

国产 TJI 型屈曲约束支撑的研制与试验

李国强^{1,2}, 胡宝琳³, 孙飞飞^{1,2}, 郭小康^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 上海大学 土木系, 上海 200072)

摘要: 采用国产 Q195/Q235 钢材开发研制了一种新型屈曲约束支撑, 即 TJI 型屈曲约束支撑. 给出了支撑的设计方法和构造要求, 以及支撑芯板材料性能要求与支撑性能标准; 对 TJI 型屈曲约束支撑进行了往复加载试验. 结果表明, 此种屈曲约束支撑具有很好的滞回特征和耗能性能, 是一种十分有效的耗能构件, 可以大大提高建筑结构的抗震性能.

关键词: TJI 型屈曲约束支撑; 构造要求; 静力往复试验; 开发研制; 设计方法

中图分类号: TU 317

文献标识码: A

Development And Experimental Study on Domestic TJI Buck-restrained Brace

LI Guoqiang^{1,2}, HU Baolin³, SUN Feifei^{1,2}, GUO Xiaokang^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Domestic Q195/235 steel was adopted to produce a new type of buckling-restrained brace, TJI buck-restrained brace. The design and structural requirements of brace were proposed. Moreover, the performance requirements of steel core and testing standards of TJI buck-restrained brace were put forward, too. Cyclic loading test was conducted on TJI buckling-restrained brace. The experimental result shows that the buckling-restrained brace has better hysteretic characteristic and ability of seismic resistance, which is an effective member for energy dissipation. As a result, the ability for seismic resistance of structure improves greatly.

Key words: TJI buckling-restrained brace; structural requirement; cyclic loading test; exploitation and development; design method

近年来, 屈曲约束支撑因其具有承受轴向压力不会发生屈曲、受拉与受压承载力相当、滞回曲线饱满、良好的耗能能力和低周疲劳性能等优点^[1-6], 在美国、日本、我国台湾地区等的高层建筑中颇受青睐. 美国在 1994 年 Northridge 地震后, 开始进行屈曲约束支撑钢结构体系的研究, 2000 年建成了美国第一栋使用屈曲约束支撑作为抗侧力构件的建筑, 目前已建成或正在建造的使用屈曲约束支撑的结构达 30 余栋. 日本在 1995 年神户地震后大量使用屈曲约束支撑体系, 目前此类建筑已有 250 余栋^[3]. 我国台湾地区在屈曲约束支撑的研究和使用方面也取得了很多成果.

目前, 我国对屈曲约束支撑的研究还很少, 极少量的工程所采用的屈曲约束支撑都是来自国外进口, 其中绝大多数是购自日本新日铁的产品. 日本新日铁所生产的屈曲约束支撑价格较昂贵, 在我国建筑市场上难以普及. 为了能够使屈曲约束支撑在我国建筑市场上普及使用, 必须开发出符合我国自己钢材生产能力与钢结构加工能力的国产屈曲约束支撑. 美国、日本所用屈曲约束支撑的芯材均用低屈服钢制成. 根据我国的钢材标准, 本文采用国产 Q195/Q235 低屈服点钢材开发研制了一种新型屈曲约束支撑(TJI 型). 这种新型支撑与已有屈曲约束支撑区别在于: ①材料均为国产; ②在钢套管内没有采用填充材料, 完全通过钢套管内的加劲肋等构造措施为支撑芯板提供稳定的约束作用, 避免受压芯材在弹性和塑性阶段下的屈曲问题. 通过对 TJI 型屈曲约束支撑进行系统的试验检验, 证明此种屈曲约束支撑具有稳定的滞回特征和很好的耗能性能, 是一种十分有效的耗能构件, 满足罕遇地震作用下建筑结构 1/50 的楼层位移变形要求; 用于多高层建

收稿日期: 2009-10-23

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ01B02); 上海市博士后资助计划(10R21413000)

第一作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多高层建筑钢结构及钢结构抗火.

E-mail: gqli@tongji.edu.cn

通讯作者: 胡宝琳(1980—), 男, 工学博士, 主要研究方向为多高层建筑钢结构. E-mail: hubaolintz@163.com

筑,可以大大提高结构的抗震性能.

尽管很多研究者对屈曲约束支撑进行了大量的试验研究,但多数都是性能研究,尤其在国内,较少有人对屈曲约束支撑本身结构构造进行研究,再加上目前国外大部分关于屈曲约束支撑的研究成果属专利,不予公开,这对笔者的研制带来了一定的困难.为了在我国推广使用这项技术,笔者利用国产钢材制成 TJI 型屈曲约束支撑,并作了一系列的试验验证.

1 屈曲约束支撑芯板材料性能要求与支撑性能标准

1.1 支撑芯板材料性能要求

钢材屈服点越低,一般延性也越好,更适合于用作屈曲约束支撑的芯板.但是,屈曲约束支撑从本质上讲并不要求一定采用极低屈服点钢材,只要材料性能满足要求,即可达到屈曲约束支撑的基本性能需求.芯板材料性能的具体要求为:①强屈比不应小于 1.2,②伸长率应大于 25%,③应具有 0℃下 27 J 冲击功韧性.

Q235, Q195 钢材和国产低屈服点钢材均能达到上述要求.

1.2 屈曲约束支撑性能标准

1.2.1 AISC(American Institute of Steel Construction inc)对屈曲约束支撑反复加载的要求

Sabelli 采用 20 个地面水平加速度记录,对 6 层屈曲约束支撑框架进行了非线性时程分析,经结果统计分析后得到如下结论:结构层间位移中值为 1.6%,均值加 1 倍方差为 2.2%,且结构平均残余变形约为最大变形的 40%~60%^[6].为了使屈曲约束支撑能够有足够的延性和低周疲劳性能,以保证其在地震荷载作用下满足楼层侧移变形要求和不发生疲劳破坏,根据 Sabelli 上述研究成果以及 AISC 抗震规程(2005)附录 T,对屈曲约束支撑反复加载试验作出了规定:要求每个测试的支撑需要有相应于 1.5 倍设计层间位移的延性,这一延性性能以反应值的平均值来表征.此外,该规定要求支撑的累积非弹性轴向变形要达到 200 倍的屈服变形.

定义 D_{by} 为第 1 个屈服点的轴向变形值, D_{bm} 为相应于设计允许层间位移时的变形值. AISC 加载过程为:①相应于 D_{by} 变形的 2 个加载循环;②相应于 $0.5D_{bm}$ 变形的 2 个加载循环;③相应于 D_{bm} 变形的 2

个加载循环;④相应于 $1.5D_{bm}$ 变形的 2 个加载循环;⑤相应于 $2.0D_{bm}$ 变形的 2 个加载循环;然后继续以相应于 $1.5D_{bm}$ 的变形循环加载至累积非弹性轴向变形达到 200 倍的屈服变形.

计算 D_{bm} 时,设计层间位移不应小于 0.01 层高.

1.2.2 屈曲约束支撑建议标准

通过试验加载方案的改进,本文给出了屈曲约束支撑建议标准,即将屈曲约束支撑的抗震性能分为两级,七度区甲、乙类钢结构建筑和高度大于 100 m 的高层钢结构建筑以及八度、九度区的钢结构建筑应采用 B 级屈曲约束支撑,其他钢结构建筑可采用 A 级屈曲约束支撑.其中 A 级和 B 级的屈曲约束支撑应满足下列要求:

A 级——依次在 $1/300, 1/200, 1/100$ 支撑长度的拉伸和压缩往复各 3 次变形下,屈曲约束支撑应具有稳定、饱满的滞回曲线;

B 级——依次在 $1/300, 1/200, 1/100, 1/80$ 支撑长度的拉伸和压缩往复各 3 次变形下,屈曲约束支撑应有稳定、饱满的滞回曲线.

本文所给屈曲约束支撑建议标准有如下优点:

(1) 一般情况下,支撑变形率 δ_b/l 与层间位移角 Δ/h 是 $1/2$ 的关系(图 1),即 $\delta_b = \Delta/2h$.其中, h 为建筑的层高, Δ 为建筑的层间位移.也就是说,当层间位移角达到 $1/50$ 时,相对应支撑的变形率是 $1/100$,所以支撑 $1/100$ 的变形要求,一般情况下可以满足我国抗震设计规范所规定的罕遇地震情况下建筑结构 $1/50$ 的楼层位移变形要求.

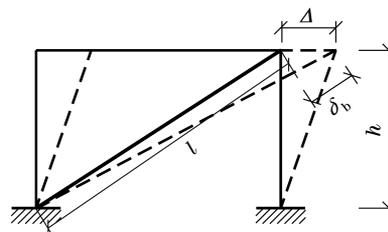


图 1 支撑变形 δ_b 与层间位移 Δ 的关系

Fig.1 Relation of brace deformation and floor displacement

(2) 一般情况下,按本建议试验加载要求进行加载,实验后累积塑性变形均可达到 200 倍屈服变形的要求.

(3) 试验过程简便,不必在试验时寻找支撑的屈服力,只需要按上述加载制度加载即可.

(4) 根据建筑的抗震要求,将屈曲约束支撑的抗震性能分为两级,这在满足抗震要求的前提下,降低了一般建筑使用屈曲约束支撑的成本.

2 TJI 型屈曲约束支撑的设计与构造

2.1 TJI 型屈曲约束支撑的技术特点

2.1.1 组成形式

TJI 型屈曲约束支撑芯板的约束屈服段采用一字形,套筒采用方形或矩形钢管,一字形芯板与套管的一对侧面平行.套筒与芯板之间无填充材料.

2.1.2 芯板用材

芯板用材可以选用国产 Q235B, Q195B 和国产低屈服点钢材(Q160 或 Q225).

2.2 TJI 型屈曲约束支撑设计要点

2.2.1 屈曲约束支撑的强度要求

屈曲约束支撑轴向受拉和受压的屈服承载力可表示为

$$F_d = R_y f_y A_1 \quad (1)$$

式中: F_d 为轴向受拉和受压屈服承载力; R_y 为芯板钢材的超强系数,按表 1 查取; A_1, f_y 分别为约束屈服段的截面面积及屈服强度.

表 1 芯板钢材的超强系数 R_y 和应变强化调整系数 ω

Tab.1 Overstrength and strain strengthening factors of steel core

| 材料型号 | R_y | ω |
|------------|-------|----------|
| Q235 | 1.15 | 1.6 |
| Q195 | 1.15 | 1.6 |
| 低屈服点钢 Q225 | 1.13 | 1.6 |
| 低屈服点钢 Q160 | 1.14 | 2.4 |

2.2.2 套筒的设计要求

屈曲约束支撑构件在多遇地震和罕遇地震作用下,应不发生整体屈曲.屈曲约束支撑构件的整体弹性

屈曲荷载与约束屈服段的屈服承载力的比值应满足

$$\frac{\pi^2 EI_1}{l^2 \omega F_d} \geq 1.2 \quad (2)$$

式中: E, I_1 分别为套筒钢材弹性模量和套筒的整体刚度; l 为屈曲约束支撑构件的长度; ω 为应变强化调整系数,按表 1 查取.

屈曲约束支撑构件的板件在多遇地震和罕遇地震作用下,应不发生局部屈曲.无约束非屈服段(连接段)的板件外伸宽厚比应满足

$$\frac{b}{t} \leq 13 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3)$$

式中: b, t 分别为无约束非屈服段钢板的外伸宽度和厚度.

2.2.3 节点设计

节点设计时除按节点设计要求考虑外,还要考虑支撑最大轴压大于最大轴拉比、材料超强及应变硬化等效应的影响.建议承载力应满足下式要求:

$$F_c \geq 1.2 \omega F_d \quad (4)$$

式中: F_c 为受屈曲约束支撑轴力的连接作用力设计值.

节点连接高强度摩擦型螺栓的数量 n 可由下式求得(图 2):

$$n \geq \frac{F_c}{0.9 n_f \mu P} \quad (5)$$

式中: n_f 为传力摩擦面数目; μ 为摩擦面的抗滑移系数,按表 2 查取; P 为每个高强螺栓的预拉力,按表 3 查取.图 2 中 d 为高强螺栓孔径; t 为支撑节点板厚度; w 为支撑节点板宽度; t_s 为连接板厚度; t_r 为连接板加劲肋厚度; e, e_2, s_1, \dots, s_6 分别为高强螺栓距离构件边缘或高强螺栓间的距离.

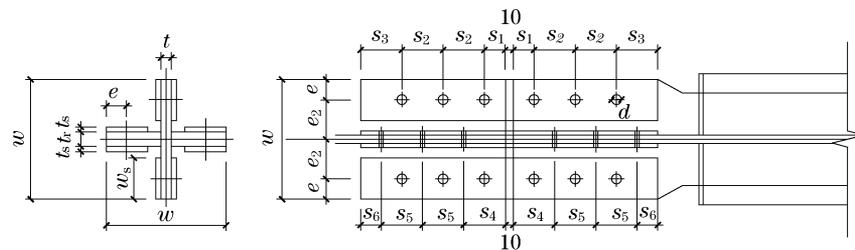


图 2 节点示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of connection (unit:mm)

2.3 改进后支撑构造设计与构造要点

2.3.1 构造设计

TJI 型屈曲约束支撑完全通过钢套管内的加劲肋等构造措施为支撑芯板提供稳定的约束作用,在钢套管内不采用填充材料,是一种纯钢型屈曲约束

支撑(图 3).

2.3.2 构造要点

套筒必须能够对芯板的平面外屈曲有良好的约束作用,不然芯板将发生平面外屈曲,进而挤压套筒壁板,使壁板发生鼓曲破坏(图 4);本构件采用对套

筒加肋板,使肋板与芯板顶紧的构造措施来达到这一目的.

表 2 摩擦面的抗滑移系数 μ 值

| 在连接处构件表面的处理方法 | 构件的钢号 | | |
|---------------|-------|------|------|
| | 低屈服钢 | Q195 | Q235 |
| 喷砂(丸) | 0.35 | 0.40 | 0.45 |

表 3 每个高强度螺栓预拉力 P 值

| 螺栓公称直径/mm | P /kN | |
|-----------|---------|--------|
| | 8.8 级 | 10.9 级 |
| 16 | 80 | 100 |
| 20 | 125 | 155 |
| 22 | 150 | 190 |
| 24 | 175 | 225 |
| 27 | 230 | 290 |
| 30 | 280 | 355 |

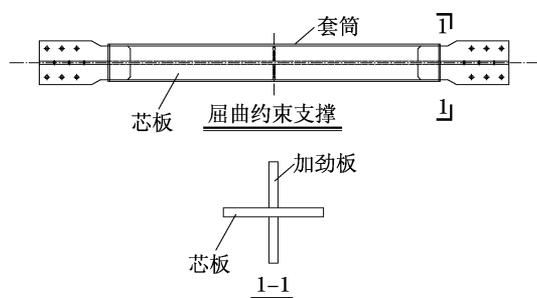


图 3 屈曲约束支撑构造示意图

Fig.3 Schematic diagram of composition of buckling-restrained brace

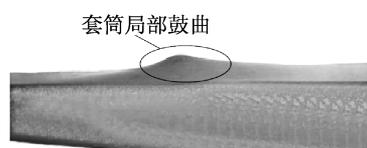


图 4 钢套管的鼓曲

Fig.4 Local buckling of steel tube

在支撑的无约束非屈曲段的变截面处很容易发生平面外失稳,本构件采用套筒端部封板顶紧的方法来解决这一问题.

在芯板端部加劲板边缘(即约束非屈曲段边缘)处,很容易进入塑性,形成塑性铰,使整个支撑芯板端部在此处发生刚性转动,这样在塑性铰转动处就会给套筒施加一个非常大的集中力,使套筒产生局部鼓出.为了解决这一问题,本构件采用对套筒壁板加肋的方法,既加强了套筒壁板的平面外刚度,又使套筒能够很好地对芯板起到约束作用.

3 TJI 型屈曲约束支撑的试验验证

屈曲约束支撑的往复加载试验,采用了目前国内领先、国际先进的 10 MN 多功能结构试验系统.目的是研究屈曲约束支撑在地震作用下的工作性能、耗能能力和破坏特征.试验加载装置如图 5 所示.

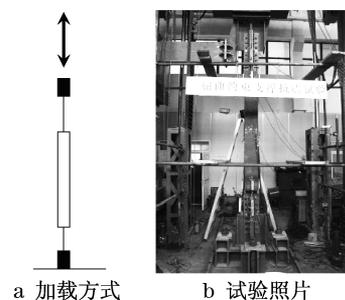


图 5 试验加载装置与加载方式

Fig.5 Test setup and loading mode

3.1 滞回曲线

通过上述方法改进设计后,支撑完全克服了以上 3 种破坏形式,滞回曲线十分饱满(如图 6—11 所示),具有良好的耗能能力和低周疲劳性能.

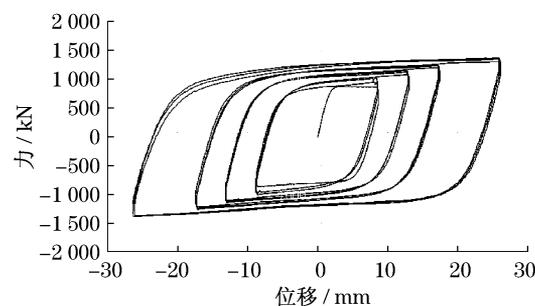


图 6 改进设计后的屈曲约束支撑滞回曲线 (Q195 低屈服点钢, 试件 1)

Fig.6 Hysteretic curve of the improved TJI buckling-restrained brace

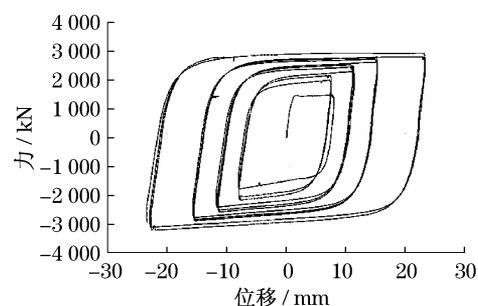


图 7 改进设计后的屈曲约束支撑滞回曲线 (Q160 低屈服点钢, 试件 2)

Fig.7 Hysteretic curve of the improved TJI buckling-restrained brace (Q160, Specimen 2)

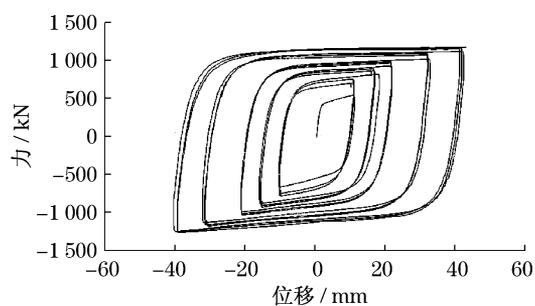


图8 改进设计后的屈曲约束支撑滞回曲线
(Q160 低屈服点钢,试件3)

Fig.8 Hysteretic curve of the improved TJI buckling-restrained brace (Q160, Specimen 3)

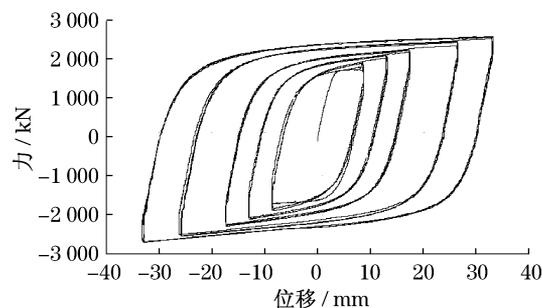


图10 改进设计后的屈曲约束支撑滞回曲线
(Q195 低屈服点钢,试件5)

Fig.10 Hysteretic curve of the improved TJI buckling-restrained brace (Q195, Specimen 5)

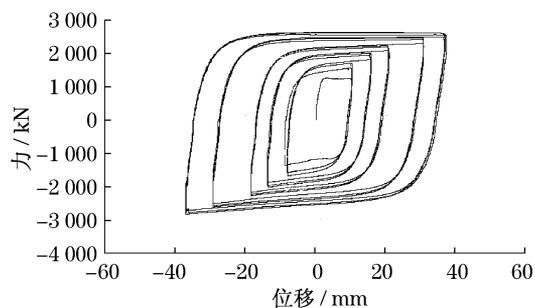


图9 改进设计后的屈曲约束支撑滞回曲线
(Q160 低屈服点钢,试件4)

Fig.9 Hysteretic curve of the improved TJI buckling-restrained brace (Q160, Specimen 4)

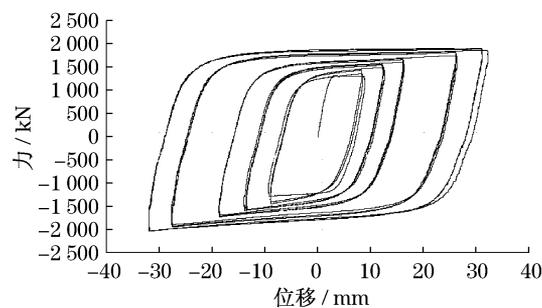


图11 改进设计后的屈曲约束支撑滞回曲线
(Q225 低屈服点钢,试件6)

Fig.11 Hysteretic curve of the improved TJI buckling-restrained brace (Q225, Specimen 6)

3.2 试验数据分析

支撑的屈服力、最大拉力、最大压力、最大拉压

比、强化系数、最大变形率、屈服变形及累积塑性变形等如表4所示。

表4 试验数据分析

Tab.4 Experimental data analysis

| 序号 | 材料 | 屈服力/kN | 最大拉力/kN | 最大压力/kN | 最大压拉比 | 强化系数 | 最大变形率 ¹⁾ | 屈服变形/mm | 累积塑性变形与屈服变形比值 |
|----|------|--------|---------|---------|-------|------|---------------------|---------|---------------|
| 1 | Q195 | 870 | 1 356 | 1 360 | 1.00 | 1.57 | 1/100 | 1.73 | 376 |
| 2 | Q160 | 1 440 | 2 931 | 3 223 | 1.10 | 2.23 | 1/100 | 0.90 | 561 |
| 3 | Q160 | 480 | 1 178 | 1 248 | 1.06 | 2.59 | 1/80 | 1.59 | 837 |
| 4 | Q160 | 1 210 | 2 563 | 2 813 | 1.10 | 2.32 | 1/80 | 1.45 | 842 |
| 5 | Q195 | 1 720 | 2 511 | 2 657 | 1.06 | 1.54 | 1/80 | 2.77 | 361 |
| 6 | Q225 | 1 300 | 1 854 | 1 994 | 1.08 | 1.53 | 1/80 | 2.00 | 483 |

1)最大变形率定义为 $\Delta L/L_0$, $\Delta L = L_1 - L_0$, 其中 L_0 为试件原始长度, L_1 为试验变形后长度。

根据表4中试验数据分析可知,所有试件均能满足屈曲约束支撑建议标准的要求,具有1/50层高侧移的反复变形能力,且累积塑性变形均大于200倍的屈服变形.说明TJI型屈曲约束支撑满足屈曲约束支撑性能要求,具有良好的延性、耗能能力和低周疲劳性能。

4 TJI型屈曲约束支撑与国外屈曲约束支撑综合对比

4.1 性能

针对日本新日铁公司生产的屈曲约束支撑和TJI型屈曲约束支撑,取芯板材料和截面、支撑规格及承载力等都相同的两种支撑进行性能对比可知,

两者均具有良好的滞回耗能能力和抗低周疲劳性能(图 12).

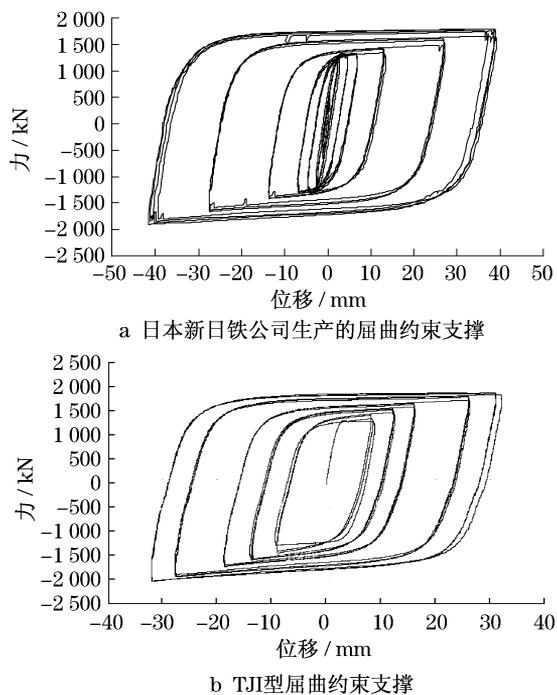


图 12 屈曲约束支撑性能比较

Fig. 12 Capability comparison of buckling-restrained brace

4.2 造价与制作

对上海某一工程使用的屈曲约束支撑进行对比,在同样条件下采用日本新日铁公司生产的屈曲约束支撑和 TJI 型屈曲约束支撑的造价及制作周期如表 5 所示.

表 5 屈曲约束支撑造价及制作周期对比

Tab.5 Comparison of production cost and cycle time for buckling-restrained brace

| 支撑类别 | 造价/(万元·根 ⁻¹) | 制作周期/月 | 所用材料 |
|-------|--------------------------|--------|---------|
| TJI | 2.5 | 3.0 | 国产钢材 |
| 日本新日铁 | 3.5 | 6.5 | 新日铁低屈服钢 |

从表中可以看出,TJI 型屈曲约束支撑的造价仅是日本新日铁公司生产的 70%左右,生产周期也比日本新日铁节省一半以上.

5 结论

本文研制的 TJI 型屈曲约束支撑,在通过试验发现支撑薄弱环节的基础上,采取适当加强措施,克服了以上 3 种破坏形式.通过改进设计后的试验结果可知,利用国产钢材制作的 TJI 型屈曲约束支撑,构造合理、滞回曲线饱满、具有良好的耗能能力和低周疲劳性能,且具有 1/50 层高侧移的反复变形能力,是一种性能良好的耗能构件.由于 TJI 型屈曲约束支撑实现了材料与制作的国产化,形成了具有我国自主知识产权的产品,因此使这种支撑的成本大大降低,为推广应用奠定了基础.

致谢: 特别感谢刘猛硕士在本文试验中给予的帮助.

参考文献:

- [1] Chen C C, Wang C H, Hwang T C. Buckling strength of buckling inhibited braces [C]//Proceedings, 3rd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures. Taipei:[s. n.],2001:265-271.
- [2] 蔡克铨,黄彦智,翁崇兴.双管式挫屈束制支撑之耐震行为与应用[J].建筑钢结构进展,2005,7(3):1. TSAI Kehchuan, HWANG Yeanchih, WENG Chungshing. Seismic performance and applications of double-tube buckling-restrained braces[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005,7(3):1.
- [3] 汪家铭,中岛正爱.屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(I)[J].建筑钢结构进展,2005,7(1):1. WANG Chiaming, Masayoshi Nakashima. The practice and research development of buckling-restrained braced frames (I)[J]. Progress in Steel Building Structures,2005,7(1):1.
- [4] 汪家铭,中岛正爱.屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(II)[J].建筑钢结构进展,2005,7(2):1. Wang Chiaming, Masayoshi Nakashima. The practice and research development of buckling-restrained braced frames (II)[J]. Progress in Steel Building Structures,2005,7(2):1.
- [5] 胡宝琳,李国强,孙飞飞.屈曲约束支撑体系的研究现状及其国内外应用[J].四川建筑科学技术研究,2007,33(4):9. HU Baolin, LI Guoqiang, Sun Feifei. The current research and application of home and abroad of buckling-restrained brace[J]. Sichuan Building Science,2007,33(4):9.
- [6] Sabelli R, Mahin S, Chang C. Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling restrained braces[J]. Engineering Structures,2003,25(5):655.