

文章编号:1673-2049(2019)05-0106-13

梁柱“上焊下栓”节点受力性能

郁有升^{1,2},袁鹏程¹,王 胜³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033; 2. 青岛理工大学 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心,山东 青岛 266033; 3. 青建集团股份公司,山东 青岛 266071)

摘要:为研究“上焊下栓”节点梁塑性铰与拼接区滑移出现的先后顺序及拼接区耗能所占的比例,通过改变翼缘拼接板的截面面积,设计了2组试件,利用有限元软件 ABAQUS 对其进行了单调荷载和低周往复荷载作用下的有限元分析;同时以梁柱“上焊下栓”节点的 BASE 试件为例,对比分析了梁柱“上焊下栓”节点 BASE 试件与相同参数的“互”字形节点和传统栓焊混合节点的破坏模式、滞回曲线以及骨架曲线。结果表明:当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 $2/3$ 倍 ~ 1.0 倍时,拼接区的板件变形和滑移能得到充分发展;当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 1.0 倍 $\sim 4/3$ 倍时,梁拼接区的板件变形和滑移未能得到充分发展;在低周往复荷载作用下,2组“上焊下栓”节点的破坏模式相似,当梁端位移角约为 0.024 rad 时,梁下翼缘与拼接板开始出现滑移;当梁端位移角约为 0.036 rad 时,塑性铰出现在悬臂梁上;在整个加载过程中,梁拼接区的板件变形和滑移的耗能占总耗能的 $39\%\sim 45\%$;梁柱“上焊下栓”节点 BASE 试件的延性、耗能性能以及变形能力低于相同参数的“互”字形节点,但略高于传统栓焊混合节点。

关键词:“上焊下栓”节点;受力性能;低周往复荷载;耗能能力

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Mechanical Performance of Beam-column Connection with Upper Flange Welded-lower Flange Bolted

YU You-sheng^{1,2}, YUAN Peng-cheng¹, WANG Sheng³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China;
2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China; 3. Qingjian Group Co., Ltd., Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: In order to study the appearance sequence of plastic hinge and splicing slippages, and the proportion of energy dissipation of splicing, two groups of test specimens were designed by changing the cross-section area of flange splice plate. The finite element analysis of the new connection under monotonic and low cycle reversed loading was simulated by the ABAQUS software. Taking the BASE specimen of beam-column connection with upper flange welded-lower flange bolted as an example, the failure modes, hysteresis curves and skeleton curves of the BASE specimen of beam-column connection with upper flange welded-lower flange bolted were compared with those of the “HU” connection and the traditional bolted-welded hybrid connection designed with the same parameters. The results show that the deformation and the slipping of

收稿日期:2018-11-23

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE068)

作者简介:郁有升(1976-),男,山东莒南人,副教授,工学博士,E-mail:yuyousheng@126.com。

splicing can be fully developed when the cross-section area of flange splice plate is $2/3$ - 1.0 times as large as the flange. The deformation and slipping of splicing cannot be fully developed when the cross-section area of splice plate is 1.0 - $4/3$ times as large as the flange. Under low cycle reversed loading, the failure modes of the two groups of connections with upper flange welded-lower flange bolted are similar. When the interstory drift angle of beam end is about 0.024 rad, the lower flange and the splice plate begin to slip. When the interstory drift angle of beam end is about 0.036 rad, the plastic hinge appears on the cantilever beam. During the whole loading process, the energy dissipation of the deformation and the slipping of splicing account for 39% - 45% of the total energy dissipation. The ductility, energy dissipation and deformation of BASE specimen of beam-column connection with upper flange welded-lower flange bolted are lower than those of the “HU” connection designed with the same parameters, but are slightly higher than those of the traditional bolted-welded hybrid connection.

Key words: connection with upper flange welded-lower flange bolted; mechanical performance; low cycle reversed loading; energy dissipation

0 引言

装配式钢结构是将建筑中部分或全部构件在工厂进行生产,然后运输到施工现场进行装配而成的建筑结构,具有施工周期短、节约劳动力、减少污染和保护环境等优点,是现代化建筑结构的发展方向;在装配式钢结构中梁柱节点起到传递结构内力和协调结构变形的作用,是装配式钢结构的关键部位^[1]。目前,带悬臂梁段拼接的梁柱节点在世界各国钢结构工程中有广泛的应用。

国内外学者对钢框架梁柱节点的抗震性能进行了大量研究^[2-23],结果表明钢框架梁柱节点具有较好的抗震性能,且带悬臂梁段拼接的梁柱节点的梁拼接处在抗震中能提供稳定的耗能能力,在钢框架梁柱节点中螺栓拼接节点的延性远好于梁柱焊缝连接的延性。文献[24]研究了一种“互”字形装配式梁柱节点(图 1),该节点所有焊缝均在工厂完成,且交互布置拼接板方便安装定位,但梁上翼缘的拼接板和螺栓凸起给楼板施工造成不便。针对“互”字形节点的不足,进行改进而形成了一种新型的梁柱“上焊下栓”节点(图 2),该节点的梁上翼缘采用焊接连接,下翼缘采用拼接板连接。新型节点的梁上表面平整,方便楼板的铺设。

为了深入探讨“上焊下栓”节点的受力性能,利用有限元软件 ABAQUS 对节点进行单调荷载和低周往复荷载作用下的有限元分析,分析了不同拼接参数对其破坏模式、节点性能、滞回曲线、骨架曲线、承载力、耗能能力的影响。

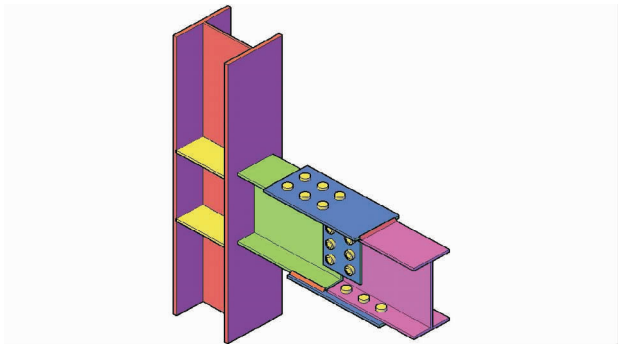


图 1 “互”字形节点
Fig. 1 “HU” Connection

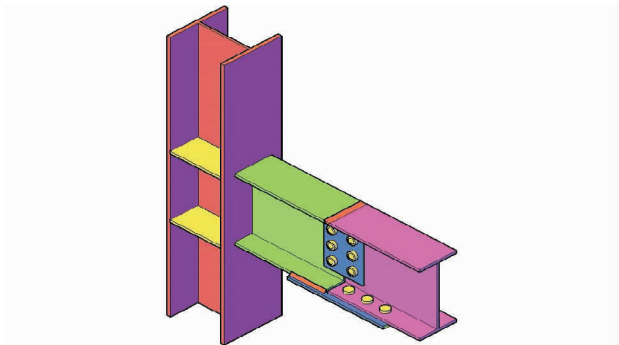


图 2 “上焊下栓”节点
Fig. 2 Upper Flange Welded-lower Flange Bolted Connection

1 试件设计

1.1 梁柱“上焊下栓”节点组成

梁柱“上焊下栓”节点由带悬臂梁段的柱、框架梁、拼接板以及高强螺栓组成,如图 3 所示。“上焊下栓”节点的上翼缘采用对接焊缝连接,下翼缘拼接

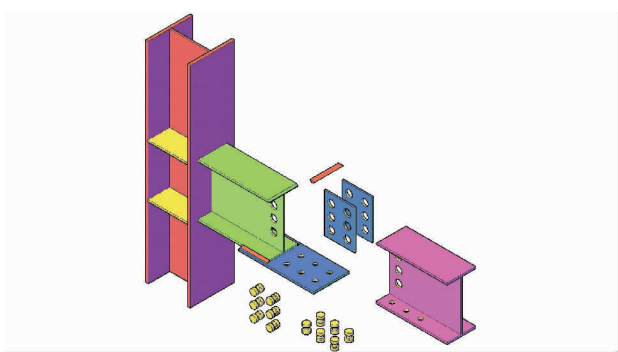


图 3 梁柱“上焊下栓”节点的组件

Fig. 3 Components of Beam-column Connection with Upper Flange Welded-lower Flange Bolted

板一侧采用角焊缝与悬臂梁下翼缘连接,另一侧采用高强螺栓与框架梁下翼缘连接。节点生产和组装过程如下:在工厂内完成节点各部件及连接件的制作,将翼缘拼接板焊接在悬臂梁下翼缘,并完成钢柱与加劲肋、钢柱与悬臂梁的焊接连接;安装时梁下翼缘拼接板充当就位耳板,框架梁吊装就位后,先用高强螺栓完成框架梁下翼缘的拼接,再用高强螺栓完成梁腹板的拼接,最后通过焊接完成悬臂梁上翼缘与框架梁上翼缘的拼接。

1.2 模型几何参数

试件参数如下:钢材均选用 Q345B 热轧 H 型钢,悬臂梁和拼接梁截面尺寸均为 $\text{HN}300\times160\times8\times10$,悬臂梁段长度为 0.395 m,拼接梁段长度为 0.97 m;柱截面尺寸为 $\text{HW}250\times250\times9\times14$,柱的长度为 1.36 m;采用 10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓,试件螺栓孔的直径为 21.5 mm;采用等强度设计方法对试件进行初步设计,计算出翼缘拼接板和腹板拼接板所需的螺栓个数均为 6 个,最后得出翼缘拼接板的尺寸为 $400\text{ mm}\times200\text{ mm}\times12\text{ mm}$,腹板拼接板的尺寸为 $220\text{ mm}\times170\text{ mm}\times8\text{ mm}$ 。“上焊下栓”节点详图见图 4。钢材、焊缝及高强螺栓的应力-应变关系均采用二折线模型,材料性能指标见表 1^[25],其中, E 为弹性模量, ν 为泊松比, $\sigma_y,\sigma_u,\epsilon_y,\epsilon_u$ 分别为屈服强度、极限强度、屈服应变和极限应变。

1.3 影响参数

利用有限元软件分析了翼缘拼接板截面面积对“上焊下栓”节点的受力性能、梁塑性铰与拼接区滑移出现的先后顺序及梁拼接区耗能所占比例的影响。翼缘拼接板的截面面积由宽度和厚度确定,通过改变翼缘拼接板的宽度或厚度来改变截面面积。不同翼缘拼接板的截面面积控制参数见表 2。

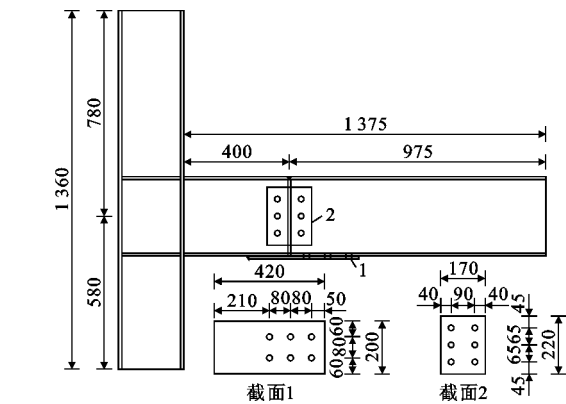


图 4 “上焊下栓”节点详图(单位:mm)

Fig. 4 Details of Connection with Upper Flange Welded-lower Flange Bolted (Unit:mm)

表 1 材料性能指标

Tab. 1 Performance Indices of Materials

材料	钢材	焊缝材料	高强螺栓
$E/10^5\text{ MPa}$	2.06	2.06	2.06
ν	0.3	0.3	0.3
σ_y/MPa	360	410	980
σ_u/MPa	554	490	1 100
$\epsilon_y/10^{-2}$	0.175	0.199	0.480
$\epsilon_u/10^{-2}$	25.00	12.00	1.36

表 2 翼缘拼接板截面面积控制参数

Tab. 2 Control Parameters of Cross-section Area of Flange Splice Plate

试件编号	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	摩擦因数
BASE	420	200	12	0.45
W140	420	140	12	0.45
W160	420	160	12	0.45
W180	420	180	12	0.45
W220	420	220	12	0.45
W240	420	240	12	0.45
T8	420	200	8	0.45
T10	420	200	10	0.45
T14	420	200	14	0.45
T16	420	200	16	0.45

2 有限元模型

2.1 有限元建模

采用有限元分析软件 ABAQUS 对“上焊下栓”节点进行建模,梁、柱、拼接板、螺栓及焊缝均采用三维实体单元 C3D8I。柱和悬臂梁、梁拼接处焊缝与拼接板、焊缝与梁的连接均采用“tie”;考虑拼接板与下翼缘和腹板,螺栓帽、螺母与板件之间的摩擦作用以及螺栓杆与螺栓孔壁之间的接触作用,所有的接触均选用面-面接触。为了较准确得到梁拼接处

的应力和应变分析结果,在梁拼接处采用更精细的网格划分,其网格尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,其他部分则采用更为疏松的网格划分,见图 5。模型的边界条件为:约束柱端的所有平动自由度来模拟铰接边界条件,在柱顶施加 300 kN 的轴向力,将拼接梁外截面耦合到梁截面几何中心点上,在耦合点上施加荷载。

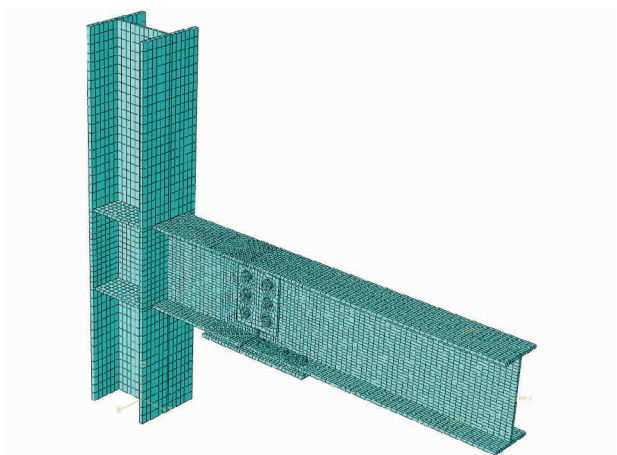


图 5 有限元网格划分

Fig. 5 Finite Element Mesh Generation

2.2 有限元加载制度

试件加载模拟时荷载的施加顺序结合工程实际进行,首先施加螺栓的预拉力 155 kN ,然后施加柱顶轴力 300 kN ,最后施加梁端荷载,梁端荷载采用位移控制加载。根据文献[26],先对 BASE 试件进行单调加载,由单调加载的荷载-位移曲线确定试件的屈服位移 Δ_y ,取 $\Delta_y = 18\text{ mm}$ 作为试件的有限元屈服位移。单调加载的位移取 350 mm ,加载方向向下。低周往复荷载的加载方式为:屈服前取梁端加载位移 $\Delta = 3.6\text{ mm}$ 作为第 1 级荷载,以后每级荷载增量为 Δ ,每级荷载施加 1 个循环;屈服后每级荷载增量为 Δ_y ,每级荷载施加 2 个循环,直至加载位移达到 108 mm ,加载制度见图 6。位移加载方向向上为正,向下为负。

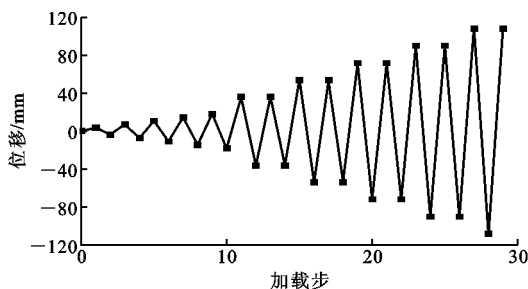


图 6 加载制度

Fig. 6 Loading System

2.3 有限元结果计算

梁柱节点弯矩-位移角采用 FEMA-350 的计算方法^[27],梁柱节点位移角示意图 7,其中 θ 为位移角, L 为梁端加载点至柱节点域中心的距离;图 8 为梁柱节点计算简图(F 为梁端加载点的荷载),图 9 为梁端弯矩示意图(M 为柱节点域中心的弯矩, M_1 为梁拼接区的弯矩, L_1 为梁端加载点至悬臂梁端的距离, L_2 为悬臂梁端至柱节点域中心的距离),图 10 为梁拼接区位移角示意图(Δ_1 为拼接梁相对于悬臂梁位移角引起的梁端加载点位移, Δ_2 为悬臂梁端竖向位移引起的梁端加载点位移, Δ_3 为悬臂梁端竖向位移, θ_1 为拼接梁相对于悬臂梁的位移角)。

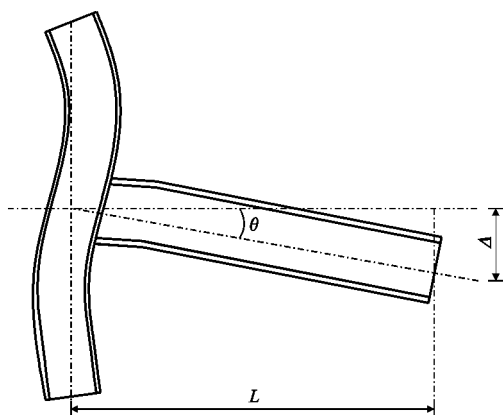


图 7 梁柱节点位移角示意

Fig. 7 Interstory Drift Angle Diagram of Beam-column Connection

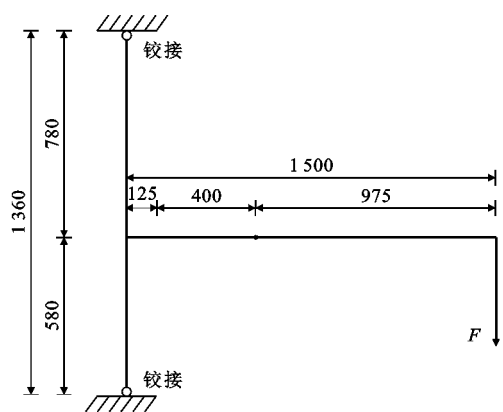


图 8 梁柱节点计算简图(单位:mm)

Fig. 8 Calculation Diagram of Beam-column Connection (Unit:mm)

梁柱节点弯矩-位移角和拼接区的弯矩-位移角的计算公式如下

$$M = FL, \theta = \Delta / L \quad (1)$$

$$\Delta_2 = \Delta_3 L / L_2, \Delta_1 = \Delta - \Delta_2 \quad (2)$$

$$M_1 = FL_1, \theta_1 = \Delta_1 / L_1 \quad (3)$$

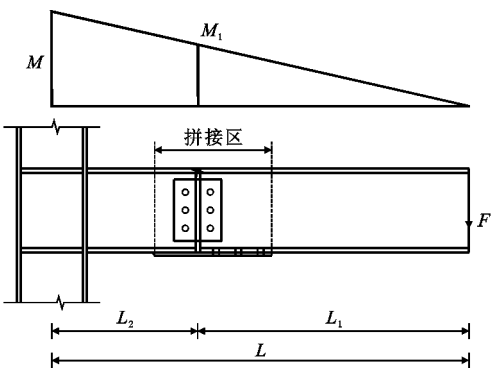


图 9 梁段弯矩示意

Fig. 9 Bending Moment Diagram of Beam Segment

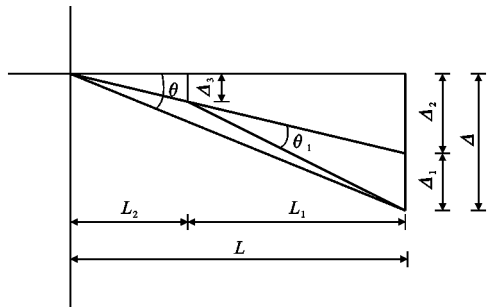


图 10 梁拼接区位移角示意

Fig. 10 Interstory Drift Angle Diagram of Splices

2.4 有限元验证

为了验证有限元模型的准确性,采用有限元软件 ABAQUS 对文献[28]中试件 CT-1 进行数值分析,试验结果与有限元计算结果对比见图 11。

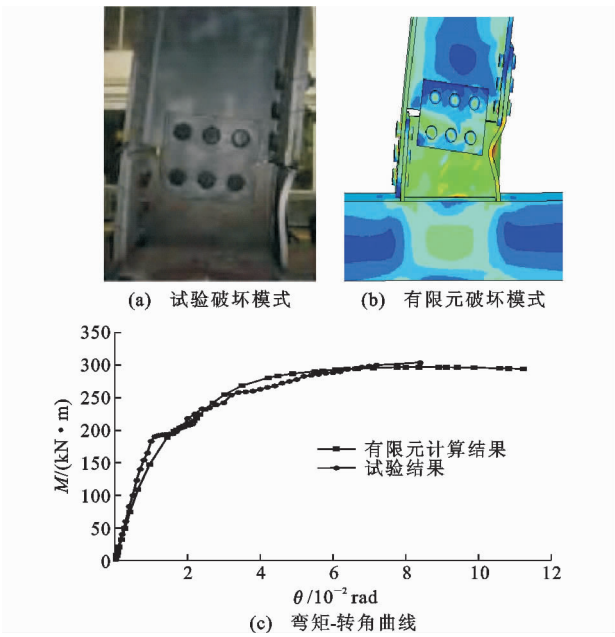


图 11 试验结果与有限元计算结果对比

Fig. 11 Comparison Between Experiment and FEM Analysis Calculation Results

由图 11 可知,有限元和试验的破坏模式和弯矩-转角曲线较为一致,但有限元破坏模式的钢材未发生开裂,这是由于在有限元模拟中未考虑钢材的开裂,这验证了本文有限元模拟的有效性。

3 单调加载分析

对不同拼接参数下的试件进行单调加载有限元分析,得到试件的荷载-位移曲线,见图 12。从图 12 可以看出:试件的承载力在达到极限荷载前出现了先下降后缓慢上升的现象,这是由于在单调荷载作用下,梁拼接区下翼缘的螺栓出现滑移,且随着加载位移的增加,螺栓杆与孔壁发生挤压所致;随着翼缘拼接板宽度的增加,除 W240 外,试件出现滑移时的荷载及其所对应的位移变化不大,而试件在达到极限荷载后承载力下降趋势随之增加;随着翼缘拼接板厚度的增加,试件出现滑移时的荷载及其所对应的位移增加,且试件的荷载-位移曲线在达到极限荷载后承载力下降趋势也随之增加,这是由悬臂梁未拼接区下翼缘及腹板的塑性变形随着翼缘拼接板截面面积的增加而增加所致。这说明在单调荷载作用下,增加翼缘拼接板的截面面积,节点在达到极限荷载后承载力下降趋势随之增加。

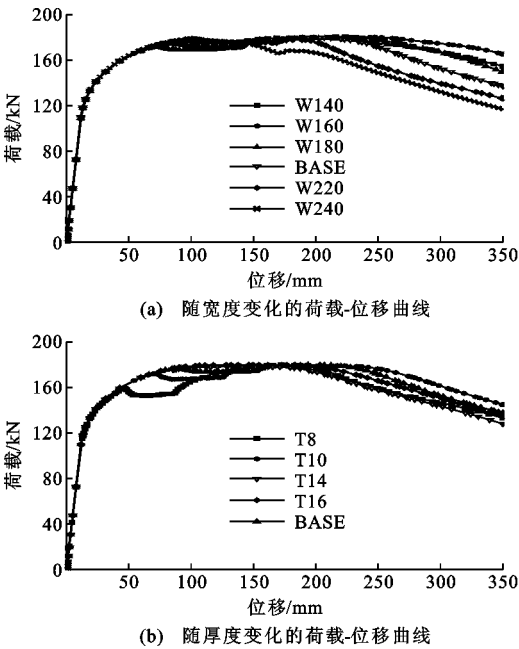


图 12 荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement Curves

4 低周往复荷载分析

4.1 破坏模式

在低周往复荷载作用下,不同拼接参数下试件

的受力过程及破坏模式基本相似,现以 BASE 试件为例分析“上焊下栓”节点在低周往复荷载作用下的破坏模式。图 13 为“上焊下栓”节点 BASE 试件的应力云图。

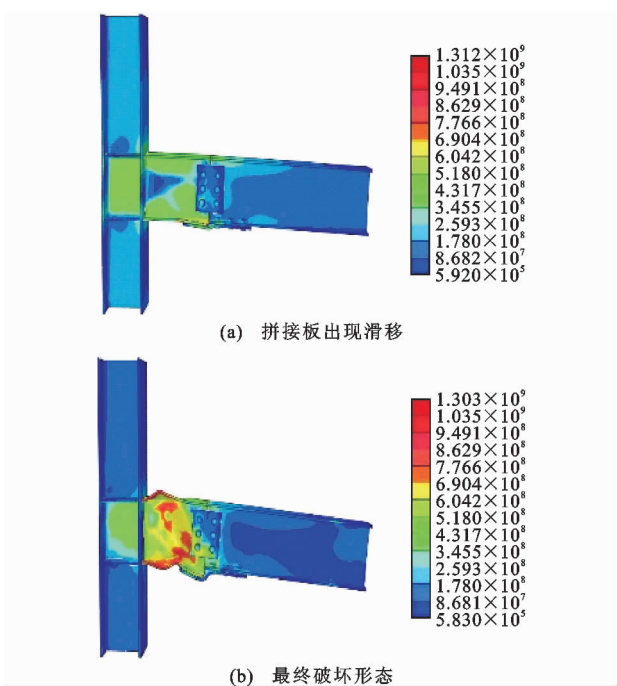


图 13 “上焊下栓”节点的应力云图(单位:Pa)
Fig. 13 Stress Nephogram of Connection with Upper Flange Welded-lower Flange Bolted (Unit:Pa)

“上焊下栓”节点在低周往复荷载作用下,经历了充分的弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段;在加载初始阶段,悬臂梁上、下翼缘首先达到屈服强度,此时应力最大处为悬臂梁上、下翼缘靠近柱面处和悬臂梁下翼缘拼接板附近,同时翼缘拼接板出现微小弯曲;当梁端位移角约为 0.024 rad 时,由于梁下翼缘受压,且压力达到下翼缘的摩擦力时,梁下翼缘与拼接板先出现滑移[图 13(a)];当梁端位移角约为 0.036 rad 时,塑性铰出现在悬臂梁上;随着梁端位移角的增大,塑性铰区域和梁下翼缘与拼接板的滑移量随之扩大[图 13(b)]。在整个加载过程中,节点能有效利用悬臂梁上的塑性铰、拼接区的板件变形以及滑移实现耗能。

4.2 滞回曲线

图 14 为不同翼缘拼接板宽度和厚度的弯矩-位移角滞回曲线。从图 14 可以看出:由于节点几何非对称性,“上焊下栓”节点的滞回曲线呈显著的非对称性;当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 $2/3$ 倍~ 1.0 倍时,随着拼接板截面面积的减小,试件的承载力在达到极限荷载之后,滞回环面积逐渐增大,且随着梁

端位移角的增大,负向承载力的下降趋势随之减小,这是由于在循环荷载作用下,梁拼接区下翼缘比悬臂梁上翼缘先出现屈曲,且拼接区的板件变形和滑移均能得到充分发展所致;当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 1.0 倍~ $4/3$ 倍时,随着拼接板截面面积的增加,悬臂梁上翼缘比梁拼接区下翼缘先出现屈曲,试件的承载力在达到极限荷载之后,滞回环的面积逐渐减小,且随着梁端位移角的增大,负向承载力的下降趋势随之增大,这是由于在循环荷载作用下,悬臂梁上翼缘比梁拼接区下翼缘先出现屈曲,且拼接区的板件变形和滑移未能得到充分发展所致,继续加载时,试件的负向承载力下降较快。

综上分析,当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 $2/3$ 倍~ $4/3$ 倍时,可通过减小翼缘拼接板的截面面积使梁下翼缘拼接板先出现屈服,并以屈服后的变形来吸收外部输入的能量,从而减小梁端的应力,对梁柱连接的关键部位起到“保险丝”的作用。因此,当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 $2/3$ 倍~ 1.0 倍时,在中、小震作用下,梁下翼缘拼接板先出现屈曲,在震后可通过更换翼缘拼接板对节点进行修复,从而实现结构在震后的快速修复。

4.3 骨架曲线

不同拼接参数下试件的骨架曲线见图 15,16。所有的骨架曲线均呈 S 形,在钢梁屈服之前,骨架曲线基本呈线性变化,钢梁屈服之后,骨架曲线呈明显的非线性变化。

由图 15,16 可知,试件在出现滑移之前,骨架曲线基本一致,发生滑移之后,骨架曲线产生分离,滑移特性明显。增加翼缘拼接板的截面面积,各试件的承载力达到极限荷载后,其正向承载力下降不明显,而负向承载力呈明显下降趋势,且拼接板的截面面积越大,试件的负向荷载下降幅度越大,说明增加翼缘拼接板的截面面积能降低节点的负向承载力。

4.4 承载力

表 3 为不同宽度的极限弯矩分析结果。由表 3 可知,各试件的极限弯矩与 BASE 试件的极限弯矩相差不大,除 W240 外,各试件的梁端位移角相差不大,说明通过改变拼接板的宽度来改变截面面积对试件的极限弯矩和变形能力影响很小。

表 4 为不同厚度的极限弯矩分析结果。由表 4 可知,各试件的极限弯矩与 BASE 试件的极限弯矩相差不大,但随着拼接板厚度的增加,各试件的梁端位移角逐渐减小,说明通过增加拼接板厚度来改变截面面积在一定程度上减小试件变形能力和延性。

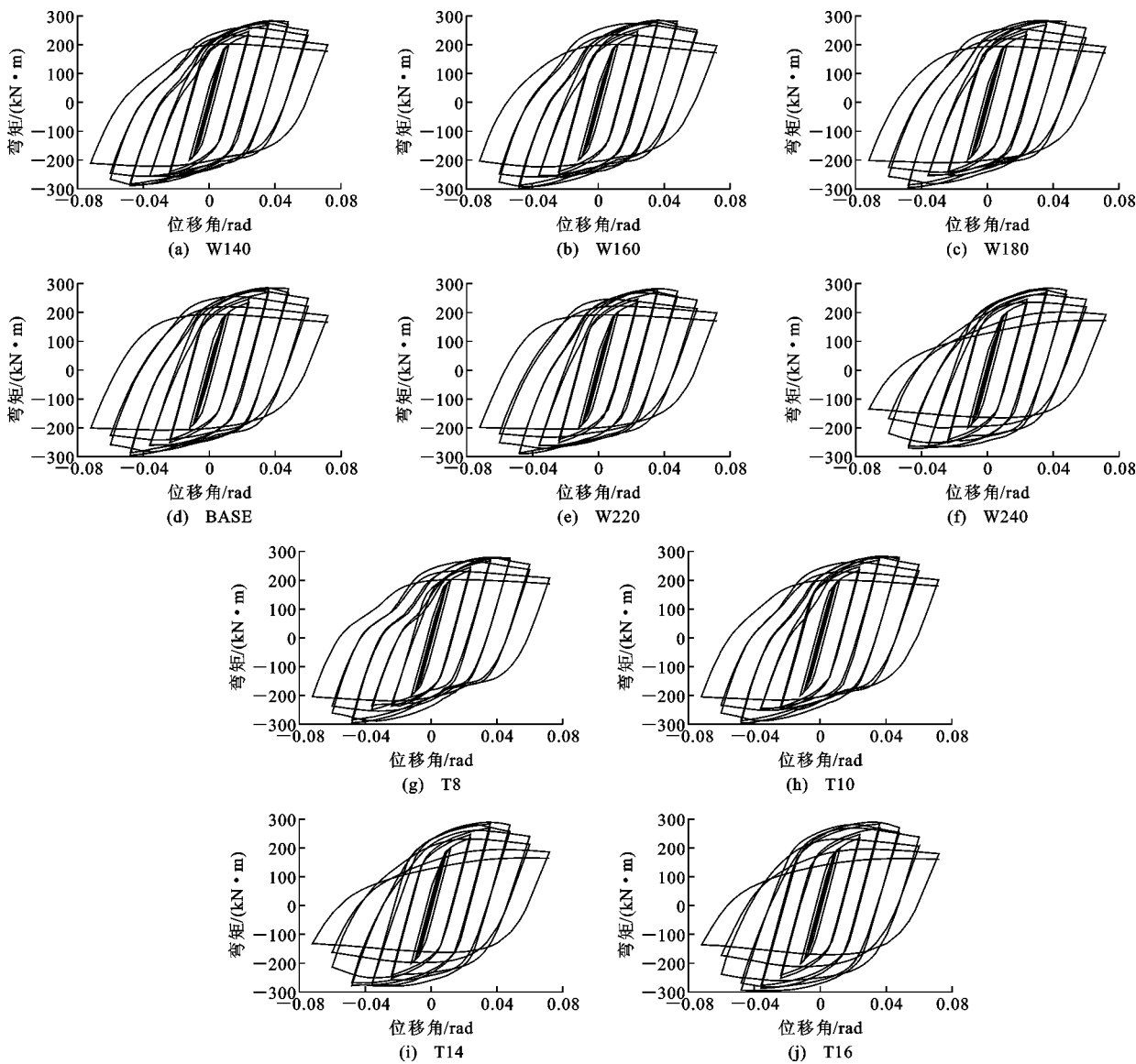


图 14 试件的滞回曲线

Fig. 14 Hysteresis Curves of Specimens

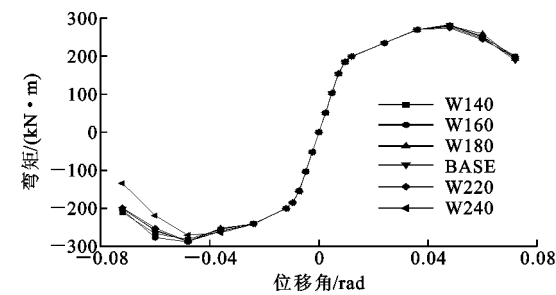


图 15 不同宽度试件的骨架曲线

Fig. 15 Skeleton Curves of Specimens with Different Widths

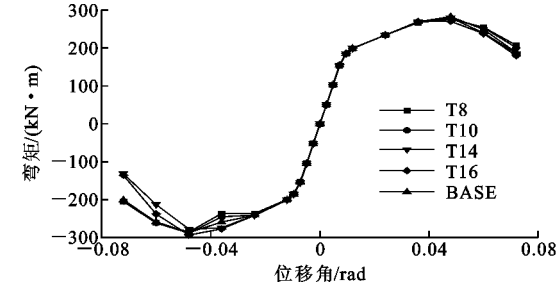


图 16 不同厚度的骨架曲线

Fig. 16 Skeleton Curves of Specimens with Different Thicknesses

4.5 等效黏滞阻尼系数

等效黏滞阻尼系数 ζ_{eq} 可以衡量结构的能量耗散能力^[26],应以弯矩-位移角曲线所包围的面积来衡量[式(4)],其定义见图 17,计算结果见表 5,6。

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABCD}}{S_{\triangle OBE} + S_{\triangle ODF}} \quad (4)$$

式中: S_{ABCD} 为滞回环围成的面积; $S_{\triangle OBE}$, $S_{\triangle ODF}$ 分别为 $\triangle OBE$, $\triangle ODF$ 的面积。

表 3 不同宽度试件的极限弯矩

Tab.3 Ultimate Bending Moment of Specimens with Different Widths

试件编号	W140	W160	W180	BASE	W220	W240
极限弯矩/(kN·m)	288.55	298.59	294.40	295.53	290.29	284.60
梁端位移角/rad	0.048	0.048	0.048	0.048	0.046	0.038

表 4 不同厚度试件的极限弯矩

Tab.4 Ultimate Bending Moment of Specimens with Different Thicknesses

试件编号	T8	T10	BASE	T14	T16
极限弯矩/(kN·m)	295.03	296.59	295.53	289.11	294.57
梁端位移角/rad	0.048	0.048	0.048	0.036	0.029

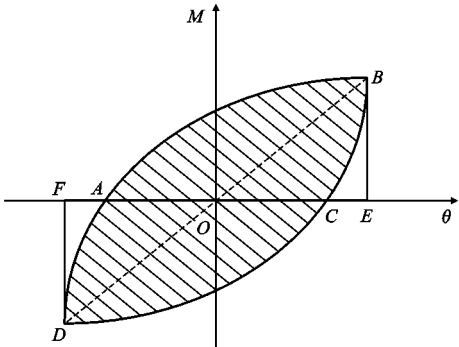


图 17 等效黏滞阻尼系数的定义

Fig.17 Definition of Equivalent Viscose Damping Coefficient

表 5 不同宽度试件的等效黏滞阻尼系数

Tab.5 Equivalent Viscose Damping Coefficients of Specimens with Different Widths

试件编号	等效黏滞阻尼系数				
	2Δ _y	3Δ _y	4Δ _y	5Δ _y	6Δ _y
W140	0.439 9	0.464 9	0.450 4	0.479 6	0.517 3
W160	0.441 2	0.469 5	0.454 9	0.507 2	0.531 9
W180	0.440 4	0.464 6	0.455 2	0.499 0	0.530 9
BASE	0.440 9	0.472 9	0.462 9	0.512 9	0.541 2
W220	0.440 8	0.472 8	0.467 1	0.512 8	0.530 9
W240	0.440 6	0.476 0	0.474 6	0.503 6	0.498 6

表 6 不同厚度试件的等效黏滞阻尼系数

Tab.6 Equivalent Viscose Damping Coefficients of Specimens with Different Thicknesses

试件编号	等效黏滞阻尼系数				
	2Δ _y	3Δ _y	4Δ _y	5Δ _y	6Δ _y
T8	0.438 3	0.434 8	0.432 8	0.490 3	0.511 9
T10	0.441 0	0.456 8	0.443 5	0.500 1	0.522 3
BASE	0.440 9	0.472 9	0.462 9	0.512 9	0.541 2
T14	0.442 2	0.478 0	0.484 4	0.516 9	0.503 0
T16	0.442 4	0.478 1	0.508 4	0.522 5	0.525 3

由表 5 可知,BASE 试件具有较好的等效黏滞

阻尼系数,在此基础上改变拼接板的宽度,试件的等效黏滞阻尼系数小于 BASE 试件,表明通过增加拼接板的宽度来增加截面面积对试件的耗能能力有一定程度的提高作用。

由表 6 可知,T8,T10 试件的等效黏滞阻尼系数均比 BASE 试件的大,说明通过增加翼缘拼接板的厚度来增加截面面积对试件的耗能能力有一定程度的提高作用。

4.6 拼接区耗能

不同拼接参数下“上焊下栓”节点拼接区的弯矩-位移角滞回曲线见图 18,拼接区位移角包括拼接区的板件变形和滑移变形。

由图 18 可知,由于节点拼接区上翼缘是焊缝连接,下翼缘是拼接板连接,其受力机理不同于传统节点,且拼接区的滞回曲线呈显著的非对称。在加载初期,节点拼接区的滞回曲线呈显著的对称性,这是由于在加载初期,节点经历了弹性和弹塑性发展阶段;继续加载,当梁下翼缘所受的压力或拉力大于接触面的摩擦力时,拼接区下翼缘开始出现滑移,而悬臂梁上翼缘靠近柱面处出现应力集中,但未出现塑性变形,正向和负向加载时拼接区下翼缘的变形及滑移量基本相同,故其滞回曲线呈明显的对称性。在加载后期,拼接区的滞回曲线呈显著的非对称性,且负向位移角远大于正向位移角,这是由于当加载位移为负向,梁下翼缘受压且压力远大于摩擦力时,试件主要以拼接处螺栓产生滑移、螺栓杆与孔壁的挤压以及梁拼接处板件变形实现耗能,且拼接区板件的变形及滑移量较大,而悬臂梁上翼缘以受拉为主,且靠近柱面处产生应力集中。

当卸载并沿正向加载时,悬臂梁上翼缘在应力集中处产生塑性变形,同时腹板也出现鼓起,由于梁上翼缘和腹板的塑性变形导致梁下翼缘所受的拉力比负向加载时梁下翼缘所受的压力小,使梁拼接处下翼缘板件的变形和滑移变小,故节点拼接区滞回曲线的正向位移角变小;试件主要以悬臂梁上的塑性变形耗能为主,而梁拼接处下翼缘的滑移及板件变形产生较小耗能,因此导致滞回曲线呈现显著的非对称性。当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 2/3 倍~4/3 倍时,随着翼缘拼接板截面面积的增加,节点的负向位移角逐渐减小,这是由于拼接区的板件变形和滑移随翼缘拼接板截面面积的增加而减小,说明节点能有效利用拼接区的滑移和板件变形实现耗能。

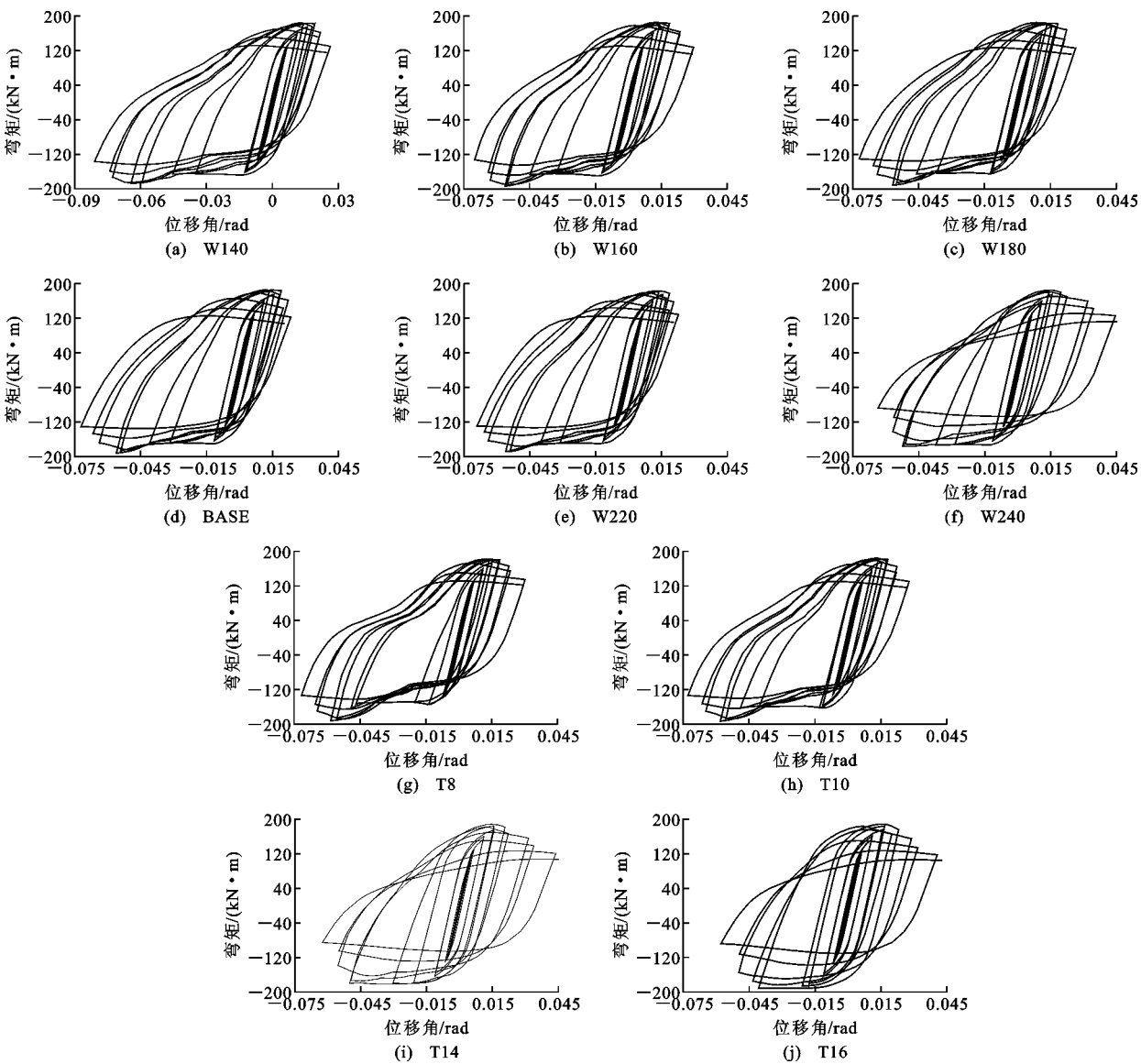


图 18 拼接区的滞回曲线

Fig. 18 Hysteresis Curves of Splices

不同拼接参数下“上焊下栓”节点的耗能和拼接区耗能见表 7、8。总耗能是指整个加载过程中梁端滞回曲线包围的面积之和,拼接区的耗能是指整个加载过程中拼接区的滞回曲线包围的面积之和,拼接区耗能占比是指拼接区的耗能除以总耗能。由表 7、8 可知,拼接区耗能随翼缘拼接板截面面积的减小而增大,且拼接区的耗能占总耗能的 39.20%~44.44%。

表 7 不同宽度试件的耗能

试件	W140	W160	W180	BASE	W220	W240
拼接区耗能/(kN·m)	83.31	80.73	79.51	79.18	77.87	77.82
总耗能/(kN·m)	187.47	192.88	191.38	192.15	190.36	176.45
拼接区耗能占比/%	44.44	41.86	41.55	41.21	40.91	44.10

表 8 不同厚度试件的耗能

Tab. 8 Energy Dissipation of Specimens with Different Thicknesses

试件	T8	T10	BASE	T14	T16
拼接区耗能/(kN·m)	78.16	79.15	79.18	75.60	72.27
总耗能/(kN·m)	185.81	188.30	192.15	177.74	184.38
拼接区耗能占比/%	42.06	42.03	41.21	42.53	39.20

4.7 翼缘拼接板螺栓孔的变形

以 BASE 试件为例进行翼缘拼接板螺栓孔变形分析,图 19 为第 1 次加载位移下翼缘拼接板的应力云图,表 9 为翼缘拼接板螺栓孔 K1 的孔径变化。

由图 19 和表 9 可知:在加载位移到达 -36 mm 之前,拼接板的螺栓孔应力分布以高强螺栓的压应力为主,螺栓孔径基本无变化;加载位移达到 -36

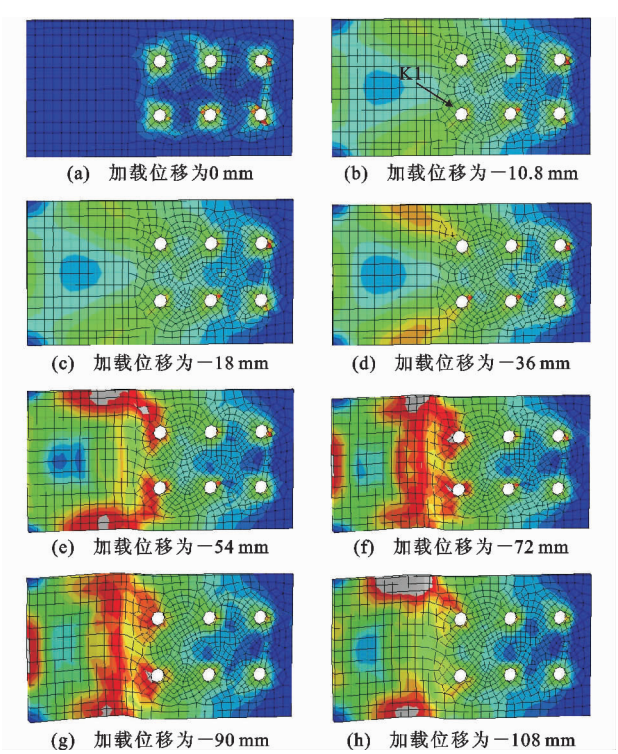


图 19 翼缘拼接板的应力云图

Fig. 19 Stress Nephogram of Flange Splice Plate

表 9 翼缘拼接板螺栓孔径变化

Tab. 9 Variation of Bolt Hole Diameter of Flange Splice Plate

位移/ mm	0.0	-10.8	-18.0	-36.0	-54.0	-72.0	-90.0	-108.0
孔径/ mm	21.51	21.49	21.48	21.48	21.69	22.45	23.71	24.03
孔径增 大率/%	0.05	-0.05	-0.09	-0.09	0.88	4.42	10.28	11.77

mm 时,由于梁下翼缘所受的压力大于摩擦力,梁拼接区下翼缘开始出现滑移,随着加载位移的增加,梁拼接区下翼缘的滑移量随之增大,且螺栓杆与孔壁发生挤压,导致翼缘拼接板开始出现变形,拼接板的变形在一定程度上增加了节点的耗能能力;继续加载时,翼缘拼接板的螺栓孔径也在逐渐增加,螺栓孔径增大将更加有利于摩擦耗能的形成。当加载位移为-90 mm 时,继续加载,螺栓孔 K1 的孔径增大不明显,这是由于悬臂梁未拼接区下翼缘出现塑性变形,导致梁拼接区下翼缘的板件变形和滑移增加较小。综合以上分析,节点能利用拼接板螺栓的滑移和板件变形实现耗能。

5 对比分析

梁柱“上焊下栓”节点是由“互”字形节点改进形

成的一种节点,因此,“上焊下栓”节点是介于“互”字形节点和传统栓焊混合节点之间的 1 种新型节点。以梁柱“上焊下栓”节点的 BASE 试件为例,同时对按相同参数设计的“互”字形节点和传统栓焊混合节点进行有限元分析,对比分析 3 种节点的破坏模式、滞回性能以及骨架曲线。

5.1 破坏模式对比分析

图 20 为 3 种节点的应力云图。由图 20 可知:“互”字形节点悬臂梁上下翼缘的塑性变形较小,且腹板的鼓曲变形较小;梁柱“上焊下栓”节点悬臂梁上翼缘出现较大的塑性变形,下翼缘有一定程度的塑性变形,腹板的鼓曲变形较大;传统栓焊混合节点悬臂梁的塑性变形和应力变化均比其余 2 种节点的大。通过对比分析可以发现,梁柱“上焊下栓”节点悬臂梁的塑性变形比传统栓焊混合节点小,但比“互”字形节点大,说明与传统栓焊混合节点相比,梁柱“上焊下栓”节点的变形能力明显提高。

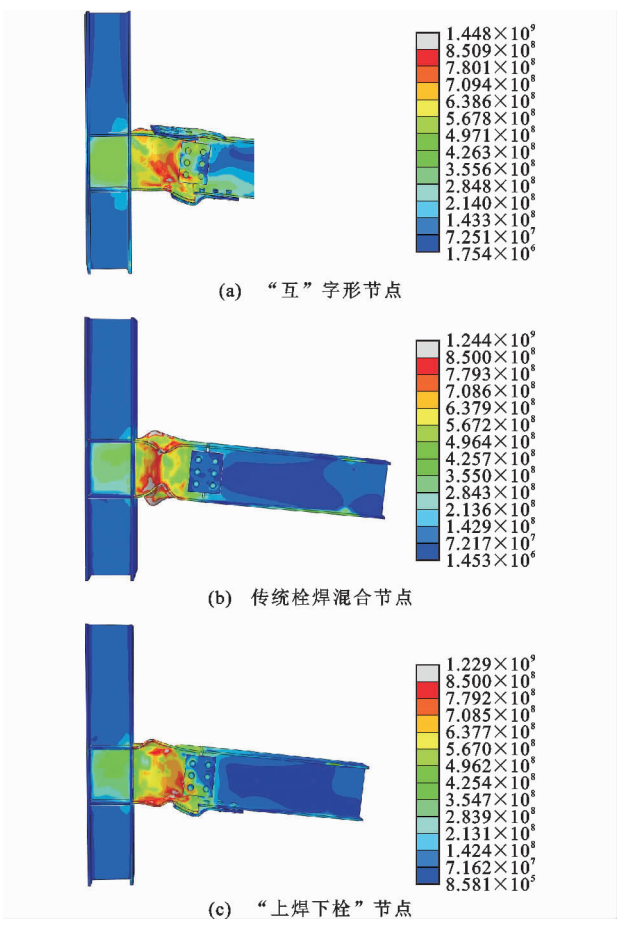


图 20 节点的应力云图(单位:Pa)

Fig. 20 Stress Nephogram of Connections (Unit:Pa)

5.2 滞回性能对比分析

图 21 为梁柱“上焊下栓”节点的 BASE 试件与“互”字形节点和传统栓焊混合节点的滞回曲线对

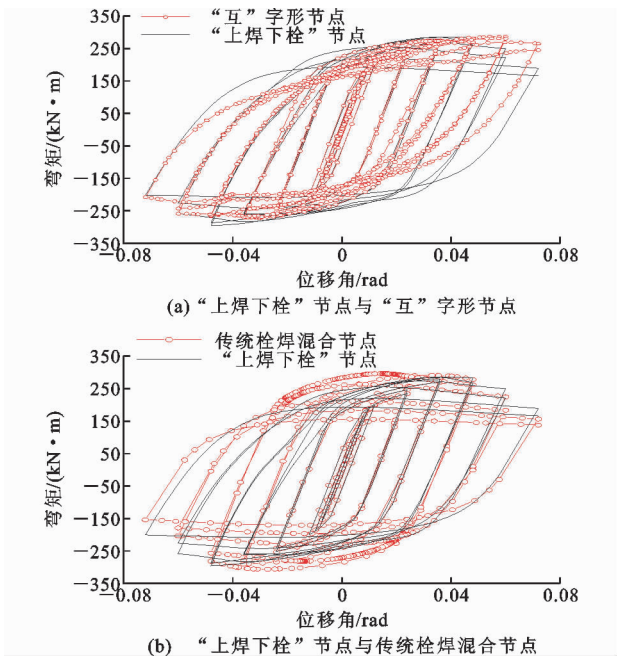


图 21 滞回曲线对比

Fig. 21 Comparison of Hysteresis Curves

比。由图 21 可知：与“互”字形节点的滞回曲线相比，“上焊下栓”节点的滞回曲线在位移角为 0.072 rad 时其承载力比其极限承载力下降约 33.3%；“互”字形节点的承载力比极限承载力下降约 7.3%，这是由于“上焊下栓”节点的悬臂梁上翼缘采用焊接连接，其上翼缘较早出现屈曲，而“互”字形节点的上翼缘一侧采用高强螺栓连接，在低周往复荷载作用下其上翼缘能够利用板件之间的滑移和变形以及螺栓杆与孔壁的挤压实现耗能所致，说明“互”字形节点的滞回性能优于“上焊下栓”节点。与传统栓焊混合节点相比，传统栓焊混合节点的滞回曲线比“上焊下栓”节点先达到极限荷载，且在“上焊下栓”节点达到极限荷载前，2 个节点的滞回曲线变化不大，在到达极限荷载之后，“上焊下栓”节点的滞回曲线比传统栓焊混合节点更饱满，说明“上焊下栓”节点的滞回性能优于传统栓焊混合节点。

5.3 骨架曲线对比分析

图 22 为 3 种节点的骨架曲线。从图 22 可以看出，3 种节点的骨架曲线均呈 S 形，在钢梁达到屈服之前，骨架曲线基本重合且呈线性变化，钢梁屈服之后，骨架曲线产生分离。从骨架曲线可知，“上焊下栓”节点、“互”字形节点和传统栓焊混合节点的位移角分别达到 0.048, 0.06, 0.048 rad 之后承载力开始出现下降，且达到极限承载力后“上焊下栓”节点的承载力下降趋势比“互”字形节点快，但比传统栓焊混合节点慢，说明“上焊下栓”节点的延性略低于

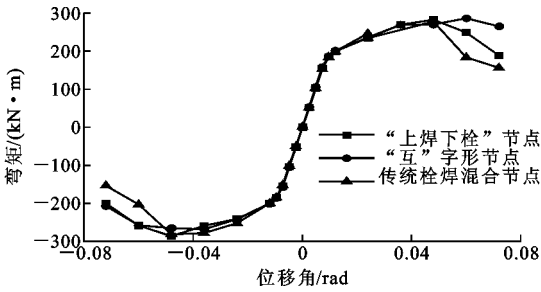


图 22 骨架曲线对比

Fig. 22 Comparison of Skeleton Curves

“互”字形节点，但略高于传统栓焊混合节点。

6 结 语

(1)在低周往复荷载作用下，梁柱“上焊下栓”节点 2 组试件的破坏模式相似，梁下翼缘与拼接板先出现滑移，接着塑性铰出现在悬臂梁上；随着梁端位移角的增大，塑性铰区域与拼接板的滑移量随之扩大。在整个加载过程中，梁拼接区的板件变形和滑移耗能占总耗能的 39%~45%。

(2)当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 2/3 倍~1.0 倍时，梁柱“上焊下栓”节点的梁拼接区下翼缘比悬臂梁上翼缘先出现屈曲，且梁拼接区的板件变形和滑移能得到充分发展；当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 1.0 倍~4/3 倍时，梁柱“上焊下栓”节点的悬臂梁上翼缘比梁拼接区下翼缘先出现屈曲，且拼接区的板件变形和滑移未能得到充分发展。

(3)当翼缘拼接板为翼缘截面面积的 2/3 倍~4/3 倍时，随着拼接板截面面积的增大，梁柱“上焊下栓”节点拼接区的耗能减小，且节点的延性有一定程度减小，因此适当减小翼缘拼接板的截面面积可以有效地提高节点的变形能力及延性。

(4)梁柱“上焊下栓”节点 BASE 试件的延性、耗能性能以及变形能力低于按相同参数设计的“互”字形节点，但略高于传统栓焊混合节点。

参考文献：

References:

[1] 郝际平,孙晓岭,薛 强,等.绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J].工程力学,2017,34(1):1-13.
HAO Ji-ping, SUN Xiao-ling, XUE Qiang, et al. Research and Applications of Prefabricated Steel Structure Building Systems [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 1-13.
[2] 郭志鹏,张爱林,刘学春,等.装配式钢框架节点带 Z 字形悬臂梁段和削弱梁段连接的抗震性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(6):43-52.

- GUO Zhi-peng, ZHANG Ai-lin, LIU Xue-chun, et al. Seismic Behavior of Prefabricated Steel Frame Connection with Z-shaped Cantilever Beam and Reduced Beam Section [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 43-52.
- [3] 于长亮, 郑宏, 袁晓洒, 等. 带侧板钢节点力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(4): 74-82.
- YU Chang-liang, ZHENG Hong, YUAN Xiao-sa, et al. Mechanical Behavior of Moment Resisting Connection with Side Plate Under Cyclic Loading [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4): 74-82.
- [4] LEE K, LI R, CHEN L Y, et al. Cyclic Testing of Steel Column-tree Moment Connections with Various Beam Splice Lengths [J]. Steel & Composite Structures, 2014, 16(2): 221-231.
- [5] WONG M F, CHUNG K F. Structural Behaviour of Bolted Moment Connections in Cold-formed Steel Beam-column Sub-frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(2): 253-274.
- [6] SWATI A K, GAURANG V. Study of Steel Moment Connection with and Without Reduced Beam Section [J]. Case Studies in Structural Engineering, 2014, 1: 26-31.
- [7] ABDOLLAHZADEH G, SHABANIAN S M. Experimental and Numerical Analysis of Beam to Column Joints in Steel Structures [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12(4): 642-661.
- [8] 张爱林, 张振宇, 姜子钦, 等. 可修复的装配式钢框架梁柱节点非线性静力分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 1-8.
- ZHANG Ai-lin, ZHANG Zhen-yu, JIANG Zi-qin, et al. Nonlinear Static Analysis of Repairable Prefabricated Steel Frame Beam-column Joint [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(4): 1-8.
- [9] 贾连光, 李红超, 吴一红. 低周反复荷载下蜂窝式钢框架梁柱节点性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 61-68.
- JIA Lian-guang, LI Hong-chao, WU Yi-hong. Experimental Study of the Behavior of Beam-column Connections of Cellular Steel Frames Under Low-cyclic Reversed Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 61-68.
- [10] 卢林枫, 钟丽丽, 胡本峰, 等. 箱形节点域外伸端板弱轴连接的滞回性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 48-56.
- LU Lin-feng, ZHONG Li-li, HU Ben-feng, et al. Research on Hysteretic Performance for Box Node Domain Extended End-plate Weak-axis Connection [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(4): 48-56.
- [11] 李启才, 苏明周, 顾强, 等. 带悬臂梁段拼接的梁柱连接循环荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 54-59.
- LI Qi-cai, SU Ming-zhou, GU Qiang, et al. Experimental Study of Steel Beam-to-column Connection with Cantilever Beam Splicing Under Cyclic Loading [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 54-59.
- [12] KARAGIANNIS V, MALAGA-CHUQUITAYPE C, ELGHAZOULI A Y. Behaviour of Hybrid Timber Beam-to-tubular Steel Column Moment Connections [J]. Engineering Structures, 2017, 131: 243-263.
- [13] 焦燊烽, 何敏娟, 马人乐. 新型带悬臂梁段栓-焊拼接节点力学性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2015, 17(4): 10-18.
- JIAO Yu-feng, HE Min-juan, MA Ren-le. Study on a New Cantilever Beam Joint with Bolted-welded Spliced Connections [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(4): 10-18.
- [14] 卢林枫, 林建军, 胡本峰. H形梁翼缘双肋板加强式弱轴连接的抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 47-55.
- LU Lin-feng, LIN Jian-jun, HU Ben-feng. Analysis on Seismic Behavior of H-type Beam Flange Double Rib Reinforced Weak Axis Connection [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 47-55.
- [15] OH K, LI R, CHEN L Y, et al. Cyclic Testing of Steel Column-tree Moment Connections with Weakened Beam Splices [J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(3): 471-478.
- [16] OH K, LEE K, CHEN L Y, et al. Seismic Performance Evaluation of Weak Axis Column-tree Moment Connections with Reduced Beam Section [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 105: 28-38.
- [17] 聂少锋, 朱纪钊, 马轶, 等. 蜂窝梁-实腹柱十字形节点受力性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(4): 63-71.
- NIE Shao-feng, ZHU Ji-zhao, MA Yi, et al. Study on Mechanical Behavior of Castellated Beam-solid Column Cruciform Joints [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(4): 63-71.
- [18] LIU X C, CUI X X, YANG Z W, et al. Analysis of the Seismic Performance of Site-bolted Beam to Column Connections in Modularized Prefabricated Steel Structures [J]. Advances in Materials Science and Engineer-

- ing, 2017, 2017; 1932730.
- [19] OH K, SO J, HA H, et al. Seismic Performance Evaluation of Korean Column-tree Steel Moment Connections[J]. International Journal of Steel Structures, 2016, 16(4): 1287-1298.
- [20] 卢林枫, 艾 龙, 郝振奋, 等. 方管束腹板削弱型弱轴连接的抗震性能影响因素分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 64-76.
- LU Lin-feng, AI Long, HAO Zhen-fen, et al. Analysis of Influence Factors on Hysteretic Behavior of Weak-axis Square Tubular Web RBS Connection[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 64-76.
- [21] 潘伶俐, 陈以一. 考虑竖向加劲肋作用的 H 形梁柱节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(12): 1-9.
- PAN Ling-li, CHEN Yi-yi. Experimental Study on H-shaped Beam-to-column Connections with Vertical Stiffener[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12): 1-9.
- [22] DIAZ C, VICTORIA M, QUERIN O M, et al. FE Model of Three-dimensional Steel Beam-to-column Bolted Extended End-plate Joint[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(3): 843-867.
- [23] MOU B, LI X, BAI Y T, et al. Numerical Evaluation on Shear Behavior of Irregular Steel Beam-to-CFST Column Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 422-435.
- [24] 郁有升, 张颜颜, 李建峰, 等. 一种新型梁柱装配式刚性节点滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(2): 1-5, 12.
- YU You-sheng, ZHANG Yan-yan, LI Jian-feng, et al. Study on Hysteretic Behavior of a New Prefabricated Beam-to-column Rigid Connection[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(2): 1-5, 12.
- [25] 张孝栋. 钢结构“互”型装配式刚性节点的试验及有限元研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- ZHANG Xiao-dong. Experiment and Finite Element Study of Steel Structure “HU” Assembly Rigid Connection[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.
- [26] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [27] FEMA-350, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-frame Buildings[S].
- [28] 张爱林, 郭志鹏, 刘学春, 等. 悬臂梁段不同拼接方式下延性节点静力性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(5): 770-779.
- ZHANG Ai-lin, GUO Zhi-peng, LIU Xue-chun, et al. Analysis on Static Behavior of the Ductile Connections with Different Cantilever Beam Splices[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(5): 770-779.