



# 端部加强型组合热轧角钢防屈曲支撑静载试验研究

高向宇, 王永贵, 刘丹卉, 徐建伟  
(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:**提出用端部加强方法制作组合热轧角钢防屈曲支撑的钢芯。设计、制作并测试了7个试件,其中热轧角钢防屈曲支撑试件4个、对比热轧钢板试件3个。端部加强型角钢钢芯采用了两种截面(错十字形和T形)、两种组合方式(工作段焊接与非焊接),用端部焊接加强板的方法形成弱化工作段,主要优点是加工方便、降低造价。热轧钢板试件采用钢板焊接并切削成型。试验中设计改进了加载装置,采用静力反复加载方法加载。研究了包括轴向荷载-轴向变形滞回曲线、累计塑性变形、极限变形能力、刚度退化以及等效阻尼比等抗震性能。研究表明,用这种成型方法制作的组合热轧角钢防屈曲支撑构造简单,耗能能力、延性等抗震性能可满足建筑结构消能减震设计的需求。

**关键词:**防屈曲支撑; 热轧钢材; 抗震设计; 减震

中图分类号:TU317.1 文献标志码:A

## Static tests on buckling restrained brace made of hot-rolled steel angle with strengthened ends

GAO Xiangyu, WANG Yonggui, LIU Danhui, XU Jianwei  
(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A new type of BRB(buckling-restrained braces) is designed and tested. With both ends strengthened, the braces are made of hot-rolled steel angle core. It has an advantage of simple and effective for manufacturing with low price. Seven specimens were tested, including four BRAB(buckling-restrained angle brace) with two cross section types (quasi-cross and T section) at combination methods (welded or without welding), three BRB made of hot-rolled steel plate for comparison. Cyclically static loading tests were conducted. Seismic behaviors, such as force-deformation hysteresis loops, accumulated plastic deformation, and tangent stiffness and its deterioration, as well as equivalent damping ratio are studied. It is validated that the new BRB using angle core has a reliable performance with high energy dissipation property and can be used to satisfy design requirements for buildings in seismic region.

**Keywords:** buckling restrained brace; hot-rolled steel; seismic design; seismic dissipation

项目编号:北京市自然科学基金项目(8062009),国家自然科学基金项目(50678013)。  
作者简介:高向宇(1959—),男,北京房山人,工学博士,教授。E-mail: gaoxy@bjut.edu.cn  
收稿日期:2008年11月

# 0 引言

近几年在日本、美国和中国防屈曲支撑(简称BRB)或无粘结支撑研究与应用得到了比较广泛的发展。日本、美国进行了试验研究<sup>[1]</sup>,颁布了设计标准<sup>[2]</sup>。蔡克铨等进行了双管式挫屈束制支撑的研究及工程应用<sup>[3]</sup>,程光煜等进行了混凝土约束构件防屈曲支撑的试验<sup>[4]</sup>和工程应用,在构造及性能方面也有多方研究成果<sup>[5-6]</sup>。在各种研究成果当中,最受人关注的是防屈曲支撑的消能减震性能和成本造价。本文着眼于国标 Q235 钢材,利用组合角钢制作钢芯,具有选材面广、造价较低、加工时不易变形、平面内外稳定性好、节点转动适应性强等优点。在文[7]的研究工作基础上,提出用端部加强方式加工角钢钢芯,制作组合热轧角钢防屈曲支撑(简称BRAB),构造相对简单、加工方便、成本有所降低。共完成了7个试件的设计、制作和试验,其中有4个为端部加强型热轧角钢防屈曲支撑,3个为热轧钢板(钢芯切削成型)防屈曲支撑。在人工静力反复加载条件下进行了加载试验。研究了轴力-轴向变形滞回曲线、等效刚度及其退化规律、等效阻尼比等消能减震性能。

## 1 端部加强型组合热轧角钢防屈曲支撑的构造

端部加强型组合热轧角钢防屈曲支撑的构造是在角钢钢芯端部焊接逐渐变宽度的加强板,形成弱化工作段。两个平行放置的角钢彼此之间在工作段和连接段均采用浅度焊接方式焊接。本次研究了错十字形和T形两种截面、两种组合方法。图1示意了端部加强型组合热轧角钢防屈曲支撑(图1a)与工作段切削成型的防屈曲支撑<sup>[7]</sup>(图1b,1c)在构造上的差别。端部加强型组合热轧角钢防屈曲支撑的好处

是无需使用铣床对钢芯进行切削加工,增加了成品率,且所选用的型钢母材较小,利用率较高,可降低一定的材料和制作成本。

其它制作工艺与工作段切削成型的热轧角钢防屈曲支撑<sup>[7]</sup>基本相同:即在钢芯表面涂刷硅胶、在角钢肢尖部位粘贴聚乙烯条,形成弹性空间,为钢芯侧向变形提供空间;在过渡段粘贴聚乙烯泡沫,为钢芯提供纵向变形空间;钢芯采用 Q235 热轧角钢;在钢管内浇筑碎石混凝土,浇筑过程中需将钢芯和钢管作临时固定,防止钢芯位置变化,立位浇筑,钢管底部密封、透气,防止漏浆或形成蜂窝麻面。试件的几何参数如表1所示,表中所述的截面构造类型参见图2。试件的尺寸主要受限于自平衡加载系统,长度相似比约 1:2 ~ 1:3。钢板、钢管内填混凝土及钢芯表面的硅胶都采用实际工程中的材料。

## 2 试验方案

试验在北京工业大学北京市工程抗震与结构诊治重点实验室进行。图3为试验采用的自平衡试验加载系统以及加载和量测装置示意图,其中图3b为本次试验所采用的改进装置——套筒套靴装置。这一装置既保证了作动器传递轴力明确,又保证了试件加载端只受到轴向位移加载,没有转动位移量输入,从而改进了加载边界条件。固定套筒和可移动套靴之间涂以润滑油,减小摩擦阻力。经试验后单独测试,最大摩擦阻力小于 1.0kN。

钢芯材性试验数据见表2。内填强度等级为 C30,实测立方体抗压强度平均值为 32.1 MPa。考虑到钢芯表面涂刷的硅胶材料、角钢肢端粘贴的聚乙烯以及过渡段表面粘贴的聚乙烯泡沫材料仅起构造作用,且已有类似他人的试验结果,本次试验未对聚乙烯材料进行测试。

加载采用双向液压千斤顶,手动控制油泵。最大加载能力为 ±1000kN。图4为预定的反复荷载加

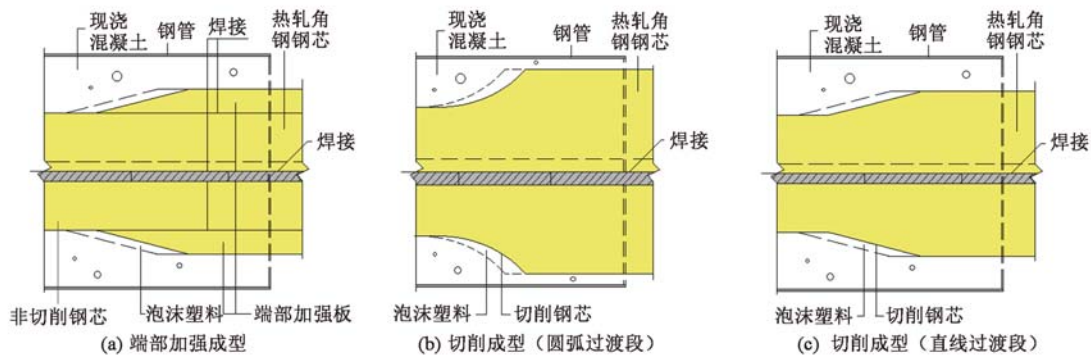


图1 组合热轧角钢钢芯端部加强成型构造与切削成型构造

Fig. 1 Combined hot-rolled angle steel core with both ends weld-strengthened and milled middle section

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

工作段 试件类型	试件 编号	组合角钢 或钢板	试件长度 /mm	工作段		过渡段 $l_1$ /mm	连接段 $l_2$ /mm	组合方法	方钢管		
				$l_0$ /mm	截面积/mm <sup>2</sup>				$B \times B \times t$ /mm	$l_3$ /mm	
端部加强	+	W-1	2 L 60 × 6	1710	900	1368	60	345	-	180 × 180 × 2	1160
		W-2	2 L 60 × 6	1710	900	1368	60	345	浅度焊接	180 × 180 × 2	1160
	T	W-3	2 L 80 × 50 × 8	1680	800	1973	80	360	-	200 × 200 × 2	1100
		W-4	2 L 80 × 50 × 8	1680	800	1973	80	360	浅度焊接	200 × 200 × 2	1100
切削成形	+	L-1	+60 × 10 × 2	1840	900	1100	60	410	浅度焊接	150 × 150 × 1.5	1140
	-	L-2	-90 × 10	1920	680	900	190	430	-	180 × 180 × 1.5	1180
	-	L-3	-90 × 10	1840	680	900	190	350/430	-	180 × 180 × 1.5	1180

注:1. 试件 L-3 一端螺栓连接,另一端单向铰式连接(图 2c); 2. 与文[7]中切削成型的钢板芯防屈曲支撑采用的全螺栓连接有所不同,试件 L-1、L-2 的连接方式为半焊接、半螺栓连接,工作段较文[7]者长,极限变形能力强; 3. 工作段、过渡段、连接段参数定义见图 2。

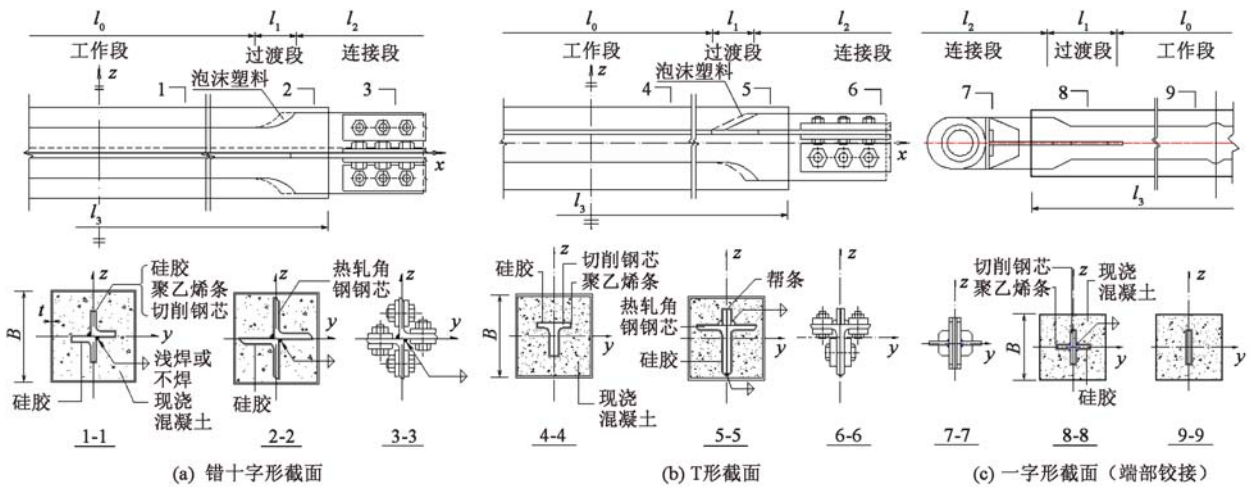


图 2 截面构造

Fig. 2 Cross section

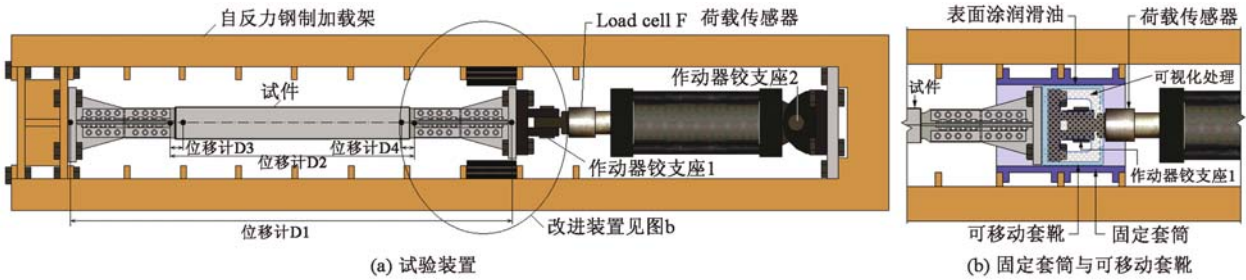


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Test set-up

表 2 钢芯力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel cores

构件 编号	热轧钢材 种类	屈服强度/ $N \cdot mm^{-2}$	抗拉强度/ $N \cdot mm^{-2}$	伸长率 $\delta_5$	屈服变形 $D_y$ /mm	预测刚度/ $kN \cdot mm^{-1}$
L-1	钢板	307	437	0.26	1.34	252
L-2	钢板	307	437	0.26	1.01	274
L-3	钢板	307	437	0.26	1.01	274
W-1	等肢角钢	257	367	0.176	1.12	314
W-2	等肢角钢	257	367	0.176	1.12	314
W-3	非等肢角钢	253	379	0.215	0.98	509
W-4	非等肢角钢	253	379	0.215	0.98	509

注:屈服强度是钢芯试件测试均值,钢芯屈服变形  $D_y =$  屈服强度/钢芯弹性模量  $\times$  工作段长度,弹性模量取自于中国钢材产品标准,  $D_y$  主要用于位移加载控制。

载方案,按位移控制,  $D_y$  为钢芯工作段屈服变形。由于采用人工加载,每个构件的加载过程与预设方案存在一定出入。加载方案所对应的位移控制峰值是与建筑结构层间侧移密切相关的。例如,根据试件的相似比及一般多高层框架结构的尺寸,  $5D_y$  大约相当于层间侧移角 0.50% ~ 0.67%,  $20D_y$  相当于 2.00% ~ 2.67%,  $25D_y$  相当于 2.50% ~ 3.33%。

位移量测所采用的位移计 (D1 ~ D4) 按图 3a 布置。其中 D1 用于量测试件支座间的总变形,含有螺栓钢板间的滑移量; D2

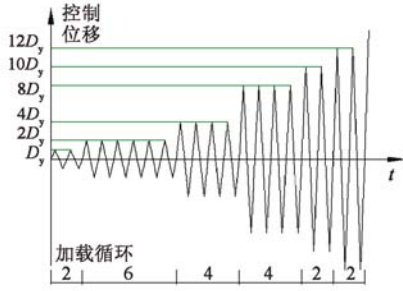


图4 加载控制方案  
Fig.4 Loading scheme

用于量测钢芯工作段的变形, D2 的数据用于记录力-变形滞回曲线; D3、D4 分别用于量测钢管两端与钢芯之间的相对移动量, 作为位移观测的补充和备用。4 个位移计的测量范围为 50 ~ 200mm, 精度为 0.01mm。钢管外粘贴应变片, 测量钢管的应变, 主要用于加载观测控制。位移、荷载和应变数据采用 DSP 数据采集系统记录。

### 3 试验结果

#### 3.1 轴向荷载-轴向变形滞回曲线

反复荷载作用下试件的轴向荷载-轴向变形滞回曲线能够反映出防屈曲支撑的抗震性能信息, 例如: 加卸载规律、耗能及滞回规律性、塑性变形积累过程、耗能大小等。图 5 为试件 W-4 轴向荷载-轴向变形滞回曲线。可以看出构件在整个加、卸载过程中表现稳定, 规律性好, 没有显著的强度退化迹象, 加、卸载刚度的退化也很小。试件的最大变形达到

37.65mm, 约为屈服变形  $D_y$  的 38.2 倍。累积塑性变形(根据每级循环加载所经历的最大塑性变形绝对值累加)超过  $\pm 219\text{mm}$ , 达到屈服变形  $D_y$  的 448 倍。同位移循环下最大受压承载力略高于受拉承载力, 按文献[8]计算的力学参数非对称性系数  $\nu = 1.03 \sim 1.12$ (按全程试验统计), 在减震设计使用范围内,  $\nu$  值很低。例如, 在  $10D_y$  的两个循环中, 最大压力 629.96kN 比最大拉力 601.77kN 高 4.7%; 在  $20D_y$  加载循环内, 最大压力 745.03kN 高于最大拉力 674.57kN 为 10.4%; 在  $28.6D_y$  循环内, 最大压力 812.84kN 高于最大拉力 730.35kN 仅为 11.3%。由于荷载已接近加载系统限值, 故在完成 25 个加载循环后停止, 试件并未破坏失效。

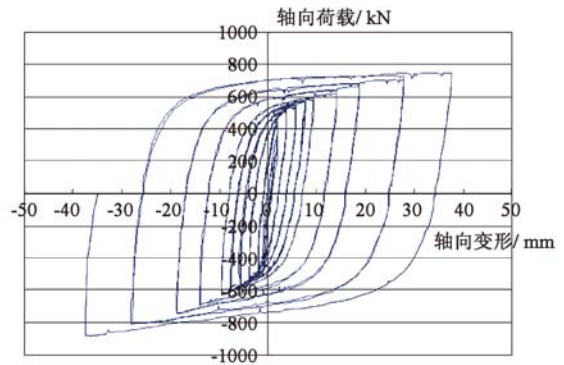


图5 试件 W-4 轴向荷载-轴向变形滞回曲线

Fig.5 Axial force-axial deformation loops of specimen W-4

其余 6 个试件轴向荷载-轴向变形滞回曲线绘于图 6 中。试件 W-1、W-2、W-3、L-1、L-2 和 L-3 最终发生受拉破坏, 最大变形分别达到屈服变形  $D_y$  的 16.5、13.1、29.8、48.1、38.8 和 39.6 倍。另外, 铰接

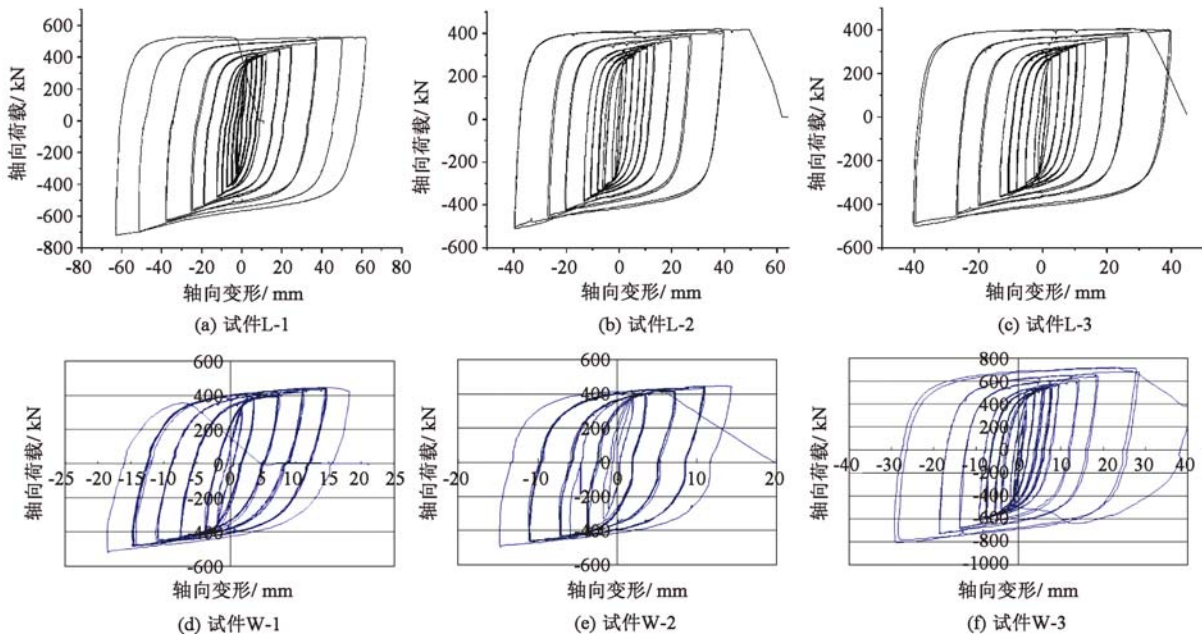


图6 试件轴向荷载-轴向变形滞回曲线图

Fig.6 Axial force-axial deformation loops of specimen L-1, L-2, L-3, W-1, W-2 and W-3

试件 L-3 与螺栓连接试件 L-1 和 L-2 没有明显差别,说明铰接构造合理。试件 W-1、W-2 极限变形较小,分析原因,主要是钢芯母材伸长率  $\delta_5$  (表 2) 较小,材质欠佳。此外,角钢较薄对焊接敏感也可能有些影响。即便如此,钢芯的累积变形已经分别达到屈服变形  $D_y$  的 300、264、300、540、620、540 倍。还可以观察到的现象是切削型钢芯(L-1、L-2、L-3)的整体极限变形能力略高于端部加强型试件,这显然与钢芯的端部机加工方式有关,但后者的极限变形能力仍然可以满足减震设计的需求。对于结构整体延性或极限变形能力要求较高的结构减震设计,可限制所选母材的伸长率  $\delta_5$  大于 0.2。对于整体延性要求不是很高的结构,例如混凝土结构、某些组合结构或混合结构,可以不作此项限制。

总体来看,各个试件的轴向荷载-轴向变形曲线平稳,拉压对称性较好,加、卸载规律性好,极限变形能力可满足设计要求。证明所设计的端部加强型钢芯构造可行。

### 3.2 割线刚度-相对变形关系

在用反应谱方法计算结构非弹性地震反应时常借助结构等效刚度来实现。结构的等效刚度是由每个构件的刚度贡献来体现的。防屈曲支撑在较强的地震作用下率先屈服耗能,保护主体结构,其荷载-变形关系表现出明显的非线性特点。准确计算防屈曲支撑的割线刚度与塑性变化的变化规律是结构抗震、减震计算中非常重要的内容。对本次试验的各个试件的每个轴向荷载-轴向变形滞回环顶点所对应的割线刚度进行了统计,得出了割线刚度与相对变形的统计规律,可供等效刚度计算参考。

由于试验采用人工控制加载,反复荷载加载规律不完全对称,因此对受拉刚度  $K^+$  和受压刚度  $K^-$  分别进行统计,所采用的统计方法同文[7]。对受拉刚度  $K^+$  和受压刚度  $K^-$  分别进行统计主要还用于鉴别防屈曲支撑的受拉和受压刚度是否存在明显的差异,判断割线刚度与相对变形是否具有相同的变化规律,这关系到如何考虑力学参数非对称系数<sup>[8]</sup>,关系到防屈曲支撑恢复力模型的参数等方面。

根据 7 个试件的试验数据,用上述方法统计出每一加载循环的峰值点所对应的正、负向加载割线刚度,及所对应的钢芯变形,分别用相对刚度和相对变形来表示并绘于图 7 中。其中相对刚度为割线刚度与理论初始刚度( $K_0 = EA/l_0$ , 其中  $E$  为钢材弹性模量,  $A$  为工作段截面面积,  $l_0$  为工作段长度)的比值;相对位移为钢芯实测变形与屈服变形  $D_y$  的比值。为便于与切削型钢芯进行比较,图 7 中还绘出了作者前期试验的切削角钢钢芯防屈曲支撑的试验结果和热轧钢板钢芯的试验结果<sup>[7]</sup>,图中“◇”形数据点

为本次试验的端部加强型钢芯防屈曲支撑的试验结果。

从图 7 可看出,端部加强型钢芯防屈曲支撑的等效刚度及其与相对变形的退化规律,与用切削型钢芯制作的防屈曲支撑相比,虽然存在多种构造形式,如截面不同(错十字形、T 字形、一字形和十字形),两种截面组合方式(工作段焊接与非焊接,表 1),但割线刚度与相对变形的关系无明显区别,规律性一致。正负向加载割线刚度与相对位移的刚度退化程度无明显差异,全部数据离散性较小。

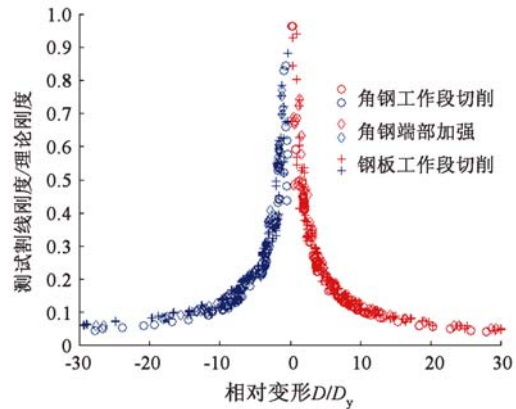


图 7 相对割线刚度-相对变形

Fig. 7 Tangent stiffness and relative deformation

### 3.3 等效粘滞阻尼比

等效粘滞阻尼比是另一个重要的结构参数,主要是在使用反应谱方法计算地震作用时用阻尼比来体现结构非线性的影响。在本次试验中,等效粘滞阻尼比是根据所测轴向荷载-轴向变形滞回曲线,按照正负向加载分别统计的。这对于如何考虑力学参数非对称性、建立防屈曲支撑的恢复力模型具有参考意义。具体统计计算公式详见文[7]。

本次试验的 7 个试件的全部数据绘于图 8,其中端部加强型钢芯防屈曲支撑的数据用“◇”形表示。为便于与切削型钢芯进行比较,图 8 中还绘出了作者前期试验的切削角钢钢芯防屈曲支撑的试验结果和热轧钢板钢芯的试验结果<sup>[7]</sup>。可以看出,端部加强型钢芯防屈曲支撑的等效粘滞阻尼比随钢芯相对变形的增长规律与钢芯切削型的支撑的变化规律是一致的。

等效粘滞阻尼比与相对变形之间关系的统计规律对于计算结构阻尼比具有重要意义。当统计样本较大时,统计规律的可靠性会随之增加。图 8 中统计了包括文[7]及本文所测试的 13 个试件、280 多个滞回环数据,规律性较强:能量耗散进程稳定,拉、压两种条件下阻尼比没有明显差异;阻尼比随相对变形的增长而增长,但逐渐趋于平缓,当钢芯变形等于 5 倍屈服变形时,等效粘滞阻尼比的统计均值可达到

0.4(相当于0.50%~0.67%的层间侧移角),阻尼比增值效率达到最高,此点可作为结构减震设计时设定层间位移性态的重要依据。

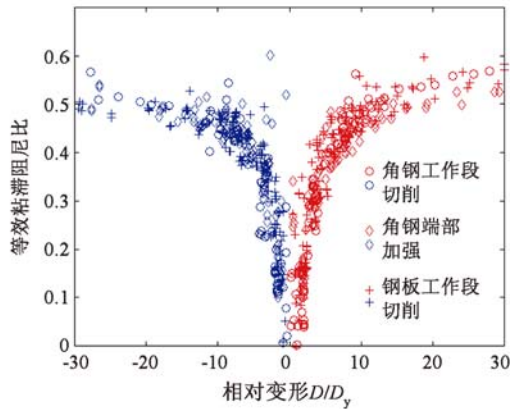


图8 等效粘滞阻尼比-相对变形  
Fig.8 Equivalent viscous damping ratio and relative deformation

## 4 结论及建议

(1)本文提出用端部加强方式制作组合热轧角钢防屈曲支撑(BRAB)的钢芯。在改进的加载装置上所测试的最大变形在 $13.1D_y \sim 38.2D_y$ 之间,最大累积塑性位移在 $264D_y \sim 380D_y$ 之间。当采用钢材的伸长率 $\delta_s$ 大于0.2时,端部加强型试件的最大变形高于 $25D_y$ ,最大累积变形高于 $300D_y$ 。

(2)端部加强型角钢防屈曲支撑在反复拉、压加载条件下受力性能对称性好,割线刚度、等效粘滞阻尼比与钢芯相对轴向变形的变化规律,与切削钢芯的组合热轧角钢防屈曲支撑和热轧钢板防屈曲支撑基本一致。

(3)试验得出的轴向荷载-轴向变形滞回曲线、割线刚度及其随钢芯轴向相对变形( $D/D_y$ )变化的刚度退化规律(图7)、等效粘滞阻尼比及其与钢芯轴向相对变形( $D/D_y$ )的变化规律(图8),对于标定恢复力模型参数、计算结构等效阻尼比并进行结构抗震、减震设计提供了参考依据。

(4)建议结构减震设计时控制中震下钢芯轴向变形 $\leq 5D_y$ ,可获得较高的减震效率。大震下这种构造的防屈曲支撑可提供大于 $25D_y$ 的极限位移,经合理设计可满足较高的弹塑性层间位移角限值要求,如1/80、1/50,甚至1/40,实现大震不倒,防屈曲支撑不失效。

## 参 考 文 献

- [1] Black C, Makris N, Aiken I. Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained unbounded braces [R]. Berkeley, CA, USA: University of California, 2002: 33-71.
- [2] Sabelli R, Aiken I. Development of building code provisions for buckling-restrained braced frames [C]// Proceedings of 72nd Annual Convention. Sacramento, CA, USA: Structural Engineers Association of California, 2003.
- [3] 蔡克铨, 黄彦智, 翁崇兴. 双管式屈曲束制(屈曲约束)支撑之耐震行为与应用[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(3): 1-8. (TSAI Keh-Chyuan, HWANG Yean-chih, WENG Chung-shing. Seismic performance and applications of double-tube buckling-restrained braces [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(3): 1-8. (in Chinese))
- [4] 程光煜, 叶列平, 许秀珍, 等. 防屈曲耗能钢支撑的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 31-39. (CHENG Guangyu, YE Lieping, XU Xiuzhen, et al. Experimental study on buckling-restrained brace [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 31-39. (in Chinese))
- [5] 孙艳文. 钢骨消能支撑钢框架抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005. (SUN Yanwen. Study on seismic behavior of buckling restrained braced frame [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005. (in Chinese))
- [6] 郭彦林, 刘建彬, 蔡益燕, 等. 结构的耗能减震与防屈曲支撑[J]. 建筑结构, 2005, 35(8): 18-23. (GUO Yanlin, LIU Jianbin, CAI Yiyan, et al. Structural energy dissipation and seismic mitigation method and buckling-restrained brace [J]. Building Structure, 2005, 35(8): 18-23. (in Chinese))
- [7] 高向宇, 杜海燕, 张慧, 等. 国标 Q235 热轧钢材防屈曲支撑抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(3): 91-95. (GAO Xiangyu, DU Haiyan, ZHANG Hui, et al. Experimental study on seismic performance of buckling-restrained brace made of hot-rolled steel in mainland China [J]. Building Structure, 2008, 38(3): 91-95. (in Chinese))
- [8] 高向宇, 李永梅, 张慧, 等. 考虑防屈曲支撑力学参数非对称性的有效阻尼比[J]. 建筑结构, 2008, 38(3): 96-100. (GAO Xiangyu, LI Yongmei, ZHANG Hui, et al. Study on effective damping ratio of buckling-restrained brace with asymmetrically mechanical properties [J]. Building Structure, 2008, 38(3): 96-100. (in Chinese))