

文章编号:1673-9469(2009)01-0005-05

国产 TJ-I 型屈曲约束支撑的性能研究

孙飞飞,刘 猛,李国强,郭小康,胡宝琳
(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:结合国内外研究和工程现状,以世博会场馆工程为背景,采用国产低屈服点钢(LYP160MPa), Q195,特制低屈服点钢材(LYP225MPa)作为芯材,研制出新型 TJ-I 型屈曲约束支撑。经过一系列试验研究和理论分析,确定了合理的构造和设计准则,研制出更大吨位的并能实际应用于世博会场馆的支撑。在同济大学建筑结构实验室进行了一系列的低周往复加载试验中,本文选取了 10 根试件的试验结果,设计屈服吨位分别为 40kN、90kN、120kN、130kN、160kN、180kN。通过对试验结果和现象的总结和理论分析,我们可以清晰地看到支撑性能的稳步提高。试验结果表明,TJ-I 型屈曲约束支撑具有良好的滞回性能和低周疲劳性能,与国外同类产品的性能相当,是一种十分有效的耗能构件。此次试验采用了宝山钢铁厂生产的国产低屈服点钢,促进了低屈服点钢在抗震工程领域中的应用。

关键词:TJI 型屈曲约束支撑;研制;滞回特征;耗能能力;弹塑性屈曲

中图分类号: TU391

文献标识码: A

Improvement and experimental study of domestic TJ-I Type Buckling - Restrained Brace

SUN Fei-fei, LIU Meng, LI Guo-qiang, GUO Xiao-kang, HU Bao-lin
(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Combined with the research and projects status at home and abroad, based on the Exquisite museum project, the newly - developed Domestic TJ - I Buckling - Restrained Braces (TJI BRB), adopted domestic low yield point steel(LYP160MPa), Q195, specially made low yield point steel(LYP225MPa) as the core material, were presented in this paper. By a series of experimental research and theoretical analysis, we refined the existing conformations constantly, and ascertained the reasonable design procedure, which facilitated the application of the TJI BRB with greater yielding force that will be implemented in exquisite museum. Ten specimens, whose yielding forces are 400kN, 900kN, 1200kN, 1300kN, 1600kN, 1800kN separately, are selected from the low cyclic loadings tests carried out in the building structure laboratory in Tongji university. By the summary of the test phenomenon and theoretical analysis, we can observe the steady improvement of the property of the specimens clearly. The TJI BRB, as the eventual experiment results indicated, illustrated steady hysteretic properties and outstanding fatigue characters, which are competitive to the parallel oversea products and is deemed as an effective damping device. By the adoption of the domestic low yield point steel, the research result can promote the application of the low yield point steel in aseismic engineering.

Key words: TJI Buckling - Restrained Brace; development; hysteretic property energy dissipation; elasto - plastic buckling

屈曲约束支撑作为一种新型的耗能支撑,能给结构提供足够的刚度,小震下跟普通支撑性能类似,大震下能根据其独特的约束机制,使得芯板

屈服但不屈曲,从而达到耗散地震输入能量的要求。同时,屈曲约束支撑又能很好地体现能力设计的概念,在结构中设置特定的“牺牲构件”,地震

时通过牺牲构件屈服来耗能,并且改变结构整体的动力特性,从而达到了耗能减震的效果。

目前世界上使用屈曲约束支撑最广泛的国家之一的日本,已经有三十多年的历史,并且已经有200栋以上的建筑采用屈曲约束支撑。新日铁公司生产的屈曲约束支撑的约束机制,是通过在外套筒和内芯板之间填入混凝土作为约束,并在芯板和混凝土的接触面上贴上一层无粘结材料,使芯板能无摩擦地滑动并在受压时提供变形的余地。台湾大学的蔡克铨教授等也提出了双管式屈曲约束支撑,具有其独特的节点头形式。

同济大学多高层钢结构及钢结构抗火研究室李国强等研制的国产 TJ-I 型屈曲约束支撑具有独特的全钢约束机制,实验结果表明,采用宝钢特制的国产低屈服点钢材作为芯板材料,其性能已经和国际先进水平相当。本文将对该屈曲约束支撑的一些列试验结果作出分析,并和理论进行对比,展示了该种支撑良好的滞回耗能能力,和抗疲劳特性,并为今后的研究提出展望。

1 试验背景

屈曲约束支撑所要具备的性能指标中,最重要的一条就是地震作用下支撑的变形能力,以及刚度和强度是否退化。简言之,就是是否具有饱满、稳定、变力量大的滞回曲线。根据弹塑性层间位移角限值的规定^[1]:多高层钢结构的最大层间位移角为 1/50。根据图 1 的安装方式,支撑的变形率为

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{\frac{H}{50} \cos \alpha}{\frac{H}{\sin \alpha}} = \frac{1}{50} \cos \alpha \sin \alpha \quad (1)$$

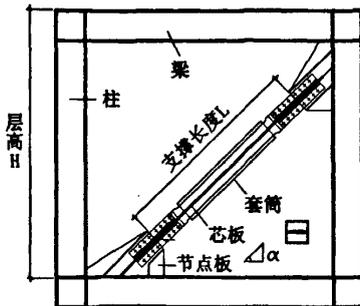


图1 支撑安装示意图

Fig. 1. Installation of BRB

为了能最大限度地发挥支撑刚度对框架的贡献,一般 α 取 $30^\circ \sim 60^\circ$,结合工程实际,近似地将

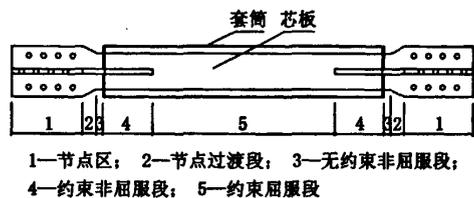
取 45° 。则上式可写为

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{\frac{H}{50} \cos \alpha}{\frac{H}{\sin \alpha}} = \frac{1}{50} \cos \alpha \sin \alpha = \frac{1}{100} \quad (2)$$

即当支撑变形率为 1/100 时,对应的楼层层间位移角为 1/50,这是我们评估屈曲约束支撑性能指标的一个重要参数。

2 支撑的构造设计

经过一系列前期试验,逐渐确定了 TJ-I 型屈曲约束支撑的构造和连接形式^[2](如图 2 所示)。



1—节点区; 2—节点过渡段; 3—无约束非屈服段; 4—约束非屈服段; 5—约束屈服段

图2 支撑设计示意图

Fig. 2 Schematic of BR

1 和 2 组成节点区; 1, 2, 3, 4 应通过适当的设计使其保持弹性,即净截面的屈服荷载应当大于约束屈服段的极限强度^[3]。

支撑的材料采用宝钢研制的阻尼器专用低屈服点钢 BLY160(名义屈服强度为 160MPa)、BLY225(名义屈服强度为 225MPa)系列产品,平均延伸率的指标达到了 30%,能很好地满足性能要求。支撑的约束材料,节点板,拼接板都采用普通的 Q345B 钢材。表 1 列举了 6 个材性试件结果。

表 1 Q160 钢材材性试验的结果

Tab. 1 Q160 steel material test results

试件编号	屈服强度 f_y (MPa)	极限强度 f_u (MPa)	断面收缩率 (%)	伸长率 (%)
1	146	265	93	17
2	148	275	92	30
3	166	285	90.5	60
4	164	285	92.5	30
5	166	285	89.5	32.5
6	166	280	89.5	19

各试件的尺寸、截面、设计屈服吨位如表 2 所示。

表2 试验试件
Tab.2 Test specimens

试件编号	试件名	长度
1	Q160-72t-20mm	3143
2	Q160-180t-40mm	3051
3	Q195-180t-26mm	3051
4	Q195-130t-22mm	3051
5	Q160-90t-20mm	3051
6	Q160-180t-40mm	3051
7	Q195-160t-26mm	3051
8	Q160-120t-40mm	3273
9	Q225-120t-26mm	3051
10	Q195-160t-26mm-Rec	3051

注:试验构件命名原则:材料-设计屈服吨位-芯板厚度-备注

3 试验装置设计

3.1 加载装置

本试验在同济大学建筑工程系静力试验室进行。试验采用拉 3×10^3 kN 推 10×10^3 kN 的垂直作动器,直接作用在支撑上进行加载。

3.2 加载制度

分为预加载和正式加载两部分^[4]。预加载主要是察各仪器以及试验安装是否正常,正式加载阶段要得到屈服力、屈服位移、初始刚度以及完整的滞回曲线。正式加载的步骤如下:

- (1)采用位移控制,缓慢加载找到屈服点 D_y 。
- (2)采用三种加载方式:按 A 级标准加载;按 B 级标准加载;不规则加载。

4 试验结果

试验结果显示,TJI 型屈曲约束支撑具有优良的变形能力,并且具有饱满的滞回曲线。在此列出了 A 级曲线,即支撑的变形量达到或超过 1/80 的试件曲线,如图 3 所示。

1) 在试验过程中,由于支撑的极限吨位超过了试验机的加载能力,导致当试验机拉力到达 2 900kN 左右时,为了保护试验机,荷载就没有继续增加,这使得得到的曲线朝受压变形的一侧偏移;在加载的过程中,由于试验机拉力过大,导致了试验机需要暂停加载来调整参数来继续工作,这样在曲线中产生了“次滞回”曲线(如图 4 所示)。定义累积塑性变形为:(累积塑性变形/屈服位移) $\times D_y$ ^[5],试验结果如表 3 所示。

2)与同类产品的对比。TJ-I 型屈曲约束支撑采用全钢构造,有别于国外其他种类的屈曲约束支撑,通过和日本新日铁公司生产的 UBB 进行了对比,通过对比可以发现:

- 1)TJ-I 型屈曲约束支撑具有良好的滞回性能和变形能力,与新日铁公司生产的 UBB 性能相当。
- 2)TJ-I 型屈曲约束支撑的全钢约束机制完全能满足大吨位下约束芯板屈曲的要求。

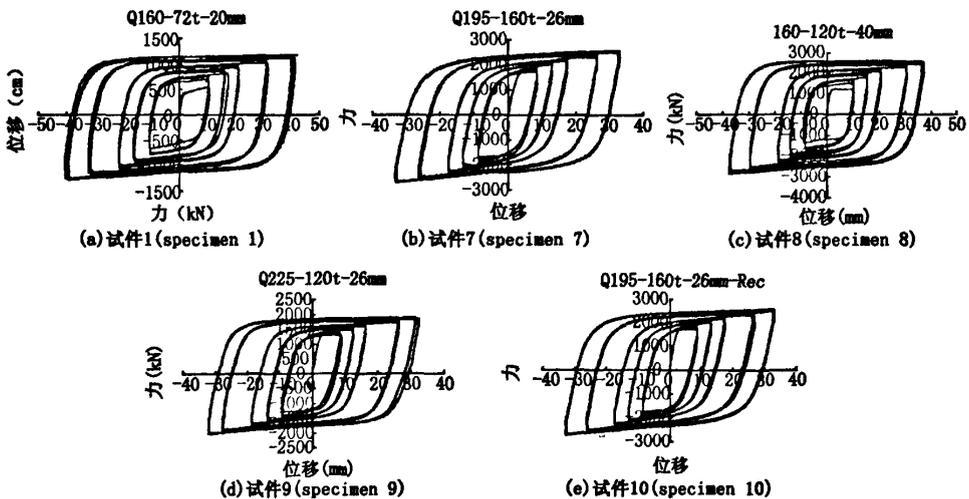


图3 A级支撑曲线

Fig.3 Hysteresis loops of A level BRB

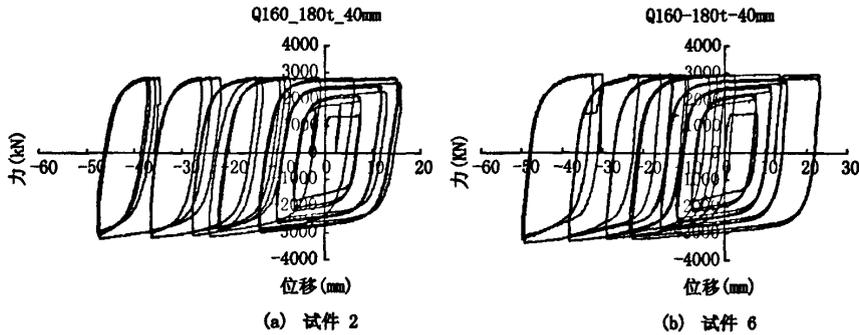


图4 不规则滞回曲线

Fig.4 Anomaly hysteresis loops

表3 各试件的试验结果

Tab.3 Summary of test results of all specimens

编号	屈服吨位 (吨)	极限吨位 (吨)	等级	最大拉力 (kN)	最大压力 (kN)	强化系数	屈服位移 Dy	累计塑性变形 × Dy	初始刚度 kN/mm
1	48	125	A	1 178	1 248	2.59	1.22	1 109	395
2	134	320	-	2 800	3 200	2.39	1.44	333	395
3	205	277	B	2 809	2 799	1.37	2.99	196	684
4	140	228	B	2 205	2 224	1.59	2.43	253	576
5	87	136	B	1 356	1 360	1.57	1.73	376	499
6	144	322	B	2 931	3 223	2.23	0.90	561	1 605
7	172	266	A	2 511	2 657	1.54	2.77	361	620
8	121	281	A	2 563	2 813	2.32	1.45	842	836
9	130	199	B	1 854	1 994	1.53	2.00	483	650
10	176	268	A	2 513	2 722	1.55	2.19	353	805

5 试验曲线的数值模拟

5.1 滞回模型

根据已有屈服约束支撑的滞回模型和刚度方程^[6],结合试验数据,对参数进行了调整,以满足Q225、Q195和Q160,以及试件5和试件9这种不规则的滞回曲线。用位移作为驱动,编制程序绘制滞回曲线如图5所示。

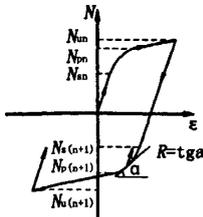


图5 N-ε滞回关系

Fig.5 N-ε hysteresis relationships

$$N_{s(n+1)} = N_s - (N_{b(n+1)} - N_{pm}) \tag{3}$$

$$N_{p(n+1)} = N_{b(n+1)} \tag{4}$$

$$\text{其中 } N_{b(n+1)} = \begin{cases} N_{in} & N_{in} > N_{ln} \\ N_{ln} & N_{in} \leq N_{ln} \end{cases}$$

屈服约束支撑的恢复力参数

$$R = \frac{dN}{d\varepsilon} \frac{L}{EA} \tag{5}$$

对于任意第n次加载

$$N \leq N_{s(n+1)} \text{ 时 } R = 1 \tag{6}$$

$$N \geq N_{pm} \text{ 时 } R = q \tag{7}$$

$N_m < N < N_{pm}$ 时采用线性插值,即

$$R = 1 - \left(\frac{N - N_{pm}}{N_m - N_{pm}} \right)^r (1 - q) \tag{8}$$

卸载时 $R = 1$

式中 q - 刚度强化系数,文献[6]建议取 0.01 ~ 0.02; r - 弯曲系数, r 越大曲线越饱满,越小曲线越扁平。

5.2 支撑的线刚度修正

已有文献给出了钢材的滞回特征,但是由于屈曲约束支撑的芯板在往复加载的过程中产生了很大的塑性变形,因此出现了强化段的刚度变化的现象,并且拉压不均匀的现象,定义 q_t, q_p 分别为受压和受拉时强化段的刚度强化系数

$$q_t = \frac{K_p}{K_c}, q_p = \frac{K_{pp}}{K_c}$$

式中 K_p - 强化段受拉刚度; K_{pp} - 强化段受压刚度; K_c - 弹性刚度。

假设钢材是不可压缩材料,大的塑性变形下,泊松比 ν 取为 0.5, 钢材受拉时的线刚度

$$K_p = \frac{E_p \cdot b(1 - \epsilon_x) \cdot t(1 - \epsilon_x)}{L(1 + \epsilon_x)} = \frac{E_p \cdot b(1 - \nu\epsilon_x) \cdot t(1 - \nu\epsilon_x)}{L(1 + \epsilon_x)}$$

钢材受压时的线刚度

$$K_{pp} = \frac{E_p \cdot b(1 + \epsilon_x) \cdot t(1 + \epsilon_x)}{L(1 - \epsilon_x)} =$$

$$\frac{E_p \cdot b(1 + \nu\epsilon_x) \cdot t(1 + \nu\epsilon_x)}{L(1 - \epsilon_x)}$$

$$\frac{K_{pp}}{K_p} = \frac{(1 + \nu\epsilon_x)(1 + \nu\epsilon_x)(1 + \epsilon_x)}{(1 - \epsilon_x)(1 - \nu\epsilon_x)(1 - \nu\epsilon_x)}$$

式中 E_p - 材料的塑性模量; ν - 材料的泊松比; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ - 分别为芯板长度方向, 宽度方向, 和厚度方向的应变。

K_{pp}, K_p 都是某一变形量下的瞬时刚度, 考虑芯板受到套筒挤压, 以及材料的塑性模量 E_p 等因素, 结合试验结果将受压强化段的刚度和受压强化段的刚度比值近似的取为 2, 即

$$\frac{q_p}{q_t} = \frac{K_{pp}}{K_p} = 2$$

在程序编制时, 针对不同的芯材材料的支撑, 应当取不同的 q_p 值。

5.3 r 值的修正

由于不同的芯板材料的曲线饱满程度不一样, 因此针对不同的芯板材料, r 宜取不同的值, 建议针对 Q225 取 1.5, 针对 Q195 取 0.8, 针对 Q160 取 2.0。

5.4 反向强化段起始轴力的修正

对于 $N_{p(n+1)} = N_{b(n+1)} \cdot a$ 已有的滞回模型在小变形的情况下能较好地模拟滞回曲线, 但在大变形情况下, 曲线反向强化时的起始轴力 $N_{p(n+1)}$ 并不是正好等于上一级循环的极限轴力, 因此需要修正, a 反映了各循环级曲线之间的接近程度。

5.5 滞回曲线的数值模拟

根据上面的参数修正, 编制程序对滞回曲线进行了模拟。

Q225 芯板支撑曲线: 前三级循环, q_p 取 0.03, 后两级循环, q_p 取 0.015, r 取 1.5, a 取 0.98。

Q195 芯板支撑曲线: 前三级循环, q_p 取 0.05, 后两级循环, q_p 取 0.03, r 取 0.8, a 取 0.95。

Q160 芯板支撑曲线: 前三级循环, q_p 取 0.03, 后两级循环, q_p 取 0.01, r 取 2.0, a 取 1。

不规则滞回曲线。该曲线满足 Q160 芯材的各个参数。

6 结论

1) TJ-I 型屈曲约束支撑具有良好、稳定的滞回性能, 并且具有优良的变形能力。

2) 从低周疲劳试验可以看出, TJ-I 型屈曲约束支撑具有良好的抗疲劳性能。

3) 通过对滞回模型参数的调整, 可以较好地模拟不同材料支撑的滞回曲线。

参考文献:

- [1] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S].
- [2] 李国强, 胡宝琳, 孙飞飞. 国产 TJ 型屈曲约束支撑的研制与试验研究[A]. 第十一届高层建筑抗震技术交流会论文集[C]. 高层建筑抗震专业委员会, 2007. 523-540.
- [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): 1-12.
- [4] JGJ101-96, 建筑抗震试验方法规程[S].
- [5] AISC Seismic Provisions[C]. 2005: 204-250.
- [6] 李国强, 胡宝琳. 屈曲约束支撑曲线滞回模型和刚度方程的建立[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 26-31.

(责任编辑 刘存英)