

文章编号: 1000-4750(2020)Suppl-0307-06

一种耗能牛腿的力学性能试验研究

宋 薇, 王 涛, 周中一

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动部门重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要: 提出了一种耗能牛腿的新型构造方式, 具有构造简单, 易于更换的特点, 并对其进行了低周反复试验。试验选用多种不同宽厚比的耗能板, 研究了耗能牛腿的力学性能和疲劳性能, 分析了耗能板的宽厚比对耗能牛腿力学性能的影响。实验结果表明: 新型耗能牛腿具有良好的滞回性能和稳定的耗能性能; 在一定范围内, 耗能板的宽厚比越大, 耗能牛腿的延性和耗能能力越好。

关键词: 耗能牛腿; 低周反复试验; 力学性能; 延性系数; 耗能性能

中图分类号: TU317 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S058

EXPERIMENTAL STUDY ON ENERGY DISSIPATION BRACKET

SONG Wei, WANG Tao, ZHOU Zhong-yi

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: A new Energy dissipation bracket is proposed, which is simple in construction and easy to be replaced. Quasi-static tests were conducted. The mechanical and fatigue properties of the bracket with different ratios of width and thickness were studied, and the influence of the width-thickness ratio of the energy dissipation plate on the mechanical properties of the bracket was analyzed. The test shows that the energy dissipation bracket has good hysteretic property and stable energy dissipation property. In a certain range, the larger the width-thickness ratio of the energy dissipation plate, the better the ductility and energy dissipation capacity of the energy dissipation bracket.

Key words: energy dissipation bracket; quasi-static test; mechanical property; ductility factor; fatigue property

20 世纪 90 年代, 我国兴建了一批预应力装配式大板结构, 柱子和楼板采用后张预应力连接在一起, 而后浇带形成暗梁。这种结构体系板与柱的相对转角可达 1/20, 变形能力大, 但板柱摩擦节点耗散地震能量少^[1]。板柱节点承压面小时, 由于柱主筋偏位、保护层太厚, 被板角挤落, 造成板角突然跳出平面失稳(施工过程中曾发生)^[2]。梁柱节点抗震冗余度小, 对楼板的支撑作用和对地震的抵抗机制耦合在一起, 很难满足现行规范的抗震要求。而采用传统方法进行抗震加固也面临施工量大、经济性差等问题。采用耗能牛腿对其进行抗震加固, 在小震时为梁柱节点提供刚度,

大震时代替节点耗能, 既起到耗能作用, 又可保护梁柱节点, 而且几乎不占用建筑空间。

Yu 等^[3]提出了采用梁端加腋对钢框架节点进行加固的设计方法。Chen 和 Pampanin^[4-6]提出无抗震构造措施的节点采用腋撑加固前后的基于塑性的简化计算模型。尹庆利等^[7-9]通过对带不同耗能腋撑钢筋混凝土框架结构进行数值分析和试验研究, 证明了设置耗能腋撑可有效改善钢筋混凝土框架结构的抗震性能。黄俊聪^[10]给出了腋撑在钢筋混凝土框架中的设置位置和强柱系数的建议。本文提出一种与耗能腋撑类似的装配式耗能牛腿, 见图 1, 其主要工作原理为利用耗能牛腿加

收稿日期: 2019-04-30; 修改日期: 2019-12-28

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019EEVL0104, CEA201919); 黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q15146)

通讯作者: 周中一(1980—), 男, 河南人, 副研究员, 博士, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: zhouzy@iem.ac.cn).

作者简介: 宋 薇(1994—), 女, 山东人, 硕士生, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: 07wei@163.com);

王 涛(1977—), 男, 山东人, 研究员, 博士, 主要从事结构抗震试验方法, 工程结构抗震等方面的研究(E-mail: wangtao@iem.ac.cn).

强梁柱节点,改善结构节点的受力性能,使结构满足“强节点弱构件”的延性设计要求。同时耗能牛腿金属耗能板的变形可耗散一定地震输入能量,起到消能减震的作用。



图1 耗能牛腿
Fig. 1 Energy dissipation bracket

1 试验概况

1.1 试件设计

本耗能牛腿主要由耗能板,上约束板,下约束板和端板等构成,构造见图2。上、下约束板之间和耗能牛腿与梁柱之间采用高强螺栓连接,实现了全装配式安装,便于安装和更换。上、下约束板之间凹槽的厚度 $t_c = t_h + 2$ (单位/mm),其中, t_h 为耗能板的厚度,凹槽为耗能板的面外屈曲提供了一定的空间。上、下约束板的长度略小于耗能板长,为耗能板压缩提供了一定的空间。耗能板端部宽度约为耗能段宽度的2倍,保证耗能牛腿工作时只有耗能段耗能。耗能板两端加肋,能有效地防止耗能板两端无端板约束处面外屈曲。下约束板上开槽,耗能板上相应位置设合适大小的凸起,起限位作用,使上下约束板位于耗能板中央。钢材采用Q235。

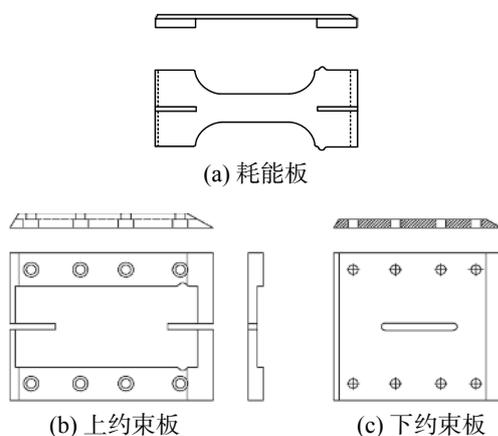


图2 耗能牛腿构造

Fig. 2 Construction of the energy dissipation bracket

试验中共设计了5种不同的耗能板,其中有2种为截面积相同但宽厚比不同(4-60和6-40)。耗能牛腿具体参数见表1。

表1 耗能牛腿参数
Table 1 Parameters of the energy dissipation bracket

序号	耗能板厚	耗能段宽	简称	数量/个
1	4	60	4-60	3
2	4	50	4-50	3
3	6	40	6-40	3
4	6	50	6-50	3

试验采用了两种厚度的耗能板,因为约束板和端板的厚度均远大于耗能板,且耗能牛腿达到极限承载力时为耗能板破坏,故只对耗能板进行材性试验。钢材的力学性能指标均按GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验:第1部分:室温试验方法》规定的方法测得,具体结果见表2。

表2 材料力学性能
Table 2 Material properties

材料种类	钢材型号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
4 mm厚耗能板	Q235	321	418	229055
6 mm厚耗能板	Q235	328	455	217455

1.2 加载方案及测点布置

将耗能牛腿通过螺栓连接于梁柱节点,钢梁与钢柱采用铰接,在梁端采用拟静力循环往复加载,以耗能板压缩或拉伸变形量为控制位移,控制耗能板长的1/1000、1/700、1/600、1/500、1/400、1/300、1/200、1/100、1/70、1/50、8 mm(1/38)、10 mm(1/30)、12 mm(1/25)……的拉伸和压缩往复各3次变形,直至破坏。每级加载过程中观察耗能板面外屈曲等现象。疲劳加载为在分级加载的基础上在耗能板长的1/500的位移幅值下往复循环30圈。试验装置和加载制度如图3和图4所示。



图3 试验加载装置

Fig. 3 Loading apparatus

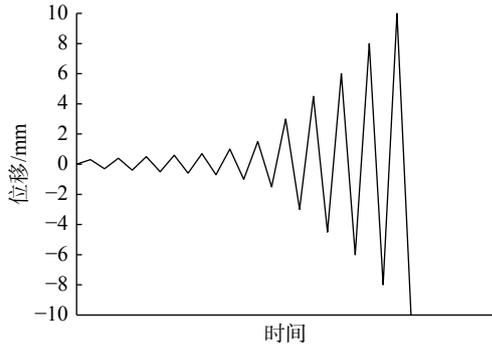


图4 试验加载制度
Fig. 4 Loading cases

在下约束板中间开槽，在耗能板上贴应变片，用于测量耗能板的应变变化；在平行于耗能牛腿的方向设置位移计，将位移计两端分别固定在耗能板两侧的肋上，用于测量耗能板自身的变形情况，并以此位移值作为本次试验的控制位移。试验装置和测点布置如图5所示。

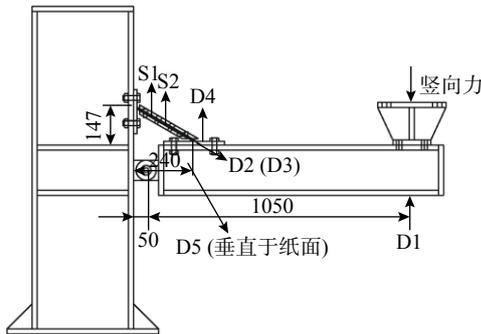


图5 试验测点布置
Fig. 5 Arrangement of test measuring points

耗能牛腿与梁柱通过螺栓连接，认为耗能牛腿只提供轴力，对梁柱铰接点取距，有：

$$\sum M = F_z l_n - F_n \cos \alpha \cdot s_n = 0 \quad (1)$$

则：

$$F_n = F_z l_n / \cos \alpha / s_n = 10.33 F_z \quad (2)$$

式中： F_z 为加载时提供的竖向力； F_n 为牛腿的轴力； l_n 为作动器至梁柱铰接点的距离； s_n 为耗能牛腿在梁上的位置距梁柱铰接点的距离； α 为耗能牛腿与柱的夹角。

2 耗能牛腿的设计计算

为保证耗能板耗能段两端的拉压刚度远大于耗能段，使耗能段两端的宽度大于耗能段宽度的两倍，并在耗能段加肋，故可只考虑耗能板耗能段的屈服，认为耗能板只受拉压，耗能板长为

266 mm，则耗能板厚为 4 mm，宽为 60 mm 时，屈服荷载为：

$$F_y = f_y \cdot t \cdot h = 77.04 \text{ kN} \quad (3)$$

此时耗能板耗能段的抗拉刚度为：

$$K = \frac{EA}{l} = 206.7 \text{ kN/mm} \quad (4)$$

取最大拉力的 1.5 倍为最大压力，则约束板可能受的最大压力为：

$$F_p = f_t \cdot t \cdot h = 100.32 \text{ kN} \quad (5)$$

取屈服荷载为上下约束板受到的最大力，则连接上下约束板的 8 个螺栓受剪力为：

$$N_v = \frac{F_y}{4} = 25.08 \text{ kN} < N_v^b = 0.9 k n_f \mu P = 36 \text{ kN} \quad (6)$$

故螺栓的强度满足要求。

取耗能板的抗拉强度计算所需焊缝，耗能板与端板连接的两个角焊缝的两焊脚边夹角分别为 120°和 60°，焊脚尺寸取 6 mm，则角焊缝受力为：

$$\sigma_{f1} = \frac{N}{h_e \cdot l_w} = \frac{fA}{h_f \cdot \cos \frac{120^\circ}{2} \cdot l_w} = 255.2 \text{ N/mm}^2 > f_u^f = 240 \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

故焊缝强度低于耗能板强度，耗能牛腿最后的破坏状态有时为焊缝破坏，采用塞焊，焊脚尺寸为 10 mm。

$$\sigma_{f2} = \frac{N}{h_e \cdot l_w} = \frac{fA}{h_f \cdot \cos \frac{60^\circ}{2} \cdot l_w} = 147.3 \text{ N/mm}^2 < f_u^f = 240 \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

3 试验结果及其分析

3.1 破坏形态及应力状态

耗能牛腿的破坏形态主要有两种：耗能板断裂和耗能板端部焊缝撕裂，见图 6(a) 和图 6(b)。

1) 耗能板断裂

耗能牛腿 4-50 和 4-60 均为耗能板断裂。耗能牛腿 4-50 的力-应变曲线见图 6(c)。耗能板变形达到 1/300 阻尼器耗能板长度时，阻尼器开始屈服，耗能板变形达到 10 mm 时，阻尼器达到最大荷载 158.7 kN，并在耗能板变形达到 12 mm 时于耗能段中部破坏，破坏荷载 152.14 kN，耗能板出现高

阶屈曲。耗能板破坏处距贴应变片处较远，故加载到后期时贴应变片处耗能板未发生变形，应变几乎为0。

耗能牛腿 4-60 的力-变形曲线见图 6(d)。耗能牛腿在加载到 1/100 耗能板长度时开始屈服。屈服后应变片处耗能板出现较大塑性变形，且在后续加载过程中无法完全恢复。耗能板变形达到 10 mm 时，阻尼器达到最大荷载 215.4 kN，并在耗能板变形达到 12 mm 时于耗能段中部破坏，破坏荷载 206.22 kN，是比较理想的破坏方式。

2) 耗能板端部焊缝撕裂

耗能牛腿 6-40 和 6-50 均为耗能板端部焊缝撕裂。耗能牛腿 6-40 的力-变形曲线见图 6(e)。耗能牛腿在加载到 1/100 耗能板长度时开始屈服。耗能

板变形达到 1/65 阻尼器耗能板长度时，阻尼器达到最大荷载 209.28 kN，并在耗能板变形达到 1/50 阻尼器耗能板长度时于耗能段与端板连接处焊缝撕裂，破坏荷载 163.79 kN。

耗能牛腿 6-50 的力-变形曲线见图 6(f)。耗能牛腿在加载到 1/100 耗能板长度时开始屈服，变形较大时应变片处耗能板出现较大塑性变形，且在后续加载过程中无法完全恢复。耗能板变形达到 1/50 阻尼器耗能板长度时，阻尼器达到最大荷载 255.79 kN，并在此时于耗能段与端板连接处焊缝撕裂破坏。

耗能牛腿 6-40 和 6-50 虽然为耗能板端部焊缝撕裂破坏，但应力-应变曲线更饱满，是因为 4 mm 厚的耗能板易出现高阶屈曲，导致变形集中。

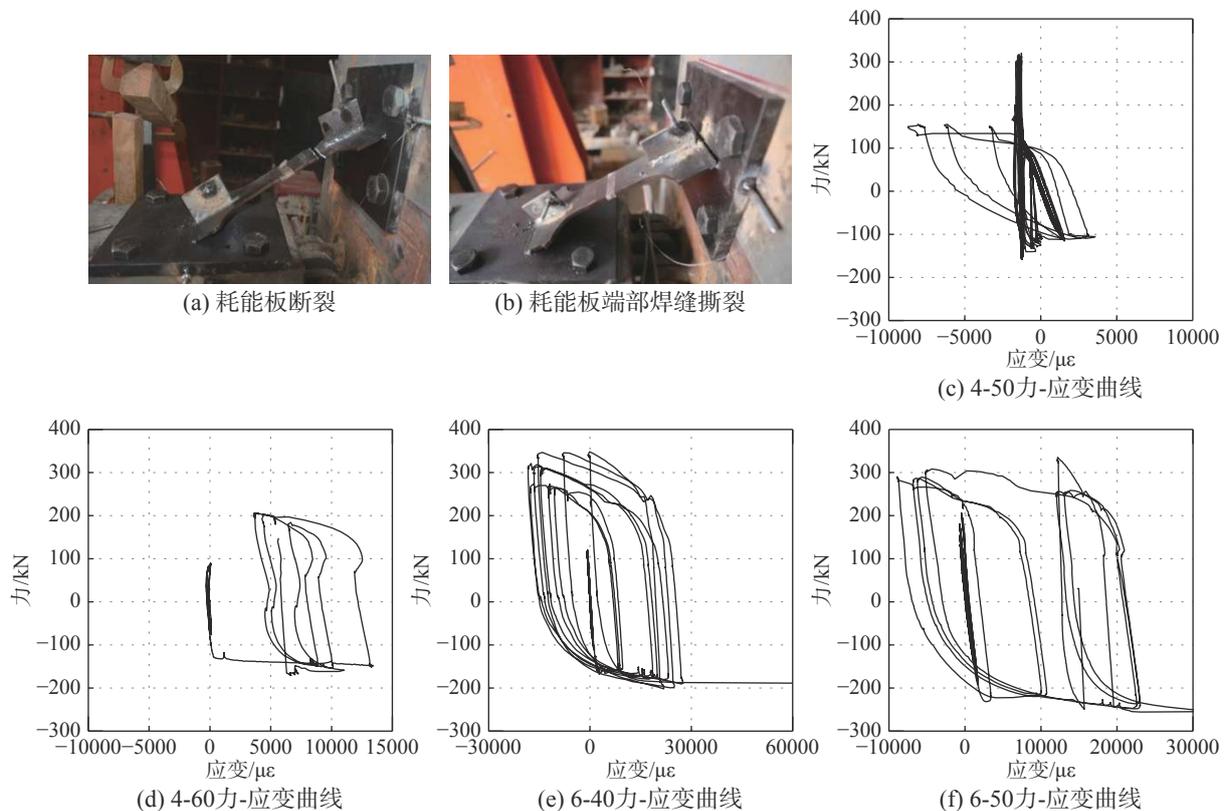


图 6 耗能牛腿破坏形态及力-应变曲线

Fig. 6 Failure pattern and force-strain curve of Energy dissipation bracket

3.2 滞回性能分析

4 组耗能牛腿的力-变形试验曲线和骨架曲线见图 7。滞回曲线饱满。图中变形以耗能板受压为正，耗能牛腿的抗压承载力大于抗拉承载力，是由于上下约束板的刚度远大于耗能板，在受压时为耗能牛腿提供了一定的刚度。图 7(a) 和图 7(b) 出现折线是由于大变形时耗能板出现高阶屈曲。

图 7(d) 为耗能牛腿 6-40 在 1/500 耗能板长度位移幅值下往复循环加载 30 圈后继续进行分级加载的滞回曲线，曲线饱满，与图 7(c) 相比没有明显变化，说明耗能牛腿具有良好的疲劳性能。

3.3 基本力学性能

耗能牛腿的基本力学参数见表 3，其中屈服力由骨架曲线得到，初始刚度取滞回曲线耗能牛腿

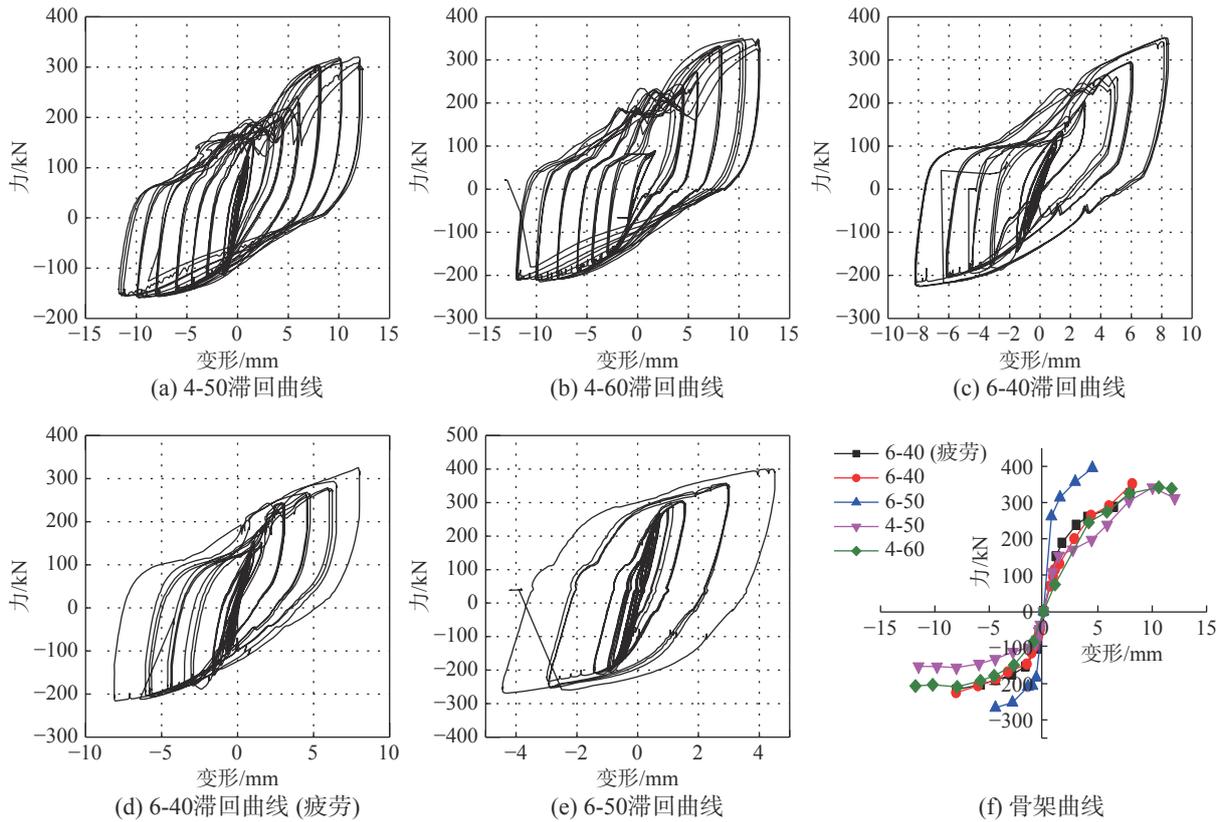


图7 耗能牛腿滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic loops of Energy dissipation bracket

屈服前的刚度。其中屈服力的设计值与实测值相差小于 10%，但初始刚度的误差较大，且实测值均小于设计值，这是由于测量耗能牛腿耗能板位移的位移计通过螺杆与耗能板相连，与耗能板一起绕梁柱铰接点拉伸和压缩，螺杆高出耗能板的部分放大了耗能板的变形，使测得的变形略大于实际变形，导致初始刚度偏小。

表3 耗能牛腿力学参数比较
Table 3 Comparison of Energy dissipation bracket's mechanics properties

试件编号	屈服力/kN			初始刚度/(kN/mm)		
	设计值	实测值	差值/(%)	设计值	实测值	差值/(%)
4-60	77.0	83.6	7.9	206.7	206.8	0.1
6-40	78.7	78.3	-0.5	196.2	181.4	-8.1
4-50	64.2	71.0	9.6	172.2	168.1	-2.5
6-50	98.4	104.0	5.4	245.3	212.4	-15.5

3.4 耗能能力

滞回环所包含的面积 的积累反映了阻尼器耗能的大小，为便于对比，取耗能牛腿破坏前各循环滞回曲线外包络线包围的面积的最大值作为比较用的耗能量。实测所得试件的耗能值见表 4。

表4 耗能牛腿耗能实测值
Table 4 Dissipation of energy dissipation brackets

试件编号	宽厚比	耗能/(kN·mm)	相对值
4-50	12.50	2781.16	1.000
4-60	15.00	3269.01	1.175
6-40	6.67	2225.79	0.800
6-50	8.33	1679.95	0.604

由表 4 可见，试件 6-50 的耗能比试件 4-50 降低了 39.6%，试件 6-60 的耗能比试件 4-60 的降低了 68.8%，即耗能能力随耗能板厚度的增加而减小，这是由于耗能板与端板间焊缝的强度限制了耗能牛腿强度的发展，进而限制了耗能能力。试件 4-60 与试件 6-40 具有相同的设计屈服力和初始刚度，但试件 6-40 的耗能比试件 4-60 降低了 39.6%，二者的耗能能力相差较大，即在一定范围内，耗能板的宽厚比越大，耗能能力越好。

3.5 位移与延性

试件的屈服位移由骨架曲线得到，极限位移取骨架曲线下降段最大力的 85% 时的位移或最大位移。试件的屈服位移，极限位移和延性系数见表 5。

表 5 试件屈服位移和极限位移
Table 5 Yield and ultimate displacement of specimens

试件编号	宽厚比	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数	相对值
4-50	12.50	1.34	11.50	8.58	1.00
4-60	15.00	0.82	11.48	10.44	1.22
6-40	6.67	1.29	8.05	6.24	0.73
6-50	8.33	1.01	4.42	4.38	0.51

由表 5 可见：与试件 4-50 相比，试件 4-60 的延性系数提高了 22%，说明在耗能板厚度相同时，耗能牛腿的延性随试件宽度的增加而增加。当耗能板宽度相同时，耗能板厚度为 6 mm 的耗能牛腿的延性系数远小于耗能板厚度为 4 mm 的耗能牛腿，这是因为耗能板端部焊缝强度小于 6 mm 耗能板的强度，导致焊缝先坏。试件 4-60 和试件 6-40 具有相同的设计屈服强度和设计初始刚度，试件 6-40 的延性系数是试件 4-60 的 0.6 倍，即在一定范围内，耗能板的宽厚比越大，延性越好。

4 结论

本文提出了一种耗能牛腿的新型构造方式，并对其进行了力学性能试验，试验结论如下：

(1) 试验表明：本文设计的耗能牛腿滞回曲线饱满，具有良好的耗能性能和稳定的疲劳性能，是一种理想的耗能构件。

(2) 在一定范围内，耗能板的宽厚比越大，耗能牛腿的延性和耗能能力越好。

(3) 耗能板端部焊缝的强度对耗能牛腿的力学性能影响较大。

参考文献：

- [1] 李郢, 宋瑞华. 高层装配整体预应力板柱结构的几个问题[J]. 工业建筑, 1984 (6): 3 - 11.
Li Ying, Song Ruihua. Some problems on the assembly of monolithic prestressed slab and column structure on tall buildings [J]. Industrial Construction, 1984 (6): 3 - 11. (in Chinese)
- [2] 李郢. 摩擦耗能体系预应力板柱结构[J]. 工业建筑, 1984 (4): 25 - 32.
- [3] Li Ying. Prestressed plate - column structure with frictional energy dissipation system [J]. Industrial Construction, 1984 (4): 25 - 32. (in Chinese)
- [3] Uang C M, Qi-Song "Kent" Yu, Noel S, et al. Cyclic Testing of Steel Moment Connections Rehabilitated with RBS or Welded Haunch [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(1): 57 - 68.
- [4] Chen Te-Hsiu. Retrofit strategy of non-seismically designed frame systems based on a metallic haunch system [D]. Christchurch: University of Canterbury, 2006.
- [5] Pampanin S, Christopoulos C, Chen T. Development and validation of a haunch metallic seismic retrofit solution for existing under-designed RC frame buildings [J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn, 2006, 35(14): 1739 - 1766.
- [6] Pampanin S, Christopoulos C. Non-Invasive retrofit of existing RC frames designed for gravity loads only [R]. Athens, Greece: fib 2003 Symposium 'Concrete Structures in Seismic Regions', 2003: 170.
- [7] 尹庆利. 耗能腋撑钢筋砼框架减震性能研究 [D]. 广东: 广州大学, 2011.
Yin Qingli. Vibration Reduction Research on RC Frame with Energy Dissipation haunch Braces [D]. Guangdong: Guangzhou University, 2011. (in Chinese)
- [8] 吴轶, 何铭基, 郑俊光, 等. 耗能腋撑对钢筋混凝土框架抗震加固性能分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2009, 34(6): 13 - 18.
Wu Yi, He Mingji, Zheng Junguang, et al. Analysis of seismic retrofitting performances of reinforced concrete frame with energy dissipation haunch braces [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2009, 34(6): 13 - 18. (in Chinese)
- [9] 彭凌云, 陈华霆, 薛涛. 隅撑式阻尼减震技术的应用研究 [C]// 苏州: 第四届全国建筑结构技术交流会, 2013.
Peng Lingyun, Chen Huating, Xue Tao. Study on the application of corner brace damping technology [C]// Soochow: The Fourth National Building Structure Technology Exchange Conference, 2013. (in Chinese)
- [10] 黄俊聪. 带腋撑钢筋混凝土框架结构抗震性能的基础研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2010.
Huang Juncong. Preliminary study on seismic performance of reinforced concrete frame structures with haunch braces [D]. Guang Dong: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)