,Tongji University,2012:60—118. (In Chinese)

[10] 孙飞飞,谢黎明,崔嵬,等. Q460 高强钢单调与反复加载性能试验研究进展[J].建筑结构学报,2013,34(1):30—35.
SUN F F,XIE L M,CUI W,*et al*. Experimental study on material properties of Q460 high strength steel under monotonic and cyclic loading [J]. Journal of Building Structures,2013,34(1):30—35. (In Chinese)

[11] 孙飞飞,孙密,李国强,等. Q690 高强钢端板连接梁柱节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(4):116—124.
SUN F F,SUN M,LI G Q,*et al*. Experimental study on seismic behavior of high-strength steel beam-to-column end-plate connections [J]. Journal of Building Structures,2014,35(4):116—124. (In Chinese)

[12] 陈素文,陆志立,李国强,等. Q690D 高强钢焊接截面柱低周反复加载试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(12):97—103.
CHEN S W,LU Z L,LI G Q,*et al*. Cyclic loading tests of Q690D high strength steel welded columns [J].Journal of Building Structures,2014,35(12):97—103.(In Chinese)

[13] 陈素文,陆志立,陈星,等. Q690D 高强钢箱形截面柱的滞回性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(8):1135—1143.
CHEN S W,LU Z L,CHEN X,*et al*. Hysteretic behavior of Q690D high strength steel box-section beam columns [J].Journal of Tongji University (Natural Science),2015,43(8):1135—1143.(In Chinese)

[14] 周锋,陈以一,童乐为,等. 高强度钢材焊接 H 形构件受力性能的试验研究[J]. 工业建筑,2012,42(1):32—36.
ZHOU F,CHEN Y Y,TONG L W,*et al*. Experimental investigation on mechanical behavior of high strength steel welded H-section members [J]. Industrial Construction, 2012, 42(1): 32—36. (In Chinese)

[15] 李国强,王彦博,陈素文,等. Q460C 高强度结构钢焊接 H 形和箱形截面柱低周反复加载试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(3):80—86.
LI G Q,WANG Y B,CHEN S W,*et al*. Experimental study of Q460C high strength steel welded H-section and box-section columns under cyclic loading [J].Journal of Building Structures, 2013,34(3):80—86.(In Chinese)

[16] 李国强,王彦博,陈素文,等. Q460C 高强度钢柱滞回性能有限元分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(3):87—92.
LI G Q,WANG Y B,CHEN S W,*et al*. Finite element analysis on hysteretic behavior of Q460C high strength steel box-section and H-section columns [J].Journal of Building Structures,2013,34(3):87—92.(In Chinese)

[17] 强旭红,武念铎,罗永峰,等. 高强钢外伸式端板节点性能试验与有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(7):1—9.
QIANG X H,WU N D,LUO Y F,*et al*. Experimental and numerical analysis on high strength steel extended endplate connections [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(7):1—9.(In Chinese)

[18] 强旭红,毋凯冬,姜旭,等. 高强钢 S460 高温力学性能研究与抗火设计建议 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版),2018,45(11):37—45.
QIANG X H,WU K D,JIANG X,*et al*. Study on mechanical properties of high strength steel S460 at elevated temperatures and fire-resistance design recommendations [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(11):37—45.(In Chinese)

[19] 朱晶. 建筑结构用高性能 Q500GJ 材料性能研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2016:17—28.
ZHU J.Research on material properties of high-performance steel Q500GJ for building structures [D]. Shanghai:College of Civil Engineering,Tongji University,2016:17—28. (In Chinese)

[20] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].北京:中国标准出版社,2011:1—25.
GB/T 228.1—2010 Metalic materials—tensile testing part1 method of test at room temperature [S].Beijing:Standards Press of China, 2011:1—25. (In Chinese)

[21] 温东辉. 冷弯厚壁钢管压弯构件抗震性能研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2016:67—68.
WEN D H. Research on seismic behavior of cold-formed thick-walled steel columns [D]. Shanghai:College of Civil Engineering, Tongji University,2016:67—68. (In Chinese)

[22] JGJ 101—1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:9—15.
JGJ 101—1996 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 1997:9—15. (In Chinese)