

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.005

带 BRB 的高层钢框架梁柱节点的抗震性能

王秀丽, 赵杰

(兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘要:应用非线性有限元软件 ABAQUS 对带有 BRB 和带有普通支撑这 2 种高层钢框架梁柱节点进行了数值模拟, 分析比较了 2 种支撑对框架梁柱节点的抗震影响, 针对带有 BRB 的梁柱节点, 对其进行支撑内芯的屈服强度, 节点板的大小、厚度以及节点板上面外加劲肋长度的参数分析。结果表明: BRB 在外包钢管和混凝土的约束下具有很好的耗能性能, 并且随着支撑内芯屈服强度的降低, 节点板尺寸和厚度的增大以及面外加劲肋长度的增加, 梁柱节点的滞回曲线更加饱满, 拥有更好的抗震性能。

关键词:梁柱节点; 防屈曲耗能支撑; 滞回曲线; 节点板; 屈服强度

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0017-05

Seismic Performance Research on Beam-column Joint of Tall Steel Framed Structure with BRB

Wang Xiuli, Zhao Jie

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China)

Abstract: Using nonlinear finite element software ABAQUS to analyze and numerically simulate the beam-column joint of high-rise steel framed structure with BRB and with ordinary support. Analyzed and compared the seismic impact on frame joint with the two support. For the beam-column joint with BRB, conduct its parameter analysis about the yield strength of the supporting inner core, the size and thickness of the gusset plate, and the length of the stiffener on the gusset plate. The results showed that the BRB has the good performance of energy-consuming with the constrains come from the wrapped steel and concrete. And with the yield's reduction in strength of the supporting inner core, the increase in the scale and thickness of the gusset plate, as well as the increase in the length of the stiffener on the gusset plate, the hysteresis curve of the beam-column joint display more fuller, which have better seismic performance.

Key words: beam-column joints; buckling-restrained brace; hysteresis loops; gusset plate; yield strength

中心支撑框架系统和偏心支撑框架系统在传统的减震设计方法中减震性能有一定的可靠性^[1], 但是在强震作用下结构中的耗能机制会产生屈曲现象, 在框架中加入防屈曲耗能支撑^[2-7], 即 buckling-restrained brace, 简称 BRB, 可以克服传统支撑受压屈曲破坏的缺点。高层钢框架中的梁柱节点作为结构的关键部位, 起着传递结构构件内力和协调结构变形的作用。目前对于带支撑的框架梁柱节点的研究已有很多^[8-9], 在此基础上对带 BRB 的高层钢框架梁柱节点的研究是很有必要的。

文章运用 ABAQUS 有限元软件, 对比分析带 BRB 的框架梁柱节点和带普通支撑的框架梁柱节点的抗震性能。针对带 BRB 的框架梁柱节点, 通过变换支撑内芯的屈服强度, 节点板的大小、厚度以及节点板上面外加劲肋的长度来观察这些参数对节点抗震性能的影响规律。

1 节点有限元模型

1.1 算例设计

以一榀 3 跨 10 层的钢支撑框架结构为例, 跨度为 8 m, 层高为 3.9 m, 框架柱底部与基础嵌固, 框架平面图、立面图和三维立体图如图 1 所示。建筑所在场地的抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 0.2 g, 水平地震影响系数最大值为 0.16, III 类场地土, 设计地震分组为第一组。楼面恒荷载和活荷载标准值分别为 6.0 kN/m² 和 3.0 kN/m²。框架梁采用焊接 H 型钢梁, 柱子为箱形截面柱, 梁柱之间采用刚性连接, 支撑焊接在节点板上, BRB 采用内芯为十字型钢板上外包钢管混凝土。框架梁和柱的屈服强度为 345 MPa, 支撑内芯的屈服强度为 235 MPa。

1.2 数值模型

取框架 2 层中间跨梁、柱和支撑节点单独进行有限元分

收稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51068019, 51278236)

作者简介: 王秀丽(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事钢结构研究, (E-mail) wangxl@lut.cn。

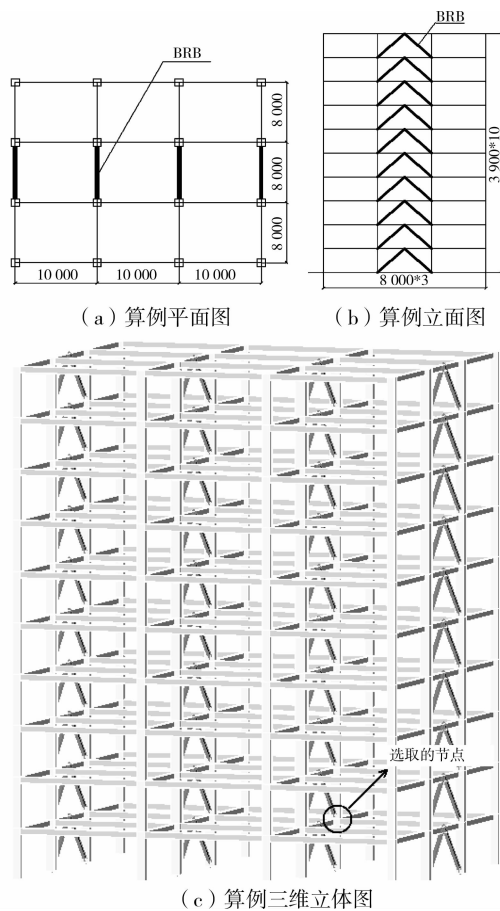


图 1 算例示意图

析。节点板与梁、柱翼缘均采用坡口对接焊缝连接,梁腹板与柱翼缘也采用焊缝连接。钢材是理想的弹塑性材料,对钢材的计算模型采用 Von Mises 屈服准则和双线段随动强化准则,材料的弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3。混凝土采用 Von Mises 屈服准则和多线段随动强化准则^[10],单轴峰值压应力为 30 MPa,峰值压应变为 0.002,弹性模量为 30 000 MPa,泊松比为 0.2。整个模型采用 C3D8I(八节点六面体线性非协调模式)单元。

箱型柱截面尺寸:660 mm×660 mm×32 mm;柱高 7 800 mm。

H 型梁截面尺寸:600 mm×300 mm×10 mm×20 mm;梁长 4 000 mm。

节点板尺寸:400 mm×400 mm;厚度为 20 mm。

BRB 截面尺寸:十字型内芯高度×厚度=80 mm×10 mm,宽厚比 $b/t=8$,总长 3 587 mm,外观尺寸为 270 mm×270 mm,钢管长 3 387 mm,厚度为 5 mm,内芯与混凝土之间预留 2 mm 的间隙。

1.3 边界条件及加载方式

为了更真实地模拟梁柱节点的受力变化,有限元模型采用实体单元建模,在划分网格时采用结构化(structure)网格划分技术。由于在实体单元中 X、Y、Z 三个方向的转动是无效的,所以对柱子的上下端以及梁的悬臂端均约束 X、Y、Z 三个方向的平移。屈曲约束支撑外包的混凝土和钢管两端也进行三个方向上的平移约束。

在分析中对模型施加往复位移荷载,位移大小进行变幅

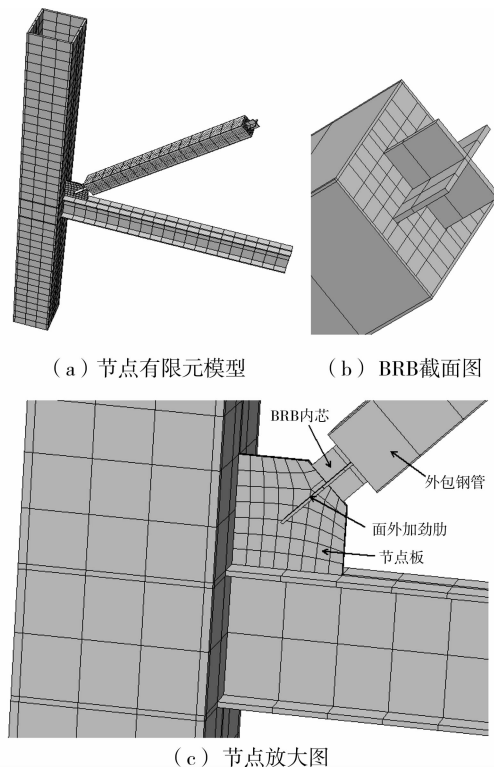


图 2 梁柱节点有限元模型

控制,加载位置均在支撑的悬臂端。

2 节点有限元分析结果

2.1 对比分析

对带 BRB 的梁柱节点和带普通支撑(去掉外面包裹的钢管和混凝土)的梁柱节点进行循环荷载下的抗震性能对比分析,位移加载方式如图 3 所示。

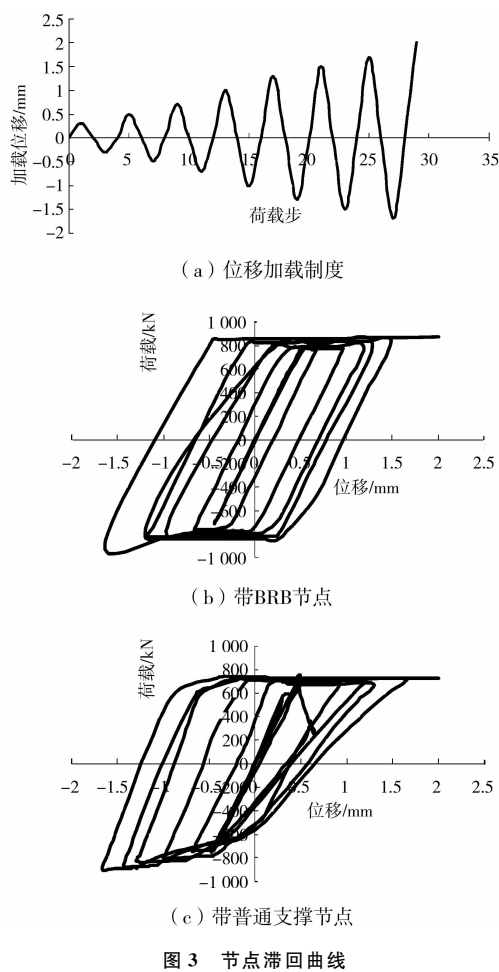
从图 3 中可看出带 BRB 节点的滞回曲线比带普通支撑节点的滞回曲线明显要饱满许多,而且曲线更稳定,说明 BRB 具有良好的耗能能力,能够提高节点的抗震性能,继而对整个结构的承载力和稳定性都有所提高。而带普通支撑的节点,支撑在受压时出现了明显的强度和刚度退化现象,且在荷载加载过程中支撑发生了屈曲变形,相对带 BRB 的节点,抗震性能显然不如前者好,所以在支撑外面设置钢管和混凝土可对限制支撑变形起到一定的作用。

2.2 参数分析

针对带 BRB 的框架梁柱节点,通过变换支撑内芯的屈服强度以及节点板的大小、厚度和节点板上外面加劲肋的长度来观察这些参数对节点抗震性能的影响。

2.2.1 内芯屈服强度的影响 选取屈曲约束支撑内芯分别为 LY100、LY160、LY190、LY225 四种低屈服点钢^[11]进行节点滞回性能的对比,分析结果如图 4 所示。

从图 4 中可看出,(a)、(b)、(c)、(d)4 幅图的滞回曲线都很稳定、饱满,均表现出良好的耗能能力,都没有出现强度和刚度退化的现象。图(a)中滞回环由小变大比较分明,且在 4 种滞回环中饱满程度最大,根据能量耗散系数计算公式^[12]可算出内芯为 LY100 时耗散系数最大,且相比 LY225 时耗能能力要提高 7%。说明内芯为 LY100 时节点耗能性能最好,LY100 在 4 种低屈服点钢中屈服强度最低,当有荷载作用时



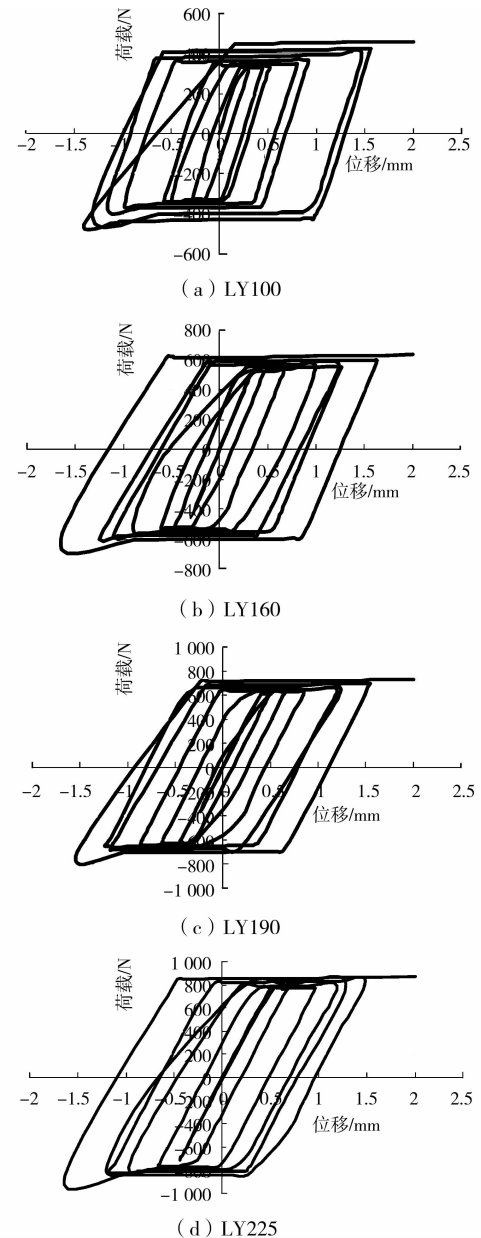
支撑内芯能够较早地屈服来吸收地震荷载所带来的能量,从图(a)第一个环就可看出在承载力相对较小时曲线即发生拐弯。

2.2.2 节点板大小的影响 选取节点板尺寸分别为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$, $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 和 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 的节点模型进行循环荷载下的抗震性能对比分析,分析结果如图 5 所示。

从图 5 中可看出(a)、(b)、(c)、(d)4 幅图的滞回曲线均稳定饱满,没有出现强度和刚度退化的现象,说明都有一定的耗能能力,随着节点板尺寸的增大,滞回环的面积有所增大。节点板为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 时计算出节点耗散系数在四者中最大,比节点板为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 时节点耗能性能要提高 1.3%,但当节点板尺寸变为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 时耗散系数反而没有增加,不成线性比例增长,说明增大节点板的尺寸能够提高 BRB 的耗能能力,进而提高节点的抗震性能,但是过大的节点板可能导致节点板自身先会发生面外失稳^[13-14],从而影响支撑的耗能能力。

2.2.3 节点板厚度的影响 选取节点板的厚度分别为 12、16、20 和 24 mm 的节点模型进行抗震性能的对比分析,分析结果如图 6 所示。

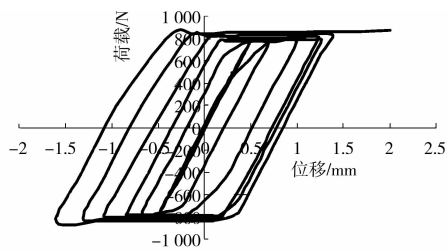
从图 6 中可看出,(a)、(b)、(c)、(d)4 幅图的滞回曲线都很稳定饱满,没有出现强度和刚度退化的现象,随着节点板厚度的增加滞回环的面积逐渐增大,耗散系数也随之增大,节点板厚度从 12、16、20 到 24 mm,相应的节点耗能性能依次增长 1.3%、0.5% 和 0.8%。说明节点板厚度的增加也能



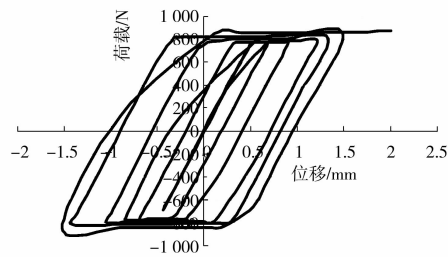
提高 BRB 的耗能性能,进而提高节点的抗震能力。因节点板与梁和柱均焊接,故可把节点板对框架梁柱节点的作用看作是对梁柱节点区域的加掖,随着节点板厚度的增加,这种加掖作用就在增强。

2.2.4 面外加劲肋长度的影响 选取面外加劲肋长度分别为 150、200、250、300 mm 的节点模型进行抗震性能的对比分析,分析结果如图 7 所示。

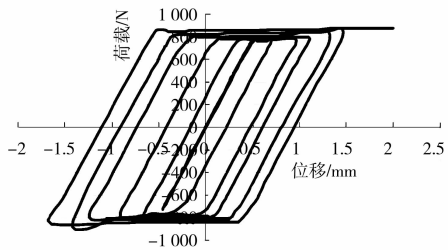
从图 7 中可看出,(a)、(b)、(c)、(d)4 幅图的滞回曲线都很稳定饱满,说明加劲肋在四种不同长度的情况下 BRB 均有一定的耗能能力,随着节点板上面外加劲肋的增长,滞回环面积明显增大,且面外加劲肋为 300 mm 时节点的耗散系数最大,节点的耗能能力依次增长了 1%、0.5% 和 1%,表明加劲肋的长度对支撑的耗能性能有一定的影响,且加劲肋越长支撑的耗能能力越强。究其原因,加劲肋的增长可增强节点板的稳定承载力^[15],减小节点板发生面外失稳的可能性,进而提高整个节点的抗震性能。



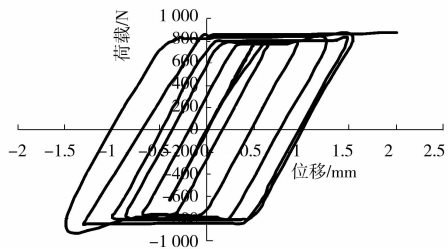
(a) 300 mm × 300 mm



(b) 400 mm × 400 mm

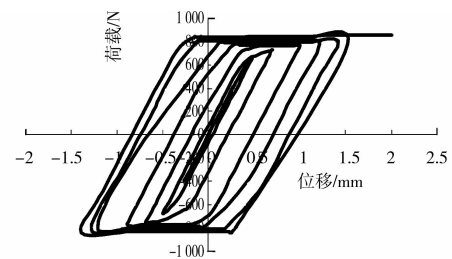


(c) 500 mm × 500 mm

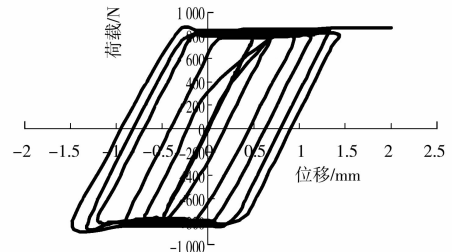


(d) 600 mm × 600 mm

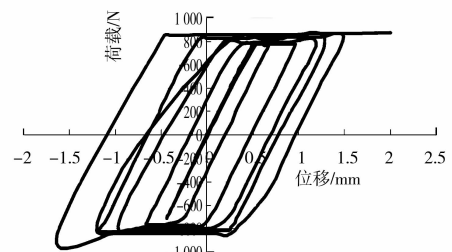
图 5 不同节点板大小下节点的滞回曲线



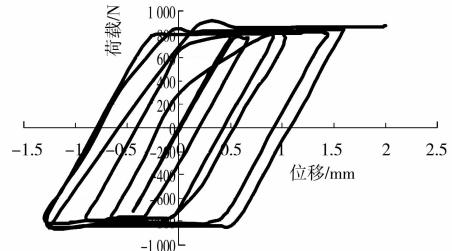
(a) 12 mm



(b) 16 mm



(c) 20 mm



(d) 24 mm

图 6 不同节点板厚度下节点的滞回曲线

3 结 论

利用 ABAQUS 软件分别对带有 BRB 的钢框架梁柱节点和带普通支撑的框架梁柱节点进行了非线性有限元分析,对比两种支撑加入框架中对节点抗震性能的不同影响,以及针对带有 BRB 的钢框架梁柱节点进行参数分析,讨论参数变换对节点抗震性能的影响规律,得出以下结论:

1) BRB 在外包钢管和混凝土的约束下耗能能力明显比没有约束作用下的普通支撑耗能能力强,相对应的带有 BRB 的钢框架梁柱节点要比带普通支撑的梁柱节点的抗震性能好。

2) BRB 的耗能性能随着支撑内芯屈服强度的降低而提高,内芯屈服强度越低,支撑的耗能性能就越好,且内芯为 LY100 比 LY225 时节点耗能能力要提高 7%。在实际工程中可根据荷载情况优先考虑内芯屈服强度低的屈曲约束支撑,对于 LY225 这种具有一定强度的低屈服点钢材在承受大的地震作用时可能更有优势。

3) 节点板的大小对 BRB 的耗能能力有一定的影响,随着

节点板的增大支撑的耗能性能有所提高,节点板为 500 mm × 500 mm 时计算出节点的耗散系数在四者中最大,比节点板为 300 mm × 300 mm 时节点耗能性能要提高 1.3%,但节点板尺寸变为 600 mm × 600 mm 时耗散系数反而没有增加,不成线性增长,因为节点板尺寸过大,梁柱对其直角嵌固边的约束力降低,会导致自身先发生面外失稳,进而影响整个节点的抗震性能。

4) 节点板的厚度也会影响 BRB 的耗能能力,随着节点板厚度的逐渐增大支撑的耗能性能有很明显的提高,节点板厚度从 12、16、20 到 24 mm,节点的耗能性能依次增长 1.3%、0.5% 和 0.8%。此时节点板相当于是对节点起到加腋的作用,加腋作用越强,节点承载力及抗震性能越高。

5) 节点板面外加劲肋的长度对 BRB 的耗能性能也有影响,随着加劲肋的增长,支撑的耗能性能也会有明显的提高,且面外加劲肋为 300 mm 时节点的耗散系数最大,节点的耗能能力依次增长了 1%、0.5% 和 1%,因为加劲肋对节点板来

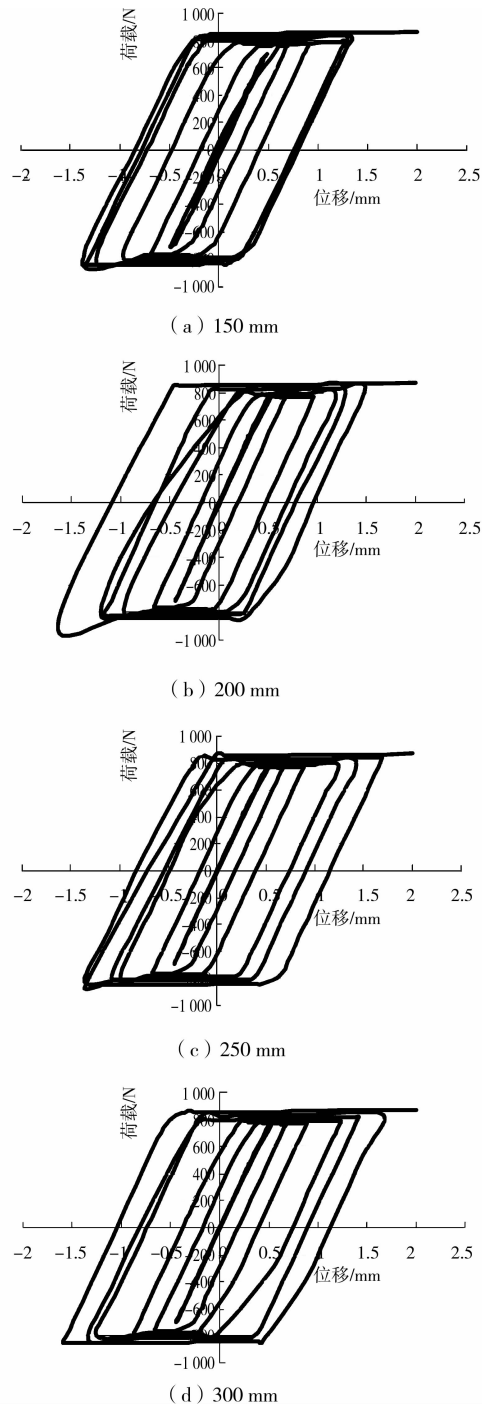


图 7 不同面外加劲肋长度下节点的滞回曲线

说起到提高节点板稳定性的作用,当节点板较薄时,其平面外抗弯刚度较小,而加劲肋板的设置大大增加了节点板整体的平面外刚度。与此同时,加劲肋越长节点板的稳定承载力就越高,进而整个节点的抗震性能也会提高。

参考文献:

- [1] 张耀春,丁玉坤. 防屈曲支撑、普通和特殊中心支撑钢框架结构抗震性能分析[J]. 建筑钢结构进展,2009,11(5):8-15.

Zhang Y C, Ding Y K. Seismic response analysis of steel frames braced with buckling-restrained, ordinary and special concentrically brace [J]. Progress in Steel Building Structures, 2009,11(5):8-15.

- [2] 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.
- [3] 邓雪松,杨叶斌,周云,等. 新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑性能[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(1):21-28.
Deng X S, Yang Y B, Zhou Y, et al. Performance of new-type steel tube buckling-restrained brace with reinforced concrete outside [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012,34(1):21-28.
- [4] Xie Q. State-of-the-art of buckling-restrained brace in Asia [J]. Journal of Construction steel Research,2005,61(6):727-748.
- [5] D'Aniello M, Corte G D, Mazzolani F M. Experimental tests of a real building seismically retrofitted by special buckling-restrained brace [J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 1020 (1):1513-1520.
- [6] Oviedo J A, Midorikawa M. Optimum strength ratio of buckling-restrained brace as hysteretic energy dissipation devices installed in R/C frames [C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [7] Takeuchi T, Hajjar J F, Matsui R, et al. Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrain braces [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010,(66): 139-149.
- [8] 王秀丽,邹磊. 带支撑的钢框架梁柱节点的力学性能研究[J]. 建筑科学,2012,28(9):1-4.
Wang X L, Zou L. Performance research on beam-column joints of steel framed structures with supports [J]. Building Science, 2012,28(9):1-4.
- [9] 刘华伟. 带屈曲约束支撑的钢筋砼框架梁柱节点抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
- [10] 刘建彬. 防屈曲支撑及防屈曲支撑钢框架设计理论研究[D]. 北京:清华大学,2005.
- [11] Chen S J, Jhang C. Cyclic behavior of low yield point steel shear walls [J]. Thin-Walled Structure, 2006,44(7):730-738.
- [12] 殷占忠,王秀丽,李晓东. 双钢管约束屈曲支撑的有限元分析[J]. 甘肃科学学报,2010,22(1):109-113.
Yin Z Z, Wang X L, Li X D. A finite element analysis of double-tube buckling restrained brace [J]. Journal of Cansu Sciences, 2010,22(1):109-113.
- [13] 张文元,陈世玺,牟伟,等. 节点板在支撑轴压力作用下的稳定分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(2):1-6.
Zhang W Y, Chen S X, Mou W, et al. Gusset plate buckling under compression caused by bracing members [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012,44(2):1-6.
- [14] Chou C C, Chen P J. Compressive behavior of central gusset plate connections for a buckling-restrained brace frame [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65: 1138-1148.
- [15] 张继承,刘飞,江韬,等. 防屈曲支撑节点板平面外稳定承载力数值分析[J]. 华侨大学学报,2010,31(2):210-214.
Zhang J C, Liu F, Jiang T, et al. Numerical analysis on out-plane stability bearing capacity of buckling restrained brace joint plate[J]. Journal of Huaqiao University,2010,31(2):210-214.