DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.003

端部"王"字形H型屈曲约束支撑的力学性能研究

石文龙[1], 谢春游[1], 马佳文[2], 马立光[3]

(1. 上海大学 力学与工程科学学院,上海 200444; 2. 上海史狄尔建筑减震科技有限公司,上海 200082;
3. 中国建筑东北设计研究院有限公司,辽宁 沈阳 110004)

摘要: 提出了一种H型屈曲约束支撑(H-shaped Buckling Restrained Brace, HBRB),为避免芯材焊接的影响以及便于工程连接,芯材采用热轧H型钢,端部采用"王"字形加强段。设计了四根试验件,三根长度不一的热轧型HBRB和一根以焊接H型钢为芯材的焊接型HBRB,通过拟静力加载试验,研究焊接对HBRB力学性能的影响。试验结果表明:端部"王"字形HBRB的滞回曲线饱满,具有良好的塑性变形能力;芯材采用热轧型钢的热轧型HBRB疲劳性能更佳,耗能性能更加优异,累计塑性延性系数远高于焊接型HBRB;热轧型HBRB拉压平衡系数较于焊接型HBRB更小,均在1.1以下。外套筒端部封头板在试验中有外翻迹象,可以通过提高封头板强度减弱此类现象。

关键词: H型屈曲约束支撑; 热轧H型钢; 拟静力加载试验; 力学性能

中图分类号: TU352.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0495-07

Research on mechanical performance of H-shaped buckling restrained brace

SHI Wenlong[1], *XIE Chunyou*[1], *MA Jiawen*[2], *MA Liguang*[3]

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Steel Building Damping Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 3. China Northeast Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract: A type of H-shaped Buckling Restrained Brace (HBRB) is proposed. In order to avoid the effect of core welding and to facilitate the engineering connection, hot-rolled H-beam is used as the core material, and the end is reinforced by a "王" shaped reinforcement section. Four test pieces are fabricated, including three hot-rolled HBRBs with different lengths and one welded HBRB adopting welded H-section steel as the core. Quasi-static cyclic loading tests are carried out to investigate the welding effect on the mechanical performance of HBRBs. The test results show that: the hysteresis curve of the HBRB with a "王"-shaped end is full, indicating good plastic deformation capacity; the hot-rolled HBRB, which uses hot-rolled steel as the core material, exhibits better fatigue performance and more excellent energy dissipation capacity, with a cumulative plastic ductility coefficient much higher than that of the welded HBRB; the tension-compression balance coefficient of the hot-rolled HBRB is smaller than that of the welded HBRB, both below 1.1. The head plate at the end of the outer sleeve shows signs of outward flanging in the test, and such phenomenon can be mitigated by increasing the strength of the head plate.

Key words: H-shaped buckling restrained brace; hot-rolled H-shaped steel; pseudo-static loading test; mechanical property

屈曲约束支撑(Buckling Restrained Brace, BRB)是一种利用金属轴向变形耗散能量的金属阻尼器。目前建筑用BRB常见截面形式主要为一字形、十字形和H形,且十字形和H形截面多为由三块钢板焊接而成。

焊接无论是在建筑结构中还是在金属阻尼器中都十分常见,但焊接也会产生很多不利影响。Murase等[2]通过对十字形截面BRB进行试验和模拟发现焊接变形容易引入较大的初始缺陷,Narihara等[3]在BRB试验研究中发现内芯焊接会对

收稿日期: 2024-11-07 **修回日期**: 2025-12-08
基金项目:国家自然科学基金(52578219)
第一作者:石文龙(1975—),男,博士,副教授,主要从事结构减震、工程振动等领域研究。 E-mail:13801860250@163.com
通信作者:谢春游(2000—),男,硕士生,主要从事结构减震领域研究。E-mail:1058847414@qq.com

其低周疲劳性能产生不利影响从而导致内芯过早发生低周疲劳断裂,赵俊贤等[4-6]为降低芯材焊接对力学性能的影响,只对端部进行了焊接,发现大大提高了BRB的疲劳性能,Newell等[7]设计对比了无焊和有焊十字内芯BRB,发现有焊十字内芯BRB的低周疲劳性能会更低,黄波等[8]对Q235钢BRB进行试验发现屈服段内焊缝对其疲劳性能影响显著,与焊缝形状、引起的缺陷以及残余应力等因素有关,吴京等[9]通过对角钢拼接BRB进行试验发现角钢拼接的无焊BRB疲劳性能要明显高于十字铸造BRB,李伟[10-11]对H形芯材BRB进行低周往复试验,发现焊接处焊缝强度大于母材且截面积会增大,郭立行等[12-13]采用铸造工艺铸造十字内芯BRB,发现虽然能够有效避免残余应力和残余变形,但是因为该铸造工艺没有热轧环节和铸造材料的影响,其疲劳性能并无优势,王永贵等[14]通过对端部加强型和切削型BRB的研究,发现端部加强型从造价和节约资源更有优势,但关键在于焊接的质量。黄卿[15]为了避免焊接对BRB疲劳性能产生影响,提出一种无焊组装式的BRB,并通过试验研究表明,无焊组装式由于避免了核心单元的焊接,疲劳性能显著提高。

现学者对于屈曲约束支撑耗能段芯材焊接研究多为十字形截面,对于H形截面屈曲约束支撑焊接研究多为端部焊接,耗能段芯材较少。端部连接形式多为将加劲肋焊接于一块腹板上或将加劲肋两端分别焊接于两边腹板上用于端部加强。此种端部加强形式不便于H形截面BRB与结构间的连接[16-17]。

热轧H型钢作为一种新型的建筑材料,工艺与焊接H型钢有差异,由热轧工艺一次性轧制而成,残余应力更小;其精度比焊接H型钢高一个数量级;较于焊接H型钢,其具有标准化和规范化的优点[18]。

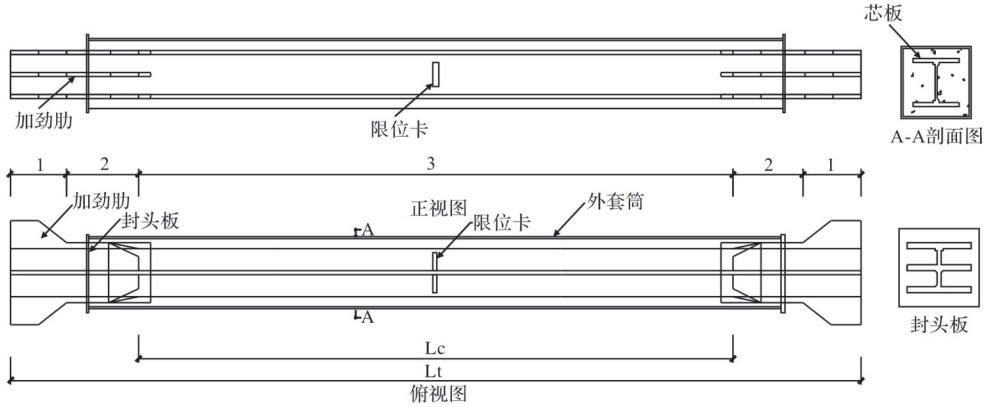
针对以上不足,以及结合热轧H型钢的优势,本文设计了以热轧H型钢作为耗能芯材的热轧型HBRB,避免于芯材处进行施焊。为便于HBRB的连接,端部形式采用“王”字形,并以以焊接H型钢作为芯材的焊接型HBRB作为对比试件,进行低周往复加载试验,一方面考察端部“王”字形HBRB的滞回性能、疲劳性能和耗能性能等,另一方面考察HBRB芯材焊接对其力学性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文提出的端部“王”字形HBRB,其耗能单元采用热轧H型钢,型号为Q235,约束单元采用外包钢管混凝土型,采用Q235钢和C40混凝土,芯材表面覆有2 mm防水卷材,将芯板与混凝土隔离,用以减小核心单元在受到轴向力后发生屈曲变形时与约束单元的摩擦。内核单元中间设置限位卡,用以防止内核单元与约束单元之间发生相对错动。

综合考虑试验室条件以及试验目的,本试验设计并制作了3根分别长为1、1.5、1.8 m的热轧型HBRB试件(用A-1,A-2,A-3表示)和1根1.8 m长的焊接型HBRB试件(用B-1表示),焊接型HBRB试件芯材由三块焊接型钢焊接成H形,焊条型号为E43型。二者均采用填充混凝土的矩形钢管作为约束构件,均采用H形截面芯材(100 mm×100 mm×6 mm×8 mm)和相同的约束套筒(150 mm×150 mm×4 mm)。试件大样图如图1所示,试件参数如表1所示。



1-连接段; 2-外伸段; 3-耗能段; Lc-耗能段长度; Lt-试件总长

图1 试验件纵向构成图

Fig. 1 Longitudinal configuration of test piece

1.2 试验设备

该试验在上海史狄尔建筑减震科技有限公司试验室进行,试验加载装置为伺服直线作动器,试验系统为PWS-1200大型多功能结构试验系统. 试验机长

表 1　试件参数

Tab. 1　Specimen parameters

试件编号	截面形式	截面尺寸	屈服荷载/kN	L_c/mm	L_t/mm
A-1	热轧 H 型钢	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	634	640	1 000
A-2	热轧 H 型钢	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	634	1 040	1 500
A-3	热轧 H 型钢	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	634	1 260	1 800
B-1	焊接 H 型钢	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	634	1 260	1 800

度为 3.5 m，宽度为 1.5 m，最大加载力为 1 200 kN。试验装置和试件安装详图如图 2～图 3 所示。

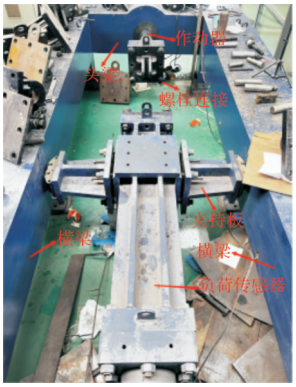


图 2　试验装置

Fig. 2　Test setup

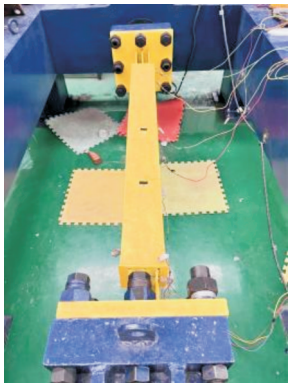


图 3　安装详图

Fig. 3　Installation details

1.3　材性试验分析

试件材性试验按照现行国家标准《金属材料室温拉伸试验方法》的相关规定[19]进行，材性试验试件从同一批次试件母材上切割，分别对 H 型钢的翼缘和腹板进行材性试验，材性试件尺寸如图 4 所示，厚度分别为 6 mm（腹板）和 8 mm（翼缘），引伸计标距为 20 mm，试验装置、安装详图及材性试件如图 5 所示，最终钢材的性能指标如表 2 所示。

由表 2 可知，A 类试件和 B 类试件所用 Q235 钢伸长率均在 30% 以上，满足《建筑消能阻尼器》（JG/T 209—2012）中对屈曲约束支撑核心单元伸长率在 25% 的规定。

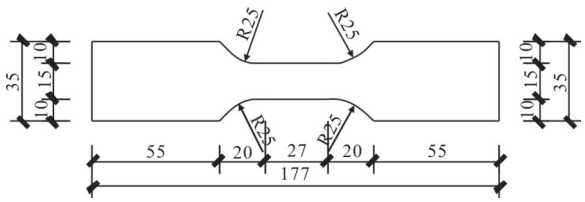


图 4　材性试件尺寸图

Fig. 4　Dimensions of material property specimens



(a) 试验装置



(b) 安装详图



(c) 翼缘(试验前)



(d) 腹板(试验前)



(e) 翼缘(试验后)



(f) 腹板(试验后)

图 5　试验装置、安装详图及试件试验前后图

Fig. 5　Test setup, installation details and test specimen before and after testing

1.4　加载方案

采用拟静力低周往复位移加载。加载制度参照我国《建筑消能阻尼器》（JG/T 209—2012）中屈曲约束支撑力学性能试验方法[20]，依次在 1/300、1/200、1/150、1/100 阻尼器长度（L）下拉伸和压缩往复加载各 3 次。继而在 1/150 阻尼器长度下

表 2　钢材的性能

Tab. 2　Properties of steel

钢材种类		试件编号	弹性模量 E/Mpa	屈服强度 f_y/Mpa	极限强度 f_u/Mpa	伸长率 A/%
Q235	A	翼缘（8 mm）	2.08×10^5	281	422	37.0
		腹板（6 mm）	2.05×10^5	274	429	37.2
	B	翼缘（8 mm）	2.01×10^5	265	413	34
		腹板（6 mm）	1.95×10^5	269	411	35.5

循环30圈用以测试试件疲劳性能。若试件未破坏，则在1/100阻尼器长度下循环20圈，后续每次在原加载基础长度上增加2 mm循环20圈的加载制度直至断裂为止。加载速率为0.1 mm/s。位移加载制度如图6所示：

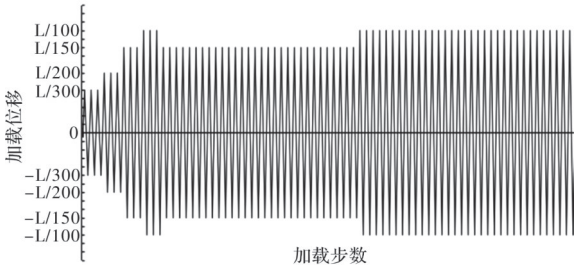


图6 加载制度

Fig. 6 Loading regime

2 试验过程分析

2.1 试验现象

如图7所示，试件完成试验后外套筒无明显变化，未出现膨胀以及弯曲的现象；外伸连接段无弯曲失稳现象；约束单元内部混凝土于试验过程中被压碎，且有少许混凝土碎块从封头板缝隙处被带出；试件的封头板因其强度不足而有明显向外翻的迹象，随着加载幅值的增加外翻现象愈发明显。所有的试件均为受拉破坏。试件具体加载情况如表3所示。

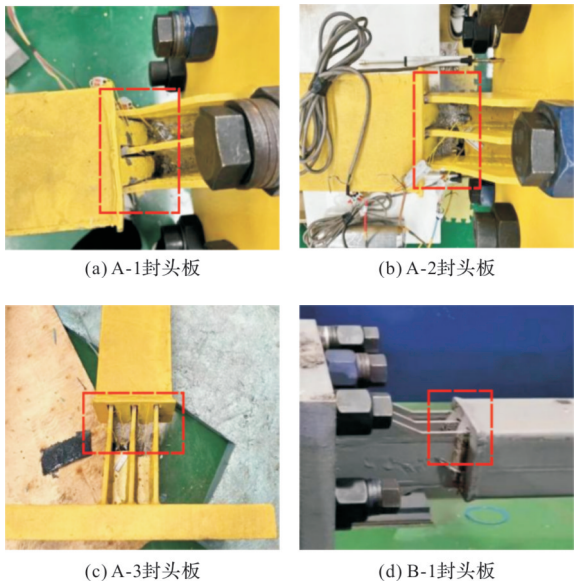


图7 试验现象

Fig. 7 Experimental phenomenon

2.2 破坏原因分析

为研究试件破坏核心区域破坏情况，对长度为1.8 m的两根试件约束单元进行剖切，观察试件破坏情况。如图8～图9所示。

由图8～图9可知，试件A-3和试件B-1的破坏位置均发生在端部变截面处。由于芯材耗能段和过渡段截面面积的变化，试件在试验过程中产生应力集中现象，进而导致试件断裂均发生在变截面处。

表3 加载情况

Tab. 3 Loading conditions

加载步	加载幅值	试件加载圈数				说明
		A-1	A-2	A-3	B-1	
1	L/300	3	3	3	3	
2	L/200	3	3	3	3	基本力学
3	L/150	3	3	3	3	性能测试
4	L/100	3	3	3	3	
5	L/150	30	30	30	30	
6	L/100	20	20	20	20	疲劳性能
7	L/100+2	20	19	20	2	测试
8	L/100+4	1	—	1	—	



图8 A-3断裂位置

Fig. 8 Fracture location A-3



图9 B-1断裂位置

Fig. 9 Fracture location of specimen B-1

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

长度为1、1.5、1.8 m的热轧型HBRB和长度为1.8 m焊接型HBRB的滞回曲线分为变幅加载滞回曲线和疲劳加载滞回曲线。试件的滞回曲线如图10所示。

由滞回曲线可知：

(1)以上四根试件滞回曲线均较为饱满，其强度刚度无明显退化现象，拉压基本对称。

(2)对比A-1、A-2、A-3可知，由于耗能芯材均为热轧H型钢且耗能段截面面积相同，滞回环圈数差异并不大，仅由于耗能段长度的不同致单个循环所耗散的能量存在差异，说明HBRB可以做到小型化。

(3)对比A-3和B-1，A-3的疲劳性能更加优越。在相同的加载制度下，焊接型HBRB与热轧型HBRB相比断裂前少进行了20个拉压循环。因此

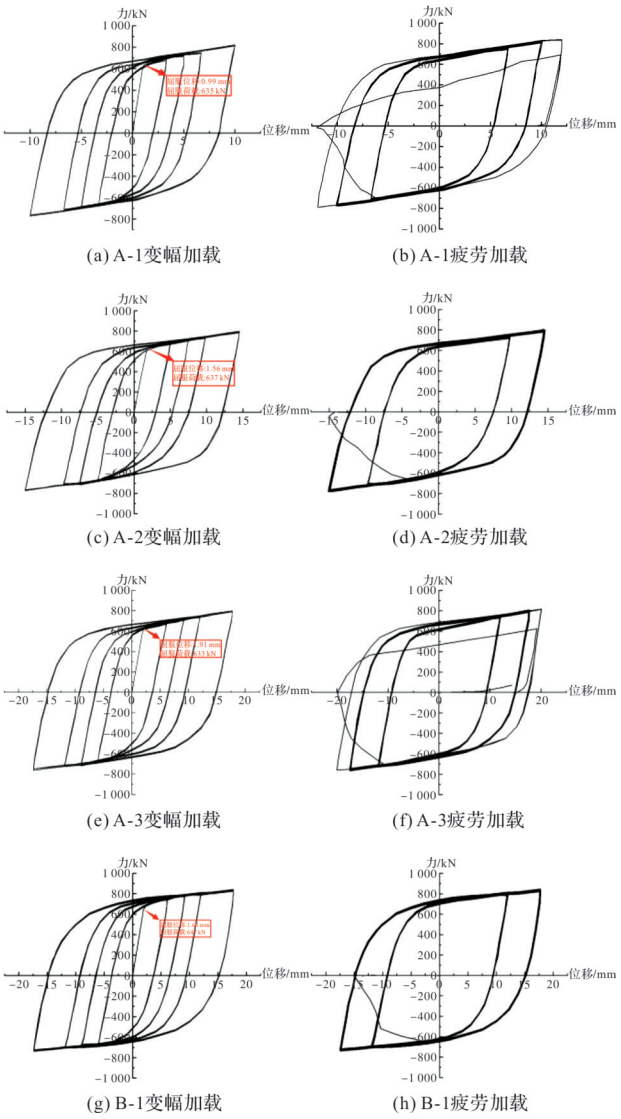


图 10　滞回曲线

Fig. 10　Hysteresis curves

也说明用热轧 H 型钢作为芯材代替焊接 H 型钢能大大提升 HBRB 的疲劳性能。

3.2　累计塑性延性系数

累计塑性延性系数 CPD 是衡量 HBRB 塑性变形能力的一个重要指标，计算公式见(1)：

$$CPD=\sum[2(|\delta_{\mathrm{tmax}}|_j+|\delta_{\mathrm{cmax}}|_j)/\delta_y-4] \quad (1)$$

式中：$|\delta_{\mathrm{tmax}}|_j$ 为第 j 个滞回圈最大受拉位移的绝对值；$|\delta_{\mathrm{cmax}}|_j$ 为第 j 个滞回圈最大受压位移的绝对值；δ_y 为试件屈服位移理论值。

根据上式分别计算累计塑性延性系数，如表 4 所示由表 4 可知，HBRB 的累计塑性延性系数均在 2 100 以上，远大于美国 AISC 规范中的 200 的限值，塑性变形能力优异。对于长度不同的热轧型 HBRB 中试件 A-1、A-2、A-3 的累计塑性延性系数相差在 8% 以内，说明芯材长度对热轧型 HBRB 累计塑性延性系数的影响不大，而相同长度下试件 A-3 的 CPD 为 3 215，试件 B-2 的 CPD 为 2 178，A-3 的 CPD 比 B-1 高 47.6%，说明热轧型 HBRB 的累计塑性变形能力要远大于焊接型 HBRB。

表 4　累计塑性延性系数

Tab. 4　Cumulative plastic ductility coefficient

试件编号	A-1	A-2	A-3	B-1
累计延性系数	3 345	3 103	3 215	2 178

3.3　骨架曲线

通过上述的滞回曲线可分别得到 A-1、A-2、A-3 和 B-1 的骨架曲线，如图 11 所示。

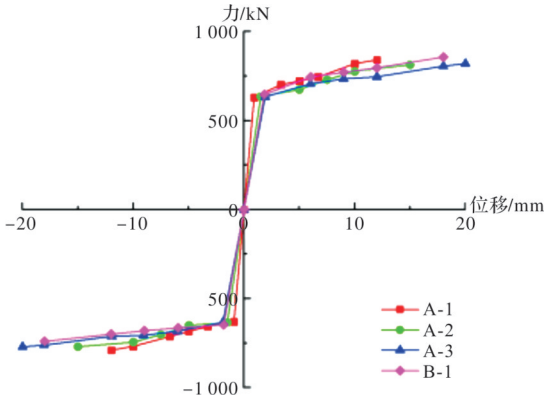


图 11　骨架曲线

Fig. 11　Skeleton curves

由骨架曲线可知：HBRB 的骨架曲线有明显的屈服拐点，随着加载位移的递增，其力呈现不断增大的趋势；恢复力呈明显双线性特征。由于内部填充的无粘结材料减小了芯材与套筒间的摩擦作用，芯材在屈服后同位移下的拉力与压力相差不大。

3.4　拉压不平衡系数

拉压不平衡系数是由于试件芯材在受压的过程中会发生多波屈曲而挤压约束构件，并与之产生相对滑移而产生的摩擦力，为了降低摩擦通常在两者间填充无粘结材料，但依旧是不可避免的。拉压不平衡公式见式(2)：

$$\beta=\frac{C_{\max}}{T_{\max}} \quad (2)$$

式中：β 为拉压不平衡系数；$C_{\max}$ 为试件在第 i 个滞回圈内压力最大值；$T_{\max}$ 为试件在第 i 个滞回圈内拉力最大值。

根据公式(2)得出各试件在不同加载制度下的拉压不平衡系数如表 5 所示：

由上表可知，热轧型 HBRB 和焊接型 HBRB 的拉压不平衡系数均未超过 1.2，表现出良好的拉压对称性。热轧型 HBRB 的拉压不平衡系数均未超过 1.1，略优于焊接型 HBRB，其主要原因在于焊接存在一定的残余应力，在此试件中因焊接产生一定

的压应力,而导致该试件B-1的拉压平衡系数更大。

表5 各试件拉压不平衡系数

Tab. 5 Tension-compression unbalance coefficients of each specimen

加载幅值	试件编号			
	A-1	A-2	A-3	B-1
$L/300$	1.046	1.039	1.015	1.167
$L/200$	1.054	1.040	1.016	1.179
$L/150$	1.035	1.042	1.011	1.176
$L/100$	1.058	1.053	1.025	1.170
$L/100+2$	1.043	1.067	1.028	1.172
$L/100+4$	1.035	——	1.031	——

3.5 耗能系数和耗能比

作为一种拉压型的金属屈服阻尼器,其耗能能力是评价优劣性的重要力学指标,结合图12进行分析,两者的计算公式如式(3)和式(4)所示:

耗能系数:

$$\varphi=\frac{S_{ABCD}}{S_{OAF}+S_{OCE}} \tag{3}$$

式中:S_{ABCD}为图12中所示滞回圈ABCD的面积;S_{OAF}为图12中所示三角形OAF的面积;S_{OCE}为图12中所示三角形OCE的面积。

耗能比:

$$\phi=\frac{S_{ABCD}}{S_{AGCH}} \tag{4}$$

式中:S_{AGCH}为图12中所示矩形AGCH的面积。

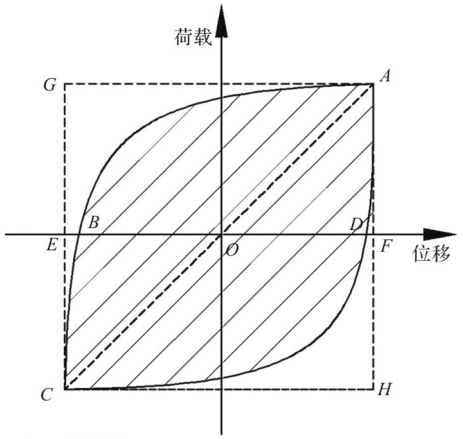


图12 耗能系数和耗能比计算参考

Fig. 12 Reference for calculation of energy consumption coefficient and energy consumption ratio

经计算耗能系数和耗能比如表6所示:

由表6可知,各试件的耗能系数均在2.5~3.2之间,随着加载幅值的增大,耗能系数和耗能比呈逐渐递增的趋势,耗能性能良好且稳定。对比A-1、A-2、A-3,不同长度下热轧型HBRB耗能系数和耗能比相差不大,均具有良好的耗能性能。对比A-3和B-1,热轧型HBRB的耗能系数和耗能比均略微优于焊接型HBRB。

表6 耗能系数和耗能比

Tab. 6 Energy consumption coefficient and energy consumption ratio

加载幅值	试件编号							
	A-1		A-2		A-3		B-1	
	φ	ϕ	φ	ϕ	φ	ϕ	φ	ϕ
$L/300$	2.51	0.63	2.52	0.64	2.52	0.64	2.50	0.62
$L/200$	2.84	0.71	2.88	0.72	2.88	0.72	2.82	0.69
$L/150$	3	0.74	3.08	0.74	3.06	0.75	2.98	0.73
$L/100$	3.07	0.76	3.08	0.77	3.08	0.77	3.04	0.76
$L/100+2$	3.11	0.77	3.12	0.78	3.15	0.82	3.1	0.78
$L/100+4$	3.16	0.81	——	——	3.15	0.82	——	——

4 结论

本文对四根端部“王”字形HBRB进行了拟静力加载试验,对其力学性能进行了对比分析,主要结论如下:

(1)端部“王”字形HBRB具有可行性,滞回曲线饱满,耗能性能优越,耗能系数在2.5~3.2之间。

(2)芯材焊接对试件的疲劳性能有很大的影响,采用热轧型HBRB疲劳性能要远高于焊接型HBRB。两者的CPD均在2 100以上,热轧型HBRB的CPD比焊接型HBRB的高约45%以上。

(3)两种类型的HBRB拉压不平衡系数均在1.2以内,热轧型HBRB的拉压不平衡系数低于焊接型HBRB,均在1.1以下,主要原因在于芯材采用热轧H型钢从生产工艺上看能够有效的避免焊接产生残余应力所带来的影响。

(4)试件的封头板由于强度不够在试验过程中出现外翻现象,而使部分压碎混凝土在试验过程中被带出,可以对其进行优化避免产生此类现象,例可以通过增厚封头板或者提高封头板的强度等级。

(5)由于热轧H型钢的标准化和规范化,生产周期短,可集中大量供货,同理可让热轧型HBRB标准化和规范化,大大缩短热轧型HBRB的工程生产周期。

参考文献 References

[1] 石文龙,朱鹏杰,陈文,等. 双阶屈服屈曲约束支撑的实现方法及数值分析[J]. 地震工程与工程振动,2023,43(4):140-150.
SHI Wenlong, ZHU Pengjie, CHEN Wen, et al. Implementation methods and numerical simulation of double-stage yield buckling restrained brace [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,

2023，43(4)：140-150.

[2] MURASE Y，MORISHITA K，INOUE K，et al. Structural Design Method of the Long Brace with Axial Hysteresis Dampers at Both Ends (Part 1：Analysis on the Buckling Restraint Conditions)[J]. Architectural Institute of Japan：Journal of Structural and Construction Engineering，2004，8：867-868.

[3] NARIHARA H，TSUJITA O，KOETEKA Y. The experimental study on buckling restrained braces(Part 1：Experiment on Pin connection type)[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Japan：Architectural Institute of Japan，2000，9：913-914.

[4] ZHAO Junxian，WU Bing，OU Jinpin. A novel type of angle steel buckling-restrained brace：Cyclic behavior and failure mechanism[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics，2011，40(10)：1083-1102.

[5] 赵俊贤，吴斌，欧进萍. 新型全钢防屈曲支撑的拟静力滞回性能试验[J]. 土木工程学报，2011，44(4)：60-70.
ZHAO Junxian，WU Bin，OU Jinpin. Uniaxial quasi-static cyclic tests on the hysteretic behavior of a novel type of all-steel buckling-restrained brace[J]. China Civil Engineering Journal，2011，44(4)：60-70.

[6] 赵俊贤. 全钢防屈曲支撑的抗震性能及稳定性设计方法[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.
ZHAO Junxian. Seismic behavior and stability design methodsS of all-steel buckling-restrained braces[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2012.

[7] NEWELL J，UANG C M，BENZONI G. Subassemblage testing of corebrace buckling restrained braces (G series)[R]. San Diego：University of California，2006.

[8] 黄波，陈泉，李涛，等. 国标Q235钢屈曲约束支撑低周疲劳试验研究[J]. 土木工程学报，2013，46(6)：29-34，43.
HUANG Bo，CHEN Quan，LI Tao，et al. Low-cycle fatigue test of Q235 steel buckling-restrained braces[J]. China Civil Engineering Journal，2013，46(6)：29-34，43.

[9] 吴京，洪曼，郭立行. 角钢拼接十字形无焊核心的高性能屈曲约束支撑试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2017，47(4)：743-750.
WU Jing，HONG Man，GUO Lihang. Experimental study on high-performance welding-free cruciform-shaped buckling-restrained braces with angle steel splicing core[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2017，47(4)：743-750.

[10] 李伟. 新型H型钢防屈曲支撑的抗震性能[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
LI Wei. Seismic behaviors of a novel type of H-section steel buckling-restrained braces[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2011.

[11] 李伟. H型钢内芯防屈曲支撑的局部稳定设计方法及疲劳性能[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.
LI Wei. Local stability design method and fatigue property of buckling-restrained braces with H-scetion steel core[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2016.

[12] 郭立行，吴京. 铸造十字形截面屈曲约束支撑的抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展，2016，18(3)：10-17.
GUO Lihang，WU Jing. Experiment study on the seismic performance of casting cruciform-shaped buckling-restrained brace[J]. Progress in Steel Building Structures，2016，18(3)：10-17.

[13] 郭立行. 无焊十字形截面屈曲约束支撑的试验研究[D]. 南京：东南大学，2016.
GUO Lihang. Experiment study on buckling-restrained brace with welding-free cross section[D]. Nanjing：Southeast University，2016.

[14] 王永贵，王磊，高向宇. 芯材构造形式对屈曲约束支撑力学性能影响研究[J]. 建筑科学，2018，34(1)：84-91.
WANG Yonggui，WANG Lei，GAO Xiangyu. Study on the mechanical properties influence of different core structure to buckling-restrained braces[J]. Building Science，2018，34(1)：84-91.

[15] 黄卿. 全组装式屈曲约束支撑低周疲劳性能及抗震需求分析[D]. 南京：东南大学，2013.
HUANG Qing. Low-cycle fatigue performance and seismic demands of welding-free buckling-restrained braces[D]. Nanjing：Southeast University，2013.

[16] 高远. 新型全钢屈曲约束支撑框架抗震性能[D]. 南京：东南大学，2020.
GAO Yuan. Seismic performance of the new all-steel buckling-restrained brace frame[J]. Nanjing：Southeast University，2020.

[17] YUAN Yue，GAO Jingwei，QING Yuan，et al. A new H-section buckling-restrained brace improved by movable steel blocks and stiffening ribs[J]. Journal of Building Engineering，2022，45：1-16.

[18] 程向前. 热轧H型钢在建筑结构领域的特点分析[J]. 山西冶金，2006(4)：53-54.
CHENG Xiangqian. Analysis of advantages of hot rolling H-beam[J]. Shanxi Metallurgy，2006(4)：53-54.

[19] 国家市场监督管理总局；中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第1部分室温试验方法：GB/T228.1—2010[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/T228.1—2010[S]. Beijing：Standards Press of China，2021.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑消能阻尼器 JG/T 209—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People′s Republic of China. Dampers for vibration energy dissipation of buildings：JG/T 209—2012[S]. Beijing：Standards Press of China，2012.

（编辑　吴海西）