

文章编号: 1000-4750(2014)10-0136-07

考虑局部构造形式影响的焊接节点抗震性能分析

郑山锁, 徐 强, 田 进, 韩言召, 孙乐彬

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘 要: 钢结构梁柱节点的局部构造形式对结构抗震性能影响显著, 该文研究已有焊接节点构造形式的优缺点, 依据等强设计原则, 提出新型的节点构造形式。采用有限元软件 ANSYS 建立非线性有限元模型, 考虑构件局部屈曲, 对节点施加初始缺陷, 并依据已有的钢框架焊接节点试验验证所建立有限元模型的准确性和适用性。对新型节点与标准节点、加强型节点和削弱型节点在承载力、断裂性能、滞回性能、退化特性、破坏形态以及累积损伤等方面进行对比分析, 深入探讨新型构造形式节点的抗震性能。分析结果表明: 新型节点在不改变节点刚度的情况下, 能够实现塑性铰外移, 且节点破坏形态与断裂性能滞回性能稳定, 在断裂性能与累积损伤方面表现良好。

关键词: 钢结构焊接节点; 局部构造形式; 抗震性能; 等强设计; 有限元分析

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.04.0377

ANALYSIS OF SEISMIC BEHAVIOR OF WELDED CONNECTIONS CONSIDERING THE EFFECTS OF LOCAL STRUCTURAL FORM

ZHENG Shan-suo, XU Qiang, TIAN Jin, HAN Yan-zhao, SUN Le-bin

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The local structural forms of beam-column joints in steel structures have a notable effect on seismic behavior of steel frames. A new connection form adhering to the equal strength design criterion is presented in this paper, on the basis of researching the advantages and disadvantages of commonly structural forms of welded connections. A nonlinear finite model was developed using the finite element software ANSYS, considering both the local buckling and initial imperfection of the connection, and then its accuracy and applicability were validated according to existing experiments on steel frame welded joints. The seismic behavior of new-form joint was investigated in detail based on a comparative analysis between the new connection, the standard joint, the reinforced joint and the reduced beam section connection, including the following criteria: bearing capacity, fracture property, hysteretic behavior, degradation characteristics, failure mode, and accumulative damage. The analytical results show that the new proposed connection can move the plastic hinge outward from the joint zone without decreasing its stiffness. Moreover, it has a stable failure mode and hysteretic behavior and good performance in dealing with fracture and accumulated damage.

Key words: steel frame welded joints; local structural forms; seismic behavior; equal strength design; finite element analysis

收稿日期: 2013-04-25; 修改日期: 2013-09-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金项目(50978218, 51108376); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20106120110003); 陕西省科研项目(2012K12-03-01, 2010JK633, 2011KTCQ03-05)

通讯作者: 徐 强(1986—), 男, 陕西榆林人, 博士生, 从事结构工程研究及工程抗震研究(E-mail: 538270385@163.com).

作者简介: 郑山锁(1960—), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: zhengshansuo@263.net);

田 进(1987—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: tianjin19871205@sina.com);

韩言召(1989—), 男, 安徽淮北人, 硕士生, 从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: tiejiang001@sina.com);

孙乐彬(1990—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: sunlebinmail@163.com).

为避免钢结构梁柱节点在地震作用下发生脆性破坏，通常的处理方法是将塑性铰外移，其方法有三种：一是将节点局部加强，统称加强型节点，如扩翼缘型、翼缘加盖板型和翼缘加腋型等；二是梁端翼缘或腹板局部削弱，统称削弱型节点，如“狗骨”型、腹板开洞型、开长槽型以及焊接孔扩大型；三是将加强型节点和削弱型节点联合运用，即梁端翼缘局部加强，而加强区外采用翼缘“狗骨”削弱。前两类部分节点形式已被我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)采用，综合型节点目前尚在研究当中。

本文依据已有节点形式的优缺点，提出新型钢结构梁柱节点形式，与标准型节点及各类耗能节点在各性能参数方面进行对比分析，深入探讨新型节点的受力性能。

1 有限元模型与试验验证

本文采用有限元软件 ANSYS 建立钢框架节点有限元模型，梁、柱的钢材本构根据材料性试验确定，模型的初始条件、约束及加载制度与试验一致，并考虑初始缺陷。

1.1 标准节点试验验证

标准节点模型采用陈宏^[1]等的试验进行验证，构件尺寸与加载制度如图 1(a)所示，有限元模型与试验构件在变幅加载下的滞回曲线对比如图 1(b)所示，可见有限元模型模拟结果较好。

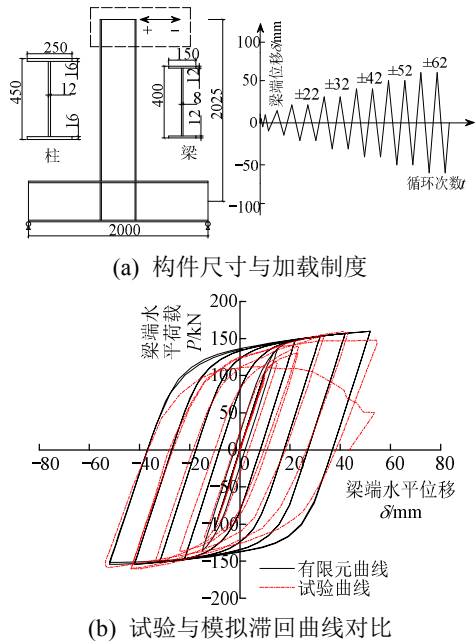


图 1 标准节点试验与有限元对比分析
Fig.1 Comparison of experimental and FEM results for standard connection

1.2 削弱型节点试验验证

削弱型节点模型采用杨庆山等^[2]的腹板开孔削弱型节点试验进行验证，构件尺寸、加载制度及有限元模型与试验对比如图 2 所示，有限元模型能够较好模拟试验结果。

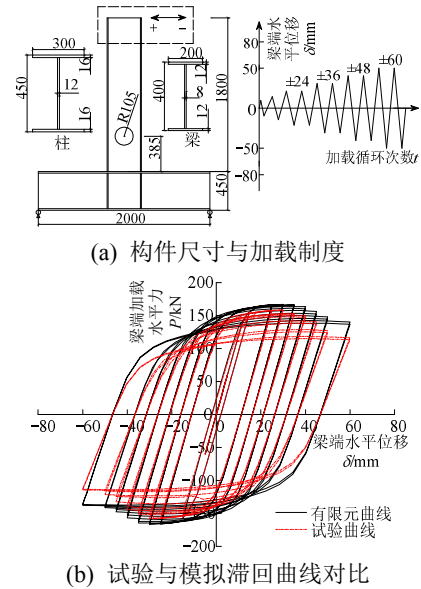


图 2 削弱型节点试验有限元对比分析

Fig.2 Comparison of experimental and FEM results for weakened connection

1.3 加强型节点试验验证

加强型节点模型采用王燕、高鹏^[3]等的扩翼缘加强型节点试验进行验证，构件尺寸、加载制度和有限元模型与试验对比如图 3 所示，有限元模型能够较好模拟试验结果。

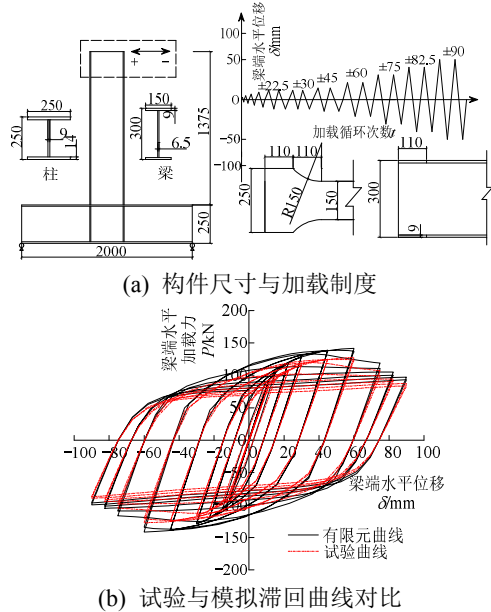


图 3 加强型节点试验有限元对比分析

Fig.3 Comparison of experimental and FEM results for reinforced connection

2 新型节点构造形式

2.1 节点局部构造形式的影响

为研究梁端局部构造形式对节点承载力的影响,建立三种节点形式,即标准节点、加强型节点和削弱型节点,根据文献[4],加强型节点中选取抗震性能最好的盖板加强型节点,削弱型节点中腹板开孔削弱型节点抗震性能表现最好,节点构造形式与尺寸见图4。

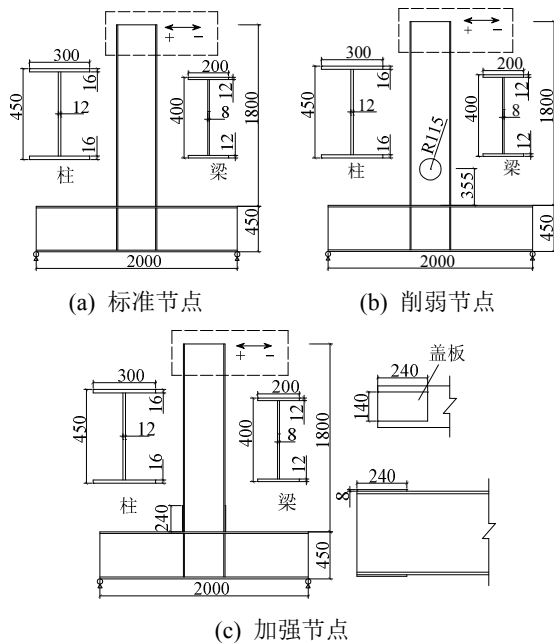


图4 三种构造形式节点

Fig.4 Three connection types

钢材本构由杨庆山等^[2]的材性试验确定。对节点施加初始缺陷并在梁端施加侧向约束,防止侧向失稳。标准节点、盖板加强型节点和腹板开孔削弱型节点承载力曲线如图5所示,盖板加强型节点承载力最高,而腹板开孔削弱型节点承载力最低,且差异较大,可见梁端局部构造形式对节点承载力影响显著。

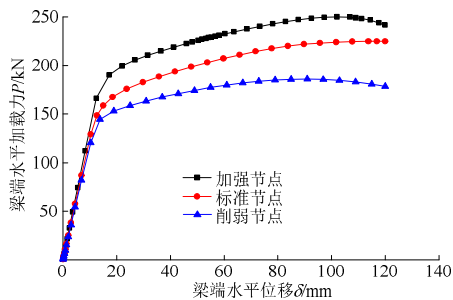


图5 三种节点形式承载力曲线对比

Fig.5 Monotonic curves for each connection type

已有研究显示,在各类节点中加强型节点在中

震情况下抗震性能表现最好^[5]。在基于能量的抗震设计方法中,结构屈服后强度对于结构能量耗散分布有重要影响,研究表明,如果结构屈服后刚度较小,即使承载力和初始刚度沿高度均匀分布,也会出现变形集中层^[6]。对于框架结构,在地震作用下梁端应先进入弹塑性状态,保证框架柱基本处于弹性状态,而加强型节点为满足“强柱弱梁”需加大柱截面,势必造成不经济,因此加强型节点并非理想节点形式。

削弱型节点已经证明对节点的抗震性能有非常明显的改善作用,但也存在梁截面的强度不能得到充分发挥的缺点,且容易引起梁削弱处翼缘和腹板的局部稳定问题,同时承载力降低会加大结构的侧向变形^[7]。

综上所述,已有的节点形式虽能够改善节点抗震性能,但都将不同程度的改变节点刚度与强度,无法保证设计要求,且对设计软件提出更高要求,因此新型节点的提出有着重要的意义。本文的思路是在不改变框架梁柱节点强度与刚度的前提下实现节点处塑性较外移,避免节点的脆性破坏,据此提出等强设计原则,采用盖板加强型节点与腹板开孔削弱型节点并用的新型节点。为叙述方便,后文将此新型节点统称为等强节点。

2.2 等强节点局部构造参数确定

为保证等强节点与标准节点屈服后强度与刚度相同或接近,改变框架梁盖板长度、腹板开孔大小及孔洞到梁端距离,调整节点承载力曲线,使其与标准节点承载力曲线接近或重合。为便于施工并减少参数变量,本文加强盖板宽度取240mm,厚度取8mm。

模拟结果显示,当同时改变盖板长度与腹板开孔位置时,节点塑性较位置可能出现在梁根部、腹板开孔削弱处或梁翼缘变截面处,差异较大。为保证塑性较外移,本文设计节点盖板长度取为腹板开孔圆心位置到梁端距离减去开孔半径,将盖板长度与腹板开孔位置两个变量统一为一个变量,用盖板长度表示。此处理方法的优点在于:1)能够保证塑性较外移至腹板开孔处,避免节点发生脆性破坏;2)盖板对塑性较区翼缘约束作用相同,有利于分析节点构造参数变化对节点受力性能的影响。

盖板长度与开孔半径改变对节点承载力的影响如图6与图7所示,数字分别表示盖板长度、孔洞圆心到梁端距离及孔径。节点极限承载力随盖板

长度增加有所提高,但峰值点之后的承载力曲线均逐渐趋于一致,且与仅腹板开孔削弱型节点承载力曲线接近。腹板开孔半径对节点承载力影响显著,且不同孔径的节点在屈服点之后承载力曲线斜率几乎相同。

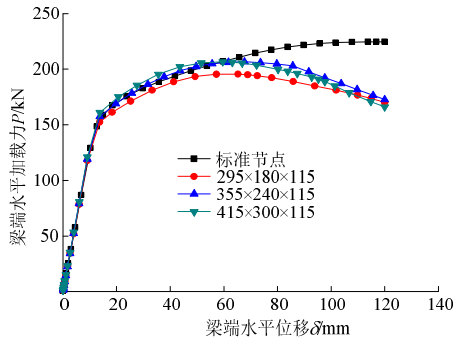


图6 不同盖板长度节点单调加载曲线对比图

Fig.6 Monotonic curves for connections with different plate length

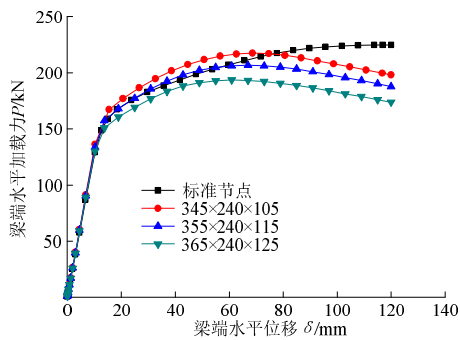


图7 不同开孔半径节点单调加载曲线对比图

Fig.7 Monotonic curves for connections with different aperture radius

通过改变盖板长度与孔径,选择一系列与标准节点承载力相近的节点局部参数,如图8所示,并最终确定一组与标准节点承载力最相近的节点,盖板长度为240mm,腹板开孔半径为115mm,孔洞圆心到梁端距离为355mm,如图9所示。

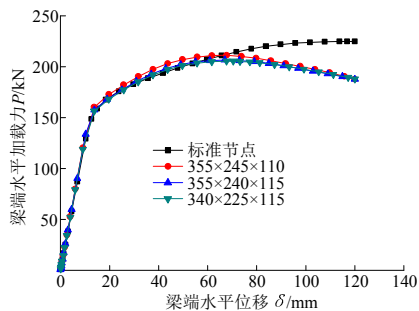


图8 不同构造形式节点单调加载曲线对比图

Fig.8 Monotonic curves for different structural patterns

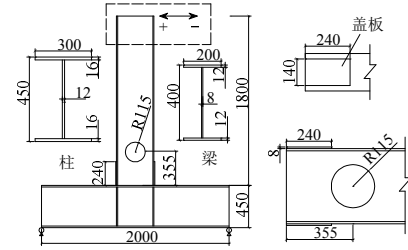


图9 等强节点构造形式示意图

Fig.9 Structural design of equal strength connections

3 各类节点受力性能对比分析

3.1 承载力对比分析

各类节点承载力分析结果见表1和图10,盖板加强型节点的极限承载力较标准节点提高12%;腹板开孔削弱型节点的极限承载力较标准节点降低17%;等强节点的极限承载力较标准节点降低6%。等强节点前期承载力曲线与标准节点几乎重合,这是由于盖板的存在提高了翼缘的屈曲荷载,而腹板开孔削弱减小了截面有效面积,使得承载力曲线降低,增强与削弱作用几乎相互抵消。后期承载力降低较大,这是由于塑性铰出现在开孔削弱处,翼缘屈曲后盖板的约束影响逐渐减小,截面的极限承载力相比未削弱有所下降,与腹板开孔削弱型节点承载力接近,但在转角0.03rad前与标准节点几乎重合,满足规范要求。

表1 算例节点承载性能对比分析

Table1 Bearing behavior of example connections

类型	承载力峰值/kN	承载力比值/kN	弹性刚度/(kN/m)	刚度比值
标准节点	224.7	1	12453.2	1
腹板开孔	186.0	0.83	11690.5	0.94
盖板加强	249.9	1.12	13392.5	1.08
新型节点	209.7	0.94	12881.2	1.03

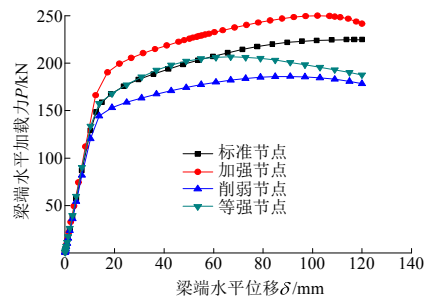


图10 算例节点单调加载曲线对比

Fig.10 Monotonic curves of example connections

3.2 断裂性能对比分析

断裂指数 RI 最初由 Hancock 等提出,节点某一部位的 RI 指数越大,则该处发生脆性断裂的可能性就越大^[8],其计算式为:

$$RI = \frac{\varepsilon_{eq}^{pl} / \varepsilon_y}{\exp(-1.5\sigma_0 / \sigma_e)} \quad (1)$$

式中： ε_{eq}^{pl} 为等效塑性应变； ε_y 为屈服应变； σ_0 为平均主应力； σ_e 为 Von Mises 应力。

加载点水平位移达到 35mm 时各类节点梁翼缘根部断裂指数对比如图 11 所示。研究表明^[9]，当 $20 \leq RI \leq 40$ 时，易发生脆性断裂； $RI > 40$ 时，结构非常危险，发生脆性破坏可能性极大。可见，标准节点最易发生脆性破坏，其原因是标准节点梁根部应力集中且应力沿梁长在此处最大，而其他三种节点通过不同形式的加强或削弱使得最易发生破坏的位置外移，所以开裂指数相比标准节点降低较多。

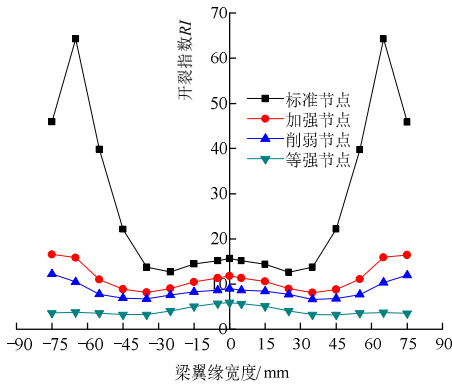


图 11 算例节点断裂指数 RI 对比分析

Fig.11 Fracture index RI comparison analysis of example connections

3.3 滞回性能对比分析

节点选取如图 12 所示的加载制度，滞回曲线对比如图 13 所示，其中等强节点的刚度和承载力与标准节点接近，且滞回性能更为理想。开洞削弱节点滞回性能虽然理想，但节点的刚度和承载力与标准节点相比有所降低。盖板加强节点的刚度和承载力与标准节点相比有所提高，但滞回性能并不理想。

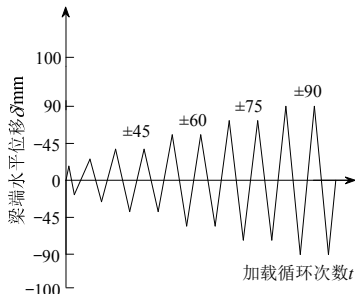


图 12 算例节点加载制度

Fig.12 Loading of example connections

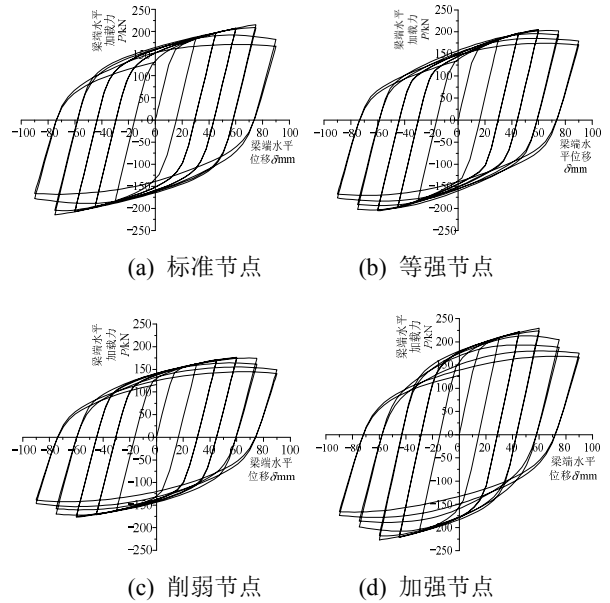


图 13 算例节点变幅加载滞回曲线对比

Fig.13 Hysteretic curves of example connections

由图 14 骨架曲线的对比图可见，在滞回的初始阶段，各类节点骨架曲线与标准节点骨架曲线基本重合，随着圈数和幅度的增加，等强节点与腹板开洞节点骨架曲线强度退化稳定，且等强节点整体滞回性能较其他节点更好。

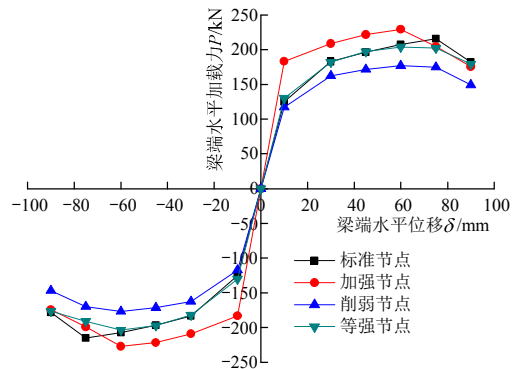


图 14 算例节点滞回骨架曲线对比

Fig.14 Skeleton curves of example connections

3.4 退化特性对比分析

各类节点在循环荷载下，塑性变形不断累积，局部屈曲现象越来越明显，造成节点强度和刚度的退化现象。由图 15 和表 2 可见，等强节点强度退化曲线低于其他节点，退化性能最优，强度退化率最大值为 0.10。盖板加强型节点前期强度退化值小于标准节点，后期强度退化值大于标准节点的强度退化值。总体而言，各类节点的强度退化程度均随加载循环次数的增加而增大。

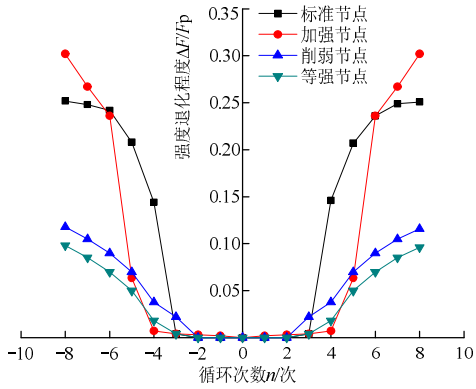


图 15 算例节点强度退化曲线对比

Fig.15 Strength degradation of example connections

表 2 算例节点退化特性结果

Table 2 Degradation characteristics of example connections

类型	强度最大	强度最大	刚度最大	刚度最大
	正向退化	负向退化	正向退化	负向退化
标准节点	0.26	0.26	0.15	0.15
盖板加强	0.30	0.31	0.22	0.20
腹板开孔	0.13	0.13	0.18	0.19
等强节点	0.10	0.10	0.17	0.18

3.5 破坏形态对比分析

从表 3 和图 16 可见局部构造对节点的破坏形态影响显著，且对塑性铰出现的位置起控制作用。标准节点的塑性铰位置在根部，容易发生脆性破坏。盖板加强型节点、腹板开孔削弱型节点及等强节点均能实现塑性铰外移，避免节点脆性破坏。

表 3 算例节点破坏形态对比分析

Table 3 Failure characteristics of example connection

类型	标准节点	腹板开孔	盖板加强	等强节点
局部屈曲位置/mm	175	300	280	400
塑性铰长度/mm	300	400	350	450

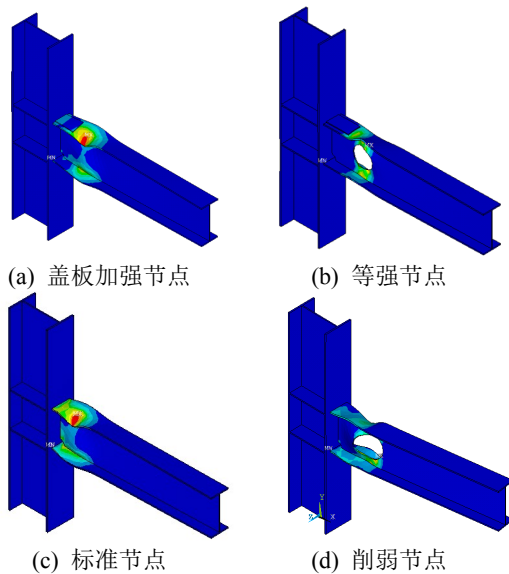


图 16 算例节点破坏形态

Fig.16 Failure mode of example connection

3.6 累积损伤分析

本文选用适用于节点在循环荷载作用下的累积损伤模型^[10]，通过损伤指数 DM 研究各类节点梁根部翼缘处的累积损伤，损伤指数表达式为：

$$DM = (1 - \beta) \frac{\varepsilon_{m,p}}{\varepsilon_{u,p}} + \beta \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_{i,p}}{\varepsilon_{u,p}} \quad (2)$$

式中： $\varepsilon_{m,p}$ 表示在循环荷载作用下梁翼缘根部焊缝处产生的最大塑性应变； $\varepsilon_{i,p}$ 表示在循环荷载作用下梁根部翼缘处在第 i 半周循环所产生的塑性应变； $\varepsilon_{u,p}$ 表示钢材的极限塑性应变； β 为损伤计算模型的权重系数，取 0.0081。

根据本文加载制度对节点梁上翼缘根部处在循环加载过程中的累积损伤指数进行分析，累积损伤曲线如图 17 所示，等强节点的损伤指数最小。分析可知，在加载循环次数小于 15 时，各类节点的最大变形均发生在梁根部，因此损伤指数均随循环次数的增加而增大，而在加载循环次数大于 15 时，因塑性铰的位置不同，标准节点的损伤指数随着加载循环次数的增加而增大，而其余节点的损伤指数由于塑性铰外移而保持不变。

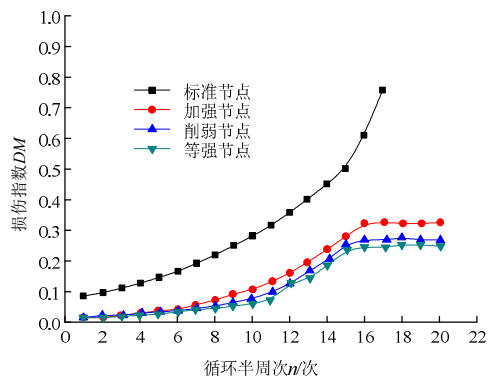


图 17 算例节点累积损伤对比分析

Fig.17 Cumulative damage of example connections

3.7 不同构造形式节点抗震性能总结对比分析

综前所述，四种不同构造形式节点的对比分析结果如表 4 所示。

表 4 算例节点抗震性能对比分析

Table 4 Energy dissipation capacity of example connection

类型	标准节点	等强节点	腹板开孔	盖板加强
承载力	-	○	△	○
断裂指数	×	○	○	○
滞回性能	-	○	△	○
退化性能	-	○	○	○
破坏形态	×	○	○	○
累计损伤	-	○	○	○
经济性能	-	○	○	△

注：○较好；△中等；×较差。

4 结论

本文根据等强原则提出一种新型钢框架梁柱焊接节点, 建立其非线性模型并进行有限元分析, 对比各类耗能节点的抗震性能, 得到如下结论:

(1) 通过对比模拟与试验在宏观破坏形态和局部屈曲等方面的吻合程度, 验证本文非线性有限元模型的准确性与适用性。

(2) 本文建立的新型节点能够很好地实现塑性铰外移, 避免节点发生脆性破坏。在转角为 0.03rad 前不改变节点刚度与强度, 滞回耗能能力与破坏形式都优于已有耗能节点。

(3) 节点局部构造对框架梁的破坏形式与耗能能力影响显著, 具体影响规律有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈宏. 高层钢结构节点地震脆断机理及抗震性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2001.
Chen Hong. Seismic brittle fracture mechanism and seismic behavior of steel beam-column connections in tall buildings [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2001. (in Chinese)
- [2] 杨庆山, 李波, 杨娜. 梁腹板开圆孔钢框架梁柱节点的性能研究[J]. 工程力学, 2007, 24(9): 111—139.
Yang Qingshan, Li Bo, Yang Na. Investigation on behaviors of the connection with opening in beam web of steel moment resisting frames [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 111—139. (in Chinese)
- [3] 高鹏. 钢框架梁端翼缘侧板加强式和扩翼式节点受力性能的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.
Gao Peng. Experimental evaluation on the behaviors of side-plate reinforced section and widen flange section of steel frame [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009. (in Chinese)
- [4] 石永久, 王萌, 王元清. 钢框架不同构造形式焊接节点抗震性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 75—83.
Shi Yongjiu, Wang Meng, Wang Yuanqing. Analysis on seismic behavior of different structural constructions of welded steel frame connections [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 75—83. (in Chinese)
- [5] Kim T, Kim J. Collapse analysis of steel moment frames with various seismic connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 65(6): 1316—1322.
- [6] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 屈服后刚度对建筑结构地震响应影响的研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 17—29.
Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, et al. Influence of post-yielding stiffness to seismic response of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 17—29. (in Chinese)
- [7] Li Fengxiang, Iori Kanao, Li Jun, Kiyotaka Morisako. Local buckling of RBS beams subjected to cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(12): 475—496.
- [8] Hancock J W, MacKenzie A C. On the mechanisms of ductile failure in high strength steel subject to multi-axial stress-states [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1976, 24(213): 147—169.
- [9] 王薇. 钢框架板式加强型焊接节点的断裂性能分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
Wang Wei. Study on fracture behavior of plate welded moment-resisting connections in steel frame [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011. (in Chinese)
- [10] Le Wu Lu, James M Ricles, Changshi Mao, et al. Critical issues in achieving ductile behavior of welded moment connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 55(1/2/3): 325—341.