

木壳屈曲约束支撑低周反复加载试验研究*

陆伟东^{1,2}, 蔡玉鹏¹, 刘鹏越¹, 张峰¹

(1. 南京工业大学土木工程学院 南京, 211816)

(2. 南京工业大学建筑设计研究院 南京, 210009)

摘要 为了提高胶合木框架结构的抗震性能,对 4 根不同构造形式的木壳屈曲约束支撑(timber buckling-restrained braces,简称 TBRB)进行低周反复荷载试验,分析了木壳屈曲约束支撑的破坏形式、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线及延性等抗震性能。试验结果表明:试件的破坏形态主要为钢内芯拉断、钢内芯局部屈曲和木材局压破坏、胶合木开裂和钢内芯多波屈曲;所有试件的滞回曲线基本上呈梭形,耗能良好,初始刚度较大,低周反复荷载下支撑刚度退化明显;经内衬钢板和端部加强的木壳屈曲约束支撑的耗能能力、延性、极限承载力均优于其余 3 种构造,但对初始刚度影响不大。研究结果表明,内衬钢板和端部加强的木壳屈曲约束支撑可实现更好的抗震性能,具有良好的实践性,可为胶合木框架结构抗震设计提供参考。

关键词 胶合木框架;木壳屈曲约束支撑;内衬钢板;抗震性能;低周反复试验

中图分类号 TU366.2

引言

木材是一种绿色建材,具有优良的结构性能与极高的美学价值,符合绿色生态、健康宜居的理念。在国家大力倡导绿色建筑和装配式建筑的背景下,木结构的应用与发展越来越受到重视。因多高层木结构具有低碳环保、绿色舒适等特点,现已被更多地运用到工程实践中。梁柱式木框架体系是多高层木结构重要组成部分之一,具有结构布置灵活、装配便捷的优点,广泛应用于体育场馆和其他民用建筑。

纯木框架侧向刚度较弱,在侧向力作用下,结构易发生较大变形,因此需要通过增加支撑、抗震墙等措施保证其具有足够的抗侧能力。熊海贝等^[1-2]对人字撑、交叉撑木框架进行试验研究,研究发现人字撑框架在支撑与框架连接处发生破坏,交叉撑在节点处发生断裂。李昌春^[3]对带有不同支撑与连接的木框架进行低周反复荷载试验,研究表明破坏均发生在连接节点处。许清风等^[4]对增设了屈曲约束支撑及木支撑的 5 层梁柱式胶合木缩尺结构模型进行了振动台试验,发现耗能支撑与普通木支撑相比,更能保障结构的抗侧力性能。

屈曲约束支撑可以弥补普通支撑耗能不足的局面。自 20 世纪 70 年代日本学者对屈曲约束支撑

研究工作开始^[5],国内外学者不断探索采用新材料和新构造形式的屈曲约束支撑。Takeuchi 等^[6]研究了钢管屈曲约束支撑核心构件局部屈曲半波长度与核心构件宽度之间的关系。Usami 等^[7]研究了屈曲约束支撑的抗疲劳性能。Ogawa 等^[8]研究了焊缝对约束屈曲支撑性能的影响,结果表明在连续施焊情况下支撑抗拉性能有所下降。陆斌斌^[9]对比分析了具有不同的外围约束单元及不同的钢芯宽厚比的屈曲约束支撑性能的差异。Blomgren 等^[10]设计了一种采用 2 块独立的胶合木块包裹核心钢板,得到了较为理想的试验数据。张峰^[11]对不同构造形式的钢-木屈曲约束支撑进行了低周反复加载试验,研究外围约束构造形式、约束比及宽厚比等因素对屈曲约束支撑性能的影响。

本研究提出一种适用于胶合木框架的新型屈曲约束支撑。通过对不同构造形式的新型约束支撑开展低周反复加载试验研究,得到不同构造的新型屈曲约束支撑的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线及刚度退化曲线,分析了支撑的耗能能力、初始刚度、极限承载力和延性。研究证明,该新型屈曲约束支撑具有良好的抗震性能,可为胶合木框架屈曲约束支撑研究提供参考。

* 国家自然科学基金资助项目(51378255)

收稿日期:2020-07-19;修回日期:2020-08-27

1 试验概况

1.1 木壳屈曲约束支撑基本构造

木壳屈曲约束支撑主要包括钢内芯和外围约束两部分。钢内芯采用“一”字钢板,为主要受力部件,承担轴向拉力和压力。外围约束为花旗松胶合木,在约束屈服段与内芯接触。为防止应力集中,支撑两端过渡段采用圆弧过渡,同时两端布置加劲肋。支撑连接段设计为“十”字截面,支撑工作时保证连接段处于弹性阶段。在内芯中部设置限位卡以防止支撑在运输、安装及使用过程中约束单元与内芯发生相对滑动。在内芯被约束的区域全长均匀涂抹硅胶,以消除内芯受力单元与约束单元之间的摩擦,保证受力单元在支撑工作时能够自由收缩。木壳屈曲约束支撑约束单元两端预留槽口,以利于内芯受力单元轴向变形。

1.2 试件设计

本试验采用 1:2 的缩尺比例设计制作了 4 根木壳屈曲约束支撑试件,木壳屈曲约束支撑参数设计与构造示意图分别如表 1 和图 1 所示,断面 1-1 构造形式如图 2 所示。

表 1 木壳屈曲约束支撑参数设计

Tab.1 Design parameters of TBRB specimens

试件 编号	钢内芯截面		内衬钢板		端部 加强
	宽度/mm	厚度/mm	宽度/mm	厚度/mm	
RS ₁	25	3.5	—	—	未加强
RS ₂	25	3.5	—	—	未加强
BS ₁	25	3.5	35	3.5	未加强
BS ₂	25	3.5	35	3.5	加强

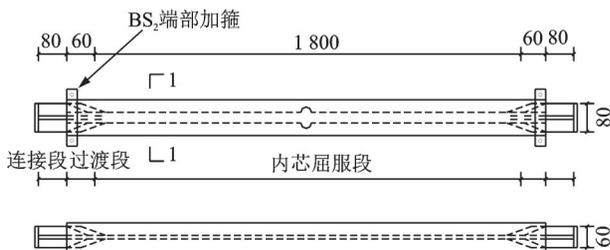


图 1 木壳屈曲约束支撑构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Diagram of TBRB by glued laminated constraints (unit:mm)

试件 RS₁ 外围约束截面两侧木材为横纹方向,并采用自攻螺钉增强。试件 RS₂ 约束单元上下侧为 2 块胶合木,两侧通过顺纹方向的木材进行粘结。试件 BS₁ 约束单元由内衬钢板与花旗松胶合木通过

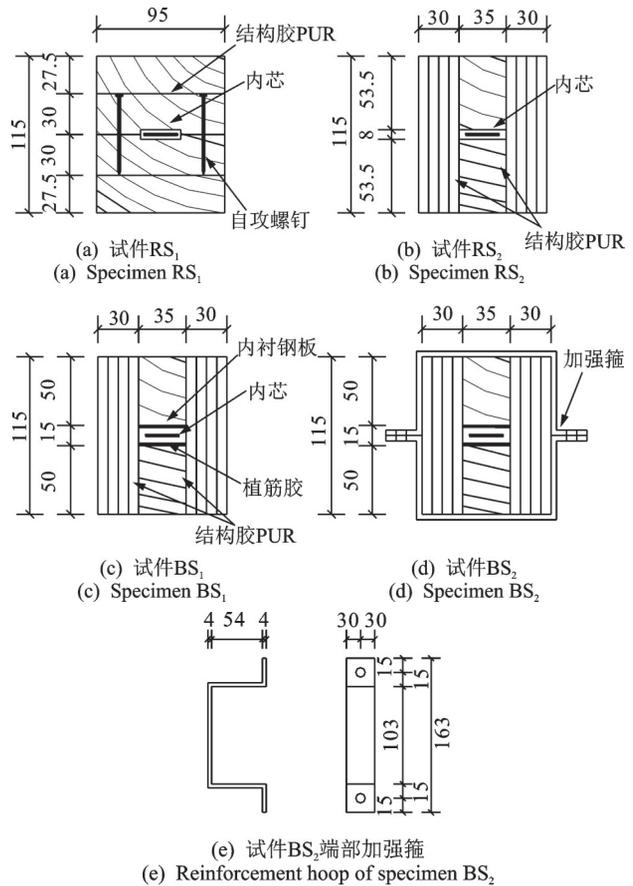


图 2 试件构造形式(单位:mm)

Fig.2 Components of the specimens (unit: mm)

植筋胶粘结组成,通过提高内芯单元与外围约束单元接触面的刚度,以改进木壳屈曲约束支撑的性能。试件 BS₂ 在试件 BS₁ 的基础上,通过端部加箍使木壳屈曲约束支撑的性能进一步增强。

所有试件内芯单元屈服段长度均为 1 800 mm,过渡段长度为 60 mm,连接段长度为 80 mm。试件钢芯截面宽度均为 25 mm,厚度为 3.5 mm。试验中采用的内衬钢板宽度为 35 mm,厚度为 3.5 mm,钢材为 Q235 级,木材为花旗松正交胶合木。

1.3 材料性能

试验测得花旗松胶合木的顺纹抗压强度为 41.52 MPa,顺纹抗压弹性模量为 12 456.54 MPa;横纹径向抗压强度为 7.15 MPa,横纹径向抗压弹性模量为 760.17 MPa;横纹弦向抗压强度为 6.20 MPa,横纹弦向抗压弹性模量为 550.33 MPa。试验测得钢材屈服强度为 340.10 MPa,极限强度为 432.30 MPa,弹性模量为 204 000 MPa^[12]。

1.4 加载方案

试验采用低周反复加载方案,加载中所用位移

D 为构件全长的1/1 000,即 $D=2$ mm,加载频率为0.02 Hz。加载过程分为以下3个阶段。

1) 预加载试验。预加载采用荷载控制,分别施加2 kN和4 kN各循环1次,以确保仪器正常工作及试件各部分处于正常工作状态。

2) 标准加载试验。参考相关规程^[13],本试验设计了以位移 D 的倍数计算的标准加载方案用以考察支撑的耗能性能。低周反复加载制度见图3,以 $1D, 2D, \dots$ 分级加载,每级位移加载循环2次。

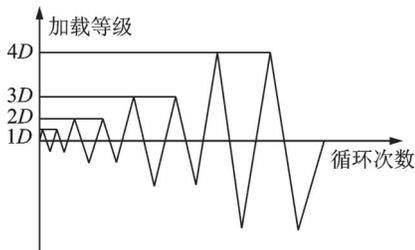


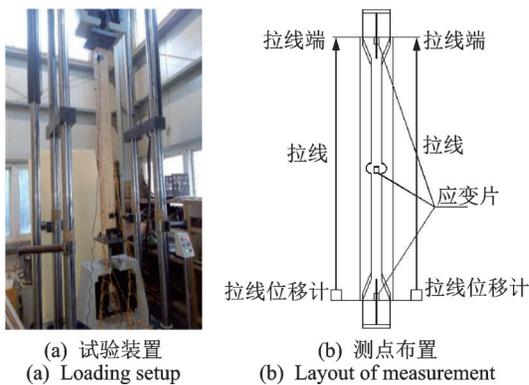
图3 低周反复加载制度

Fig.3 Reversed cyclic loading protocol

3) 额外循环加载试验。在标准加载试验基础上以 $2D$ 为级差,每级位移加载循环2次,直至试件破坏。

1.5 试验加载装置及测量仪器布置

试验采用100 t万能试验机进行加载,使用D3816应变采集设备采集数据,试验加载装置和测量仪器布置如图4所示。应变片布置在约束单元的跨中及两端(图4(b)),以测量约束单元的应变情况。拉线位移计的两端分别布置在支撑上下两端的端板,测量钢内芯的变形,取平均值为内芯屈服段位移。



(a) 试验装置
(a) Loading setup

(b) 测点布置
(b) Layout of measurement

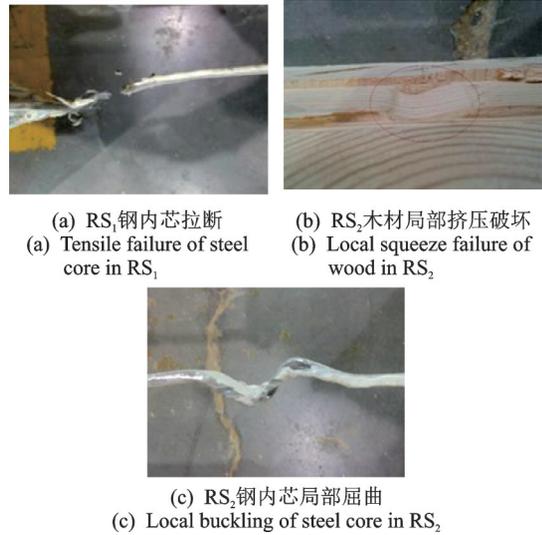
图4 试验加载装置和测量仪器布置

Fig.4 Testing setup and layout of measurement

2 试验现象

图5为试件 RS_1 和 RS_2 试验现象。试件 RS_1 在轴

向位移反向加载至 -2 mm时,试件中部钢内芯挤压胶合木发出轻微声响;位移加载至8 mm时,钢内芯端部拉断破坏(图5(a)),试件承载力骤降。



(a) Tensile failure of steel core in RS_1

(b) Local squeeze failure of wood in RS_2

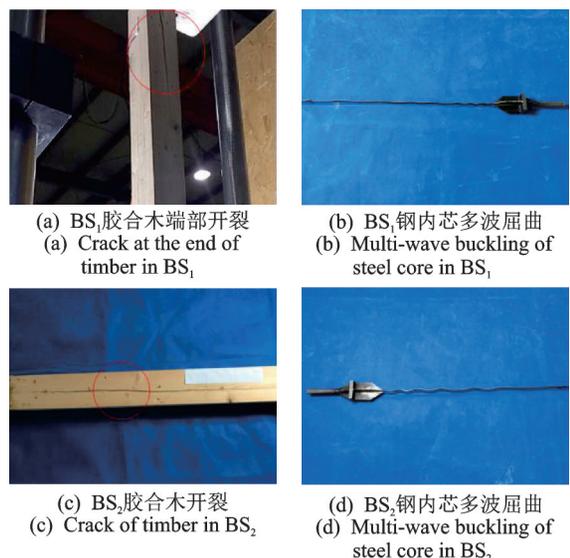
(c) Local buckling of steel core in RS_2

图5 试件 RS_1 和 RS_2 试验现象

Fig.5 Experimental phenomena of RS_1 and RS_2

试件 RS_2 在轴向位移加载至 -4 mm时产生连续的钢内芯挤压木材的声音;位移加载至 -8 mm时,受压过程中承载力下降至极限承载力的80%以下,试验终止。剖开试件,外围胶合木局部挤压破坏如图5(b)所示,内芯局部屈曲如图5(c)所示,距离端部1/5处钢内芯屈曲幅值最大。由于上下胶合木约束单元横纹局部挤压变形,导致钢内芯的间隙增大,钢内芯达不到多波屈曲的形态。

图6为试件 BS_1 和 BS_2 试验现象。试件 BS_1 轴向位移加载至 -4 mm时,钢内芯产生一定弯曲,并与约



(a) Crack at the end of timber in BS_1

(b) Multi-wave buckling of steel core in BS_1

(c) Crack of timber in BS_2

(d) Multi-wave buckling of steel core in BS_2

图6 试件 BS_1 和 BS_2 试验现象

Fig.6 Experimental phenomena of BS_1 and BS_2

束单元挤压发出声响;当位移第2次加载至-10 mm时,约束单元发出木材劈裂的声音,胶合木约束端部产生裂缝(图6(a))。当轴向位移加载至12 mm时,裂缝进一步延伸,试件破坏,支撑承载力陡降,退出工作,试验终止。剖开试件观察到钢内芯发生多波屈曲的形态(图6(b))。

试件BS₂加载前期现象与试件BS₁一致。当BS₂轴向位移第2次达至-14 mm时,胶合木约束端部产生裂缝,随着位移增加,裂缝进一步扩展(图6(c))。当轴向位移加载至18 mm时,支撑承载力陡降,承载力低于受压极限承载力的80%,试验终止。剖开试件观察到钢内芯有明显的多波屈曲形态(图6(d))。

3 试验结果及分析

3.1 胶合木约束套筒实测应变

试验中支撑的胶合木约束单元上下端的最大线应变变为 431×10^{-6} ,中部的最大线应变变为 355×10^{-6} ,可见外围约束单元具有较大的抗弯刚度和较好的承载力。

3.2 滞回曲线

各支撑试件的荷载-轴向变形滞回曲线如图7所示,分析比较结果如下。

- 1) 各试件滞回曲线均具有典型的梭形特性,曲线饱满,说明各试件具有良好的耗能能力。
- 2) 随着加载等级的增加,试件受拉荷载趋于稳

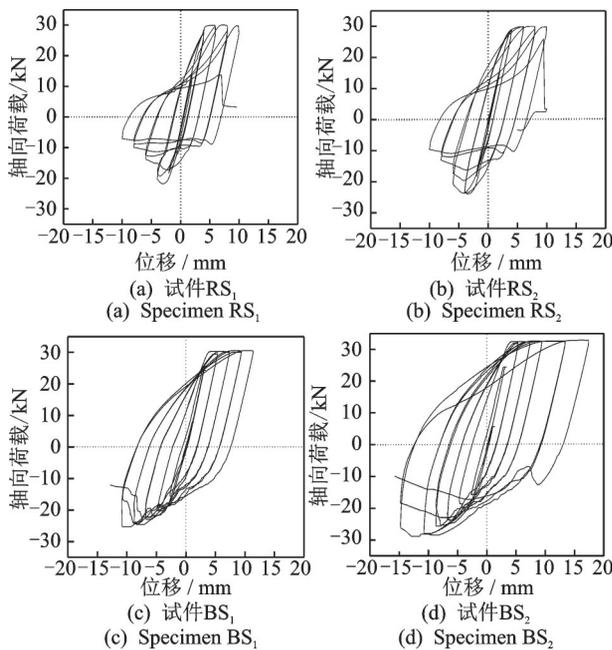


图7 各试件滞回曲线

Fig.7 Hysteretic loops of specimens

定;试件受压时,荷载随着位移的增大而增大。产生这种现象的原因:①试件尺寸按缩比设计,钢内芯截面尺寸较小,试件受拉时,随着位移的增大,很快达到屈服强度;②试件受压时,钢内芯产生屈曲变形,与外围约束单元挤压,发生相对滑移而产生摩阻力,随着位移的增加,承载力逐渐增大。

3) 试件在受压的过程中,荷载随位移变化时有一定波动,使得滞回曲线不光滑,造成这种现象的原因是支撑试件在受压过程中,端部具有一定的转动,且由于外围胶合木约束接触挤压,产生了一定局部变形。

4) 试件BS₂滞回曲线最为饱满,其次是试件BS₁,说明外围约束作用越强,木壳屈曲约束支撑滞回曲线越饱满。

3.3 骨架曲线

通过滞回曲线分析得到每个试件的骨架曲线,如图8所示,对比分析结果如下。

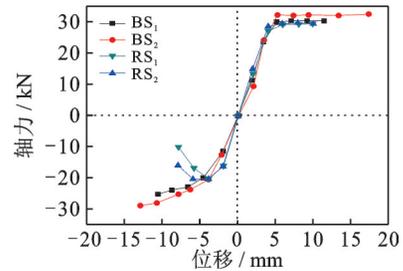


图8 各试件骨架曲线

Fig.8 Skeleton curve of specimens

1) 各试件的骨架曲线具有明显的屈服平台,骨架曲线呈两折线特征,初始刚度较接近。试件的不同构造对试件的初始刚度影响不大。在拉力作用下不同构造试件的极限承载力差别也不大。

2) 由于钢内芯局部屈曲失稳,试件RS₁,RS₂受压承载力在加载后期有不同程度的降低。试件BS₁,BS₂随着反向位移增加,承载力继续增加。试件BS₂的极限位移比BS₁提高了30%。

3.4 延性

根据文献[14]中的延性系数 μ 来表达结构的延性特征,延性系数是结构破坏荷载对应的位移 Δ_f 与屈服荷载对应的位移 Δ_y 的比值,其表达式为

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

取骨架曲线斜率转折点为屈服点,屈服位移、破坏位移及延性系数如表2所示,其中端部加强的试件BS₂的延性最好,为BS₁的1.4倍,这表明增加对钢内芯的约束作用,能有效提高木壳屈曲支撑的延性。

表2 试件延性系数

Tab.2 Ductility value of specimens

试件	荷载方向	Δ_y/mm	Δ_f/mm	μ	平均值
RS ₁	正向	3.89	8.00	2.11	2.06
	反向	3.79	8.00	2.01	
RS ₂	正向	3.88	9.00	2.31	2.29
	反向	3.96	9.00	2.27	
BS ₁	正向	3.94	12.00	3.08	2.83
	反向	3.89	10.00	2.57	
BS ₂	正向	4.02	18.00	4.48	4.00
	反向	3.98	14.00	3.52	

3.5 耗能能力

等效黏滞阻尼系数 ξ_{eq} 是判断结构耗能能力的重要指标,等效黏滞阻尼系数计算图如图9所示,等效黏滞阻尼系数定义为

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{S_{(ABC+ADC)}}{S_{(OFD+OBE)}} \right) \quad (2)$$

其中: $S_{(ABC+ADC)}$ 为图9中滞回曲线所包围的面积; $S_{(OFD+OBE)}$ 为三角形 OFD 与 OBE 的面积之和。

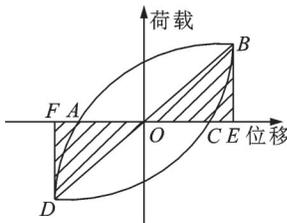


图9 等效黏滞阻尼系数计算图

Fig.9 Calculation diagram of equivalent viscous damping ratio

各试件在每一级加载圈内的等效黏滞阻尼系数如图10所示,从中可以分析得出:

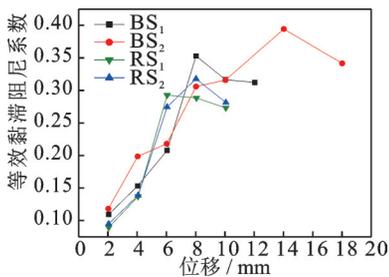


图10 试件等效黏滞阻尼系数曲线

Fig.10 Curves of equivalent viscous damping ratio

1) 各试件等效黏滞阻尼系数随着加载位移的增大而增大,直至支撑破坏退出工作;

2) 屈服后正常耗能工作阶段等效黏滞阻尼系数远大于《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[15]中规定的阻尼比 0.05,说明4个试件的构造形式是

较合理的;

3) 经内衬钢板增强的木壳屈曲约束支撑具有更有效的抗震耗能能力,试件 BS₂ 与 RS₂ 相比最大等效黏滞阻尼系数提高了约 24%,表明钢内芯外围约束作用越大,等效黏滞阻尼系数越大。

图11和图12分别为试件各级位移下的耗能与各试件累计耗能,从中可以分析得出:

1) 随着位移增大,试件 BS₁ 和 BS₂ 的耗能能力不断增加,直至支撑破坏后,其耗能能力开始下降;

2) 对比试件 RS₁ 和 RS₂, BS₁ 和 BS₂ 的累计耗能表明,通过增加外围约束刚度的木壳屈曲约束支撑的耗能效果最为明显;

3) 对于端部加强的试件 BS₂,由于外围约束单元对钢内芯的约束更好,其钢内芯受压屈曲后的位移更大,支撑耗能效果最好,其累计耗能分别为试件 RS₁, RS₂, BS₁ 的 4.7 倍、4.1 倍和 1.7 倍。

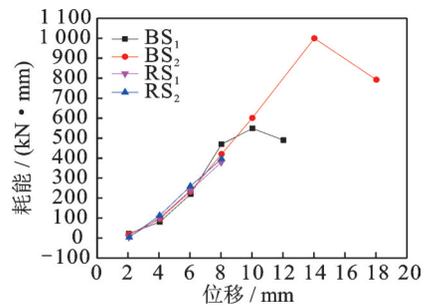


图11 试件各级位移下的耗能

Fig.11 Energy dissipation specimens in each displacement level

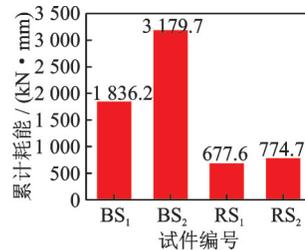


图12 各试件累计耗能

Fig.12 Total energy dissipation of specimens

3.6 刚度退化

根据《建筑抗震试验方法规程》^[14],试件的刚度可用割线刚度来表示,割线刚度 K_i 的计算公式为

$$K_i = (|F_i^+| + |F_i^-|) / (|\Delta_i^+| + |\Delta_i^-|) \quad (3)$$

其中: F_i^+ 与 F_i^- 分别为第 i 次循环正向和反向峰值荷载; Δ_i^+ 与 Δ_i^- 分别为第 i 次循环正向和反向的峰值位移。

定义 K_0 为初始实测割线刚度, x 为位移, x_y 为实测屈服位移。以 x/x_y 为横坐标,以 K/K_0 为纵坐标,通过将刚度和位移无量纲化,得到支撑试件实测刚

度随位移的退化规律曲线,如图13所示。可以看出:试件BS₁与BS₂屈服前,刚度退化缓慢,支撑屈服后,刚度出现明显退化;在加载初期,与试件RS₁与RS₂相比,试件BS₁与BS₂刚度退化较慢。

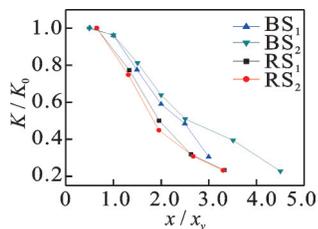


图13 刚度退化曲线

Fig.13 Curves of stiffness degradation

4 结 论

1) 由于外围约束胶合木横纹方向弹性模量较小,无内衬钢板增强的木壳屈曲约束支撑试件易产生钢内芯拉断与钢内芯局部屈曲破坏。经内衬钢板增强的试件钢内芯出现明显的多波屈曲。提高外围约束单元的刚度,可以减小木壳屈曲约束支撑的局部失稳现象。

2) 木壳屈曲约束支撑的滞回曲线具有典型的梭形特性。经内衬钢板增强的木壳屈曲约束支撑滞回曲线更为饱满,耗能能力优良,刚度退化较慢。

3) 木壳屈曲约束支撑骨架曲线具有明显的屈服平台,支撑屈服后表现出明显的刚度退化。无内衬钢板增强的木壳屈曲约束支撑受压承载力在加载后期有不同程度的下降。经内衬钢板加强的木壳屈曲约束支撑屈服后,随着位移增加,承载力继续增加。

4) 内衬钢板能有效提高木壳屈曲约束支撑的延性及耗能能力。经端部加强的木壳屈曲支撑累计耗能约为无端部加强支撑试件的4.7倍、4.1倍与1.7倍。提高木壳屈曲约束支撑的外围约束作用,能有效提高木壳屈曲约束支撑的受力性能和耗能能力。

参 考 文 献

[1] 熊海贝,刘应扬,杨春梅,等. 梁柱式胶合木结构体系抗侧力性能试验[J]. 同济大学学报,2014,42(8):1167-1175. XIONG Haibei, LIU Yingyang, YANG Chunmei, et al. Experimental study on lateral resistance of glued-laminated timber post and beam systems [J]. Journal of Tongji University, 2014,42(8):1167-1175. (in Chinese)

[2] 熊海贝,李冰阳,刘应扬,等. 梁柱式木框架-支撑体系低周反复试验研究[J]. 结构工程师,2015,31(1):147-154. XIONG Haibei, LI Bingyang, LIU Yingyang, et al. Experimental study on timber post and beam frame-brace

structure systems under lateral cyclic loading[J]. Structural Engineers, 2015,31(1):147-154. (in Chinese)

- [3] 李昌春. 梁柱式木结构框架体系抗震性能试验研究[D]. 南京:南京工业大学,2010.
- [4] 许清风,张富文,马瑜蓉,等. 五层梁柱式胶合木结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(12):56-66. XU Qingfeng, ZHANG Fuwen, MA Yurong, et al. Shaking table test on a five-story post-and-beam glulam structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12):56-66. (in Chinese)
- [5] 周云. 防屈曲耗能支撑结构设计与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:12-14.
- [6] TAKEUCHI T, HAJJAR J, MATSUI R, et al. Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66 (2):139-149.
- [7] USAMI T, WANG C, FUNAYAMA J, et al. Low-cycle fatigue tests of a type of buckling restrained braced [J]. Procedia Engineering, 2011,120(14):956-964.
- [8] OGAWA K, NAKAGOMI T, WAKAI R. Experimental study on brittle fracture of buckling-restrained braces: tests of core plates with welding[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2011, 76: 667-674.
- [9] 陆斌斌. 采用碳纤维与玄武岩纤维包裹装配式防屈曲支撑性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [10] BLOMGREN H, KOPPITZ J, ABEL D, et al. The heavy timber buckling-restrained braced frame as a solution for commercial buildings in regions of high seismicity[C]//World Conference on Timber Engineering. Vienna: Engineering, 2016.
- [11] 张峰. 钢-木屈曲约束支撑抗震性能研究[D]. 南京:南京工业大学,2015.
- [12] 高怡斐,梁新帮,董莉,等. GB/T228.1—2010 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [13] JAMES M, TONY C, ROGER E, et al. ANSI/AISC 341: seismic provisions for structural steel buildings[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [14] 程绍革,史铁花,白霜花,等. JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [15] 黄世敏,王亚勇,戴国盈,等. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.



第一作者简介:陆伟东,男,1970年1月生,教授、博士生导师。主要研究方向为木结构工程。曾发表《考虑局压效应的榫卯节点力学性能研究》(《建筑结构学报》2019年第40卷第9期)等论文。

E-mail: wdlu@njtech.edu.cn