

梁柱“上焊下栓”节点耗能机理有限元分析

郁有升^{1,2},袁鹏程¹,刘鑫宇¹,王 胜³

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 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. 青建集团股份有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要 目的 分析不同参数对节点的耗能机理的影响,为梁柱“上焊下栓”节点的设计提供参考. 方法 通过改变翼缘螺栓数和接触面的摩擦系数,设计两组试件,利用有限元软件 ABAQUS 对其进行有限元分析,分析该节点破坏模式和耗能能力. 结果 当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 $2/3 \sim 1.0$ 倍时,节点具有较好延性. 在低周往复荷载作用下,节点的受力过程先后经历了弹性阶段、屈服阶段、滑移阶段、承载力强化阶段、弹塑性阶段以及塑性发展阶段. 当接触面的摩擦系数取 $0.1 \sim 0.45$ 时,拼接区的耗能占总耗能的 $41\% \sim 48\%$; 由等强设计法设计的基本试件具有较好的耗能能力,在此基础上,改变翼缘螺栓数均会降低节点能量耗散能力; 当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 $2/3 \sim 4/3$ 倍时,梁拼接区耗能占总耗能的 $41\% \sim 44\%$. 结论 梁柱“上焊下栓”节点能有效利用拼接区螺栓的滑移、螺栓杆与孔壁的挤压以及板件的变形来实现耗能.

关键词 梁柱节点; 低周往复荷载; 耗能机理; 有限元分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis on Energy Dissipation Mechanism of Beam-Column Connection with Flange Bolted-Welded

YU Yousheng^{1,2}, YUAN Pengcheng¹, LIU Xinyu¹, WANG Sheng³

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

Abstract: The influence of different parameters on the energy dissipation mechanism of the connection is analyzed, and the results can provide a reference for the design of the connection. Two groups of tests are designed by changing the number of flange bolts and the friction coefficient. The performance of the new connection is simulated with the ABAQUS software. The failure modes and energy dissipation capacity of the connection were studied. The results show that: when

收稿日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678316); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE068)

作者简介: 郁有升(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢结构设计理论与工程应用方面研究.

the number of flange bolts is $2/3 \sim 1.0$ times more than that of the equal strength design, the connection has better ductility. Under low cycle reversed loading, loading process of the connection gradually changes from elastic stage, the yield stage, the slip stage, the strengthening stage of bearing capacity, the elastic-plastic stage to the plastic stage. When the friction coefficient is from 0.1 to 0.45, the energy dissipation of the beam splice accounts for 41%~48% of the total energy dissipation. The connection designed by the equal strength design has better energy dissipation capacity, and changing the number of flange bolts will reduce the energy dissipation capacity of the connection. When the number of flange bolts is $2/3 \sim 4/3$ times more than that of the equal strength design, the energy dissipation of the beam splice accounts for 41%~44% of the total energy dissipation. The connection can utilize the slipping of bolts, the squeezing between the bearing of bolts and the hole-surfaces, and the deformation of plates to dissipate energy effectively.

Key words: beam-column connection; low cycle reversed loading; energy dissipation mechanism; finite element analysis

在框架结构中,梁柱节点传递梁与柱之间的结构内力,是结构的重要组成部分.因此,对梁柱节点抗震性能的研究是十分必要的.国内外学者对其抗震性能进行了大量的研究工作^[1-6],结果表明装配式钢结构梁柱节点具有良好的抗震性能.张爱林等^[7-8]对带Z字形悬臂梁段拼接的梁柱节点抗震性能进行了试验和有限元研究,认为Z字形装配式梁柱节点在地震作用下其高强螺栓可以产生滑移,从而实现滑移耗能.X. Liu等^[9]对一种装配式钢结构的梁柱节点进行了试验研究,研究结果表明在小震作用下,该梁柱节点的螺栓不会产生滑移,在中震作用下,通过连接区域的滑移以及在强震作用下通过梁端的塑性变形来耗散能量.K. OH等^[10-11]对带悬臂梁段的梁在工字型柱的强轴和弱轴下进行了试验研究,同时还研究了梁端部加强、悬臂梁削弱对其抗震性能的影响,结果显示,梁根部加强和悬臂梁削弱的梁柱节点均有良好的耗能性能.文献[12-16]对钢结构梁柱节点进行了大量的试验和有限元分析,研究结果可为规范的改进提供必要的的数据,同时也为钢结构梁柱节点的工程应用提供参考.张孝栋^[17]分析了一种新型的装配式梁柱节点,该节点的悬臂梁与框架梁通过上、下翼缘交互布置拼接板螺栓连接,同时对其进行了有限元分析,研究表明此节点变形性能较好,且具

有良好的承载力和耗能性能.

文献[17]中的新型节点交互布置拼接板方便了施工时的安装定位,加快了施工速度,但该节点梁上翼缘表面存在凸起的拼接板和螺栓,给楼板铺设造成不便.基于此,笔者研究了一种新型的梁柱“上焊下栓”节点,上翼缘采用对接焊缝连接,下翼缘一侧采用三面围焊连接,其焊缝为角焊缝,另一侧采用螺栓连接,该节点的梁上翼缘表面平整,使楼板铺设方便.通过有限元分析,得到在不同接触面摩擦系数和翼缘螺栓数下该节点的破坏模式和耗能能力等性能,研究结果可为该节点的设计和工程应用提供参考.

1 试件设计

1.1 模型的几何参数

悬臂梁和框架梁均采用H型钢HN300 mm × 160 mm × 8 mm × 10 mm,柱采用H型钢HW250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm;螺栓采用10.9级M20摩擦型高强度螺栓,螺栓孔径为21.5 mm;试件的设计采用等强度设计方法,计算出其下翼缘拼接板一侧和腹板拼接板的螺栓数均为6个螺栓,腹板拼接板的尺寸为220 mm × 170 mm × 8 mm,翼缘拼接板的尺寸为400 mm × 200 mm × 12 mm.钢材均选用Q345B,钢材、焊缝及高强度螺栓的应力-应变关系均采用

二折线模型,材料性能见表1.节点的三维图见图1,节点详图见图2.

表1 材料性能指标

Table 1 Materials performance indices

材料名称	弹性模量 $E/10^5 \text{MPa}$	泊松比 ν	屈服强度 $\sigma_y/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	极限强度 $\sigma_\mu/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	屈服应变 $\varepsilon_y/10^{-2}$	极限应变 $\varepsilon_\mu/10^{-2}$
钢材	2.06	0.3	360	554	0.175	25
高强螺栓	2.06	0.3	980	1 100	0.480	1.36
焊缝材料	2.06	0.3	410	490	0.199	12

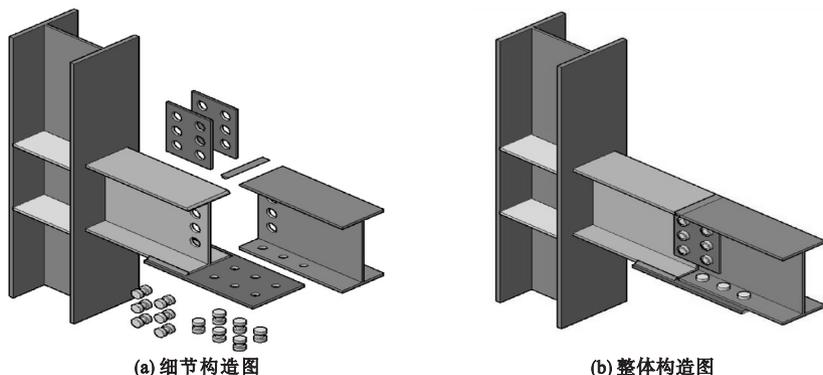


图1 梁柱“上焊下栓”节点

Fig. 1 Beam-column connection with flange bolted-welded

表2 试件主要参数

Table 2 Main parameters of specimens

试件编号	长/mm	宽/mm	厚/mm	螺栓数	摩擦系数
BASE	420	200	12	6	0.45
EPS1	420	200	12	6	0.1
EPS2	420	200	12	6	0.2
EPS3	420	200	12	6	0.3
EPS4	420	200	12	6	0.4
BPS1	260	200	12	2	0.45
BPS2	340	200	12	4	0.45
BPS3	500	200	12	8	0.45

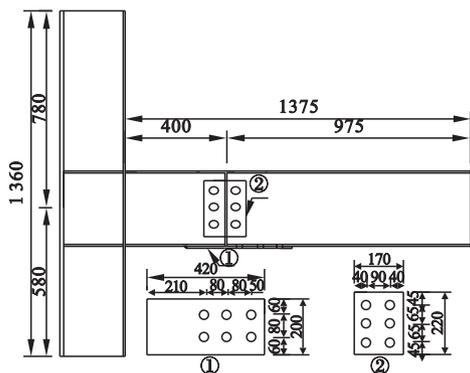


图2 梁柱“上焊下栓”节点详图

Fig. 2 Detail of beam-column connection with flange bolted-welded

1.2 影响参数

采用等强设计方法设计的 BASE 试件翼缘拼接板的螺栓数为 6 个,在此设计的基础上,分析改变翼缘拼接板的螺栓数对“上焊下栓”节点的耗能机理的影响,同时也分析了减小接触面的摩擦系数对“上焊下栓”节点的受力性能的影响.不同接触面摩擦系数和翼缘拼接板螺栓数的参数变化见表 2.在实际工程中,接触面摩擦系数的测定可根据文献[18]来确定.

2 有限元模型

2.1 建立模型

梁柱“上焊下栓”节点的建模采用有限元分析软件 ABAQUS.柱、梁、拼接板、螺栓及焊缝均采用八节点六面体线性非协调模式单元(即三维实体单元 C3D8I).加劲肋与柱的连接、柱和悬臂梁连接以及梁拼接处钢板与焊缝的连接均采用“TIE”;拼接板与梁下翼缘、拼接板与腹板以及螺栓帽、螺母与板件之间的接触定义摩擦,在有限元中其切向接触

关系定义为“罚”;螺栓杆与螺栓孔壁之间的接触定义无摩擦,在有限元中其切向接触关系定义为“无摩擦”,所有的法向接触关系均定义为“硬接触”.模型的边界条件:柱顶和柱底采用铰接连接;在框架梁外截面的几何中心点上建立一个耦合点,将框架梁外截面耦合到耦合点上,并在耦合点上施加位移荷载.

2.2 加载制度

试件的加载采用位移控制加载,首先通过 ABAQUS 的 Bolt Load 施加螺栓的预拉力 155 kN,柱顶施加轴力 300 kN,然后在梁端施加位移.对 BASE 试件进行单调加载分析,试件的屈服位移由 BASE 试件在单调加载作用下的荷载 - 位移曲线确定,在有限元中试件的屈服位移取 $\Delta_y = 18 \text{ mm}$. 单调加载的加载方式:取 350 mm 为其加载位移,方向向下.低周往复荷载的加载方式:屈服前,每级荷载循环 1 次,其中第一级加载位移 Δ 取 20% 的屈服位移,即 $\Delta = 3.6 \text{ mm}$,以后每级荷载增量为 Δ ;屈服后,每级荷载循环 2 次,每级荷载增量为 Δ_y ,直至加载位移达到 108 mm. 加载方向的定义:向上为正,向下为负.

2.3 有限元结果计算

梁柱“上焊下栓”节点的梁端以及梁拼接区的弯矩 - 位移角计算简图见图 3 和图 4. 其中图 3 为梁段弯矩示意图,图 4 为梁端以及梁拼接区的位移角示意图.

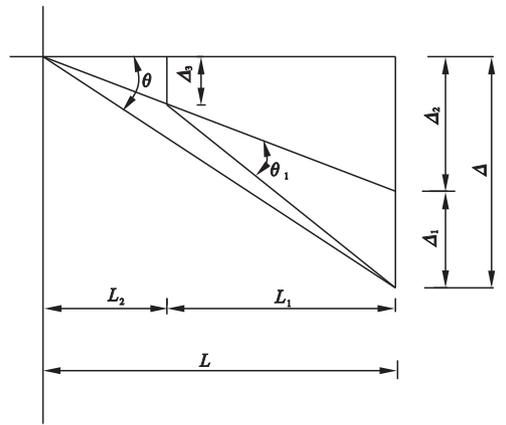


图 4 位移角示意图

Fig. 4 Interstory drift angle diagram

梁柱节点弯矩 - 位移角和拼接区的弯矩 - 位移角的公式计算如下:

$$M = F \cdot L, \theta = \Delta / L, \tag{1}$$

$$\Delta_2 = (\Delta_3 \cdot L) / L_2, \Delta_1 = \Delta - \Delta_2, \tag{2}$$

$$M_1 = F \cdot L_1, \theta_1 = \Delta_1 / L_1. \tag{3}$$

式中: M 为柱节点域中心的弯矩; θ 为梁端位移角; F 为梁端加载点的荷载, L 为梁端加载点至柱节点域中心的距离; Δ 为梁端加载位移; Δ_3 为悬臂梁端竖向位移; L_2 为悬臂梁端至柱节点域中心的距离; Δ_1 为框架梁相对于悬臂梁的位移角引起的梁端加载点的位移; Δ_2 为悬臂梁端竖向位移引起的梁端加载点的位移, M_1 为梁拼接区的弯矩; L_1 为梁端加载点至悬臂梁外截面的距离; θ_1 为梁拼接区的位移角.

2.4 有限元的验证

为了验证有限元模型的准确性,对文献 [19] 中的试件 WFS - 1 采用与文中相同的建模方法建立三维非线性有限元模型,并对其进行低周往复加载有限元分析,计算结果见图 5. 其中,图 5(a)、(b) 为试验与有限元破坏模式对比图,图 5(c)、(d) 为试验与有限元的荷载 - 位移曲线对比图. 由图 5(a)、(b) 可知,试验的破坏模式与有限元的变形模式较为一致,其翼缘和腹板产生过大的局部变形和凸曲现象. 由图 5(c)、(d) 可知,有限元的荷载 - 位移曲线比较饱满,这是由于

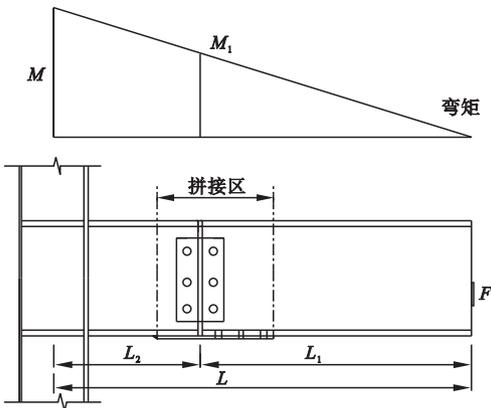


图 3 梁段弯矩示意图

Fig. 3 Bending moment diagram of beam segment

有限元模型未考虑实际构件的初始缺陷和钢材损伤,但总体来说有限元的荷载-位移曲线

线与试验的曲线较为吻合.验证了有限元模拟的有效性.

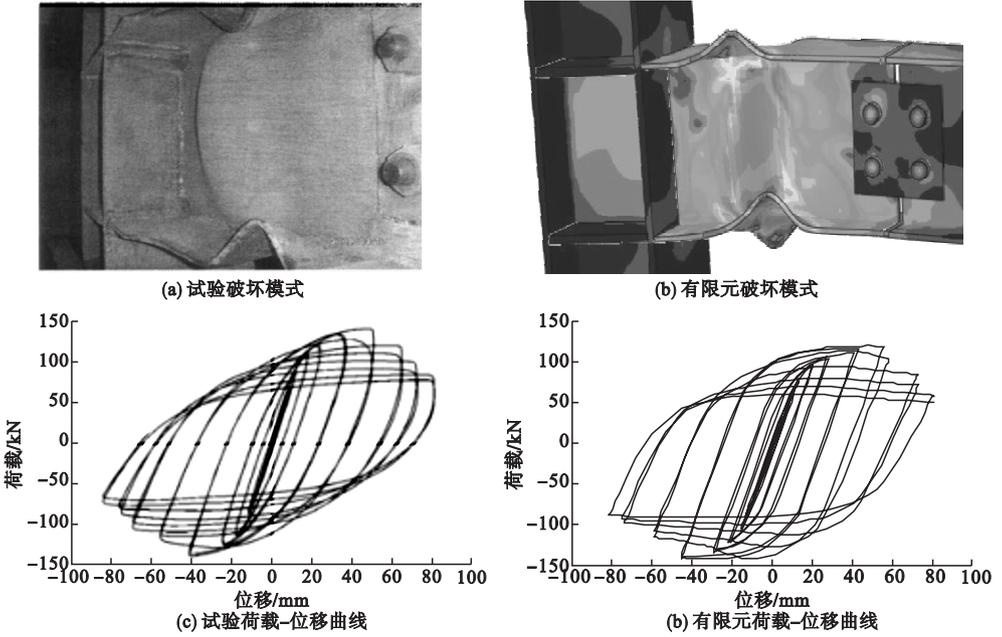


图5 试验和有限元计算结果对比

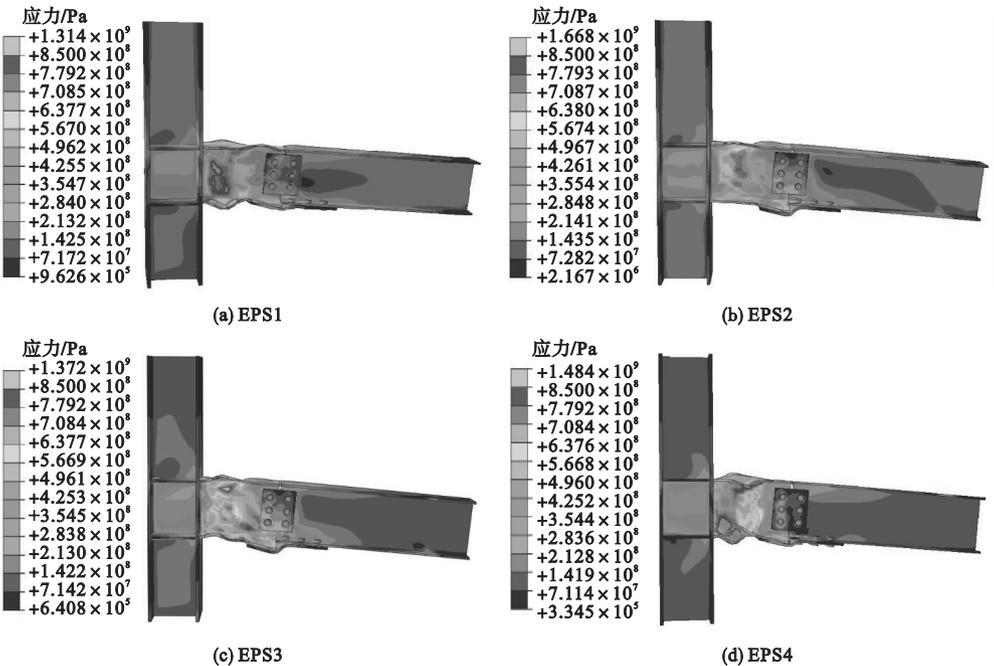
Fig. 5 Comparison of results between experiment and FEM analysis

3 低周往复荷载分析

3.1 破坏模式

在低周往复荷载作用下,不同拼接参数

下“上焊下栓”节点的应力云图见图6.其中,图6(f)试件的加载位移为90 mm,其余试件的应力云图加载位移为-108 mm.



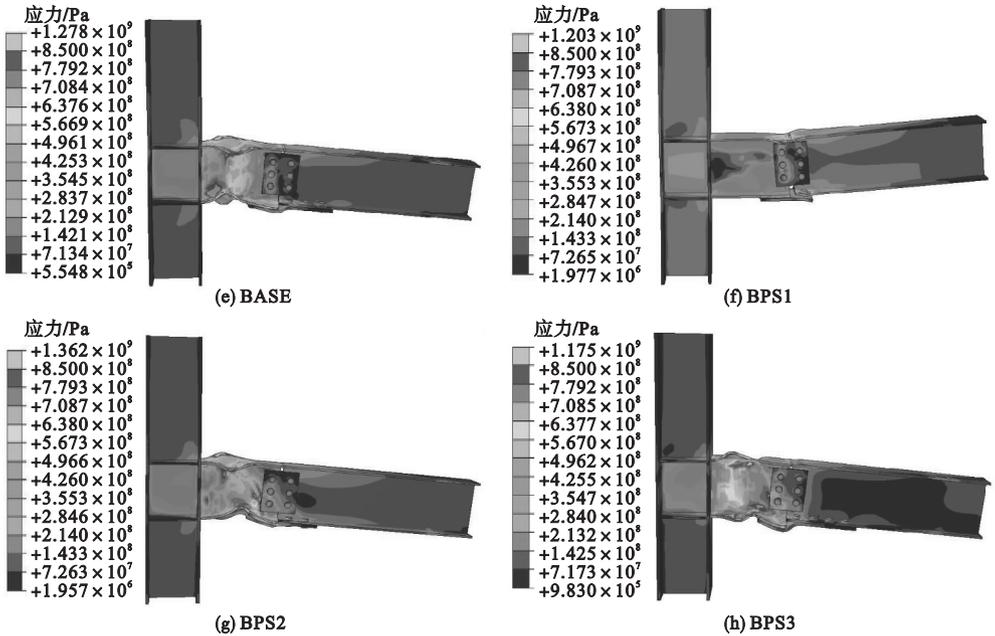


图6 “上焊下栓”节点应力云图

Fig. 6 Stress contour plot of beam-column connection with flange bolted-welded

在低周往复荷载作用下,试件在整个加载过程中首先处于弹性阶段,试件发生很小的整体弹性弯曲变形,同时翼缘拼接板也有很小的弹性弯曲,但拼接区的板件之间未出现相对滑移,继续加载,钢材进入屈服阶段。当下翼缘所受的压力大于摩擦力时,试件进入滑移阶段,梁拼接区下翼缘的螺栓发生滑移;随着梁拼接区板件之间的滑移增大,螺栓杆与孔壁发生挤压,接着进入承载力强化阶段。除 BPS1 试件之外,而后其余试件进入弹塑性阶段,悬臂梁上翼缘靠近柱面处、拼接区下翼缘孔壁处、拼接区下翼缘的钢材以及悬臂梁下翼缘靠近拼接区域的钢材先后进入塑性。继续加载,试件的钢材进入塑性发展阶段,悬臂梁上翼缘靠近柱面处、下翼缘靠近拼接区域和拼接区下翼缘钢材的塑性变形不断发展。综上分析,在整个加载过程中,节点的受力过程先后经历了弹性阶段,屈服阶段,滑移阶段,承载力强化阶段,弹塑性阶段以及塑性发展阶段。

由图 6(a) ~ (e) 可知,悬臂梁上翼缘和腹板的塑性变形随着接触面摩擦系数的减小

而减小,这是由于梁拼接处螺栓的滑移随着接触面摩擦系数的减小而增大,且试件的延性和塑性转动能力均有一定程度的提高,从而使悬臂梁的塑性变形减小。由图 6(f) 可知,BPS1 试件由于螺栓数只有翼缘等强设计螺栓数 1/3 倍,梁拼接区的受弯承载力远小于梁未拼接区的全塑性受弯承载力,故梁拼接区下翼缘先出现破坏,且悬臂梁的塑性变形未能得到充分发展。从图 6(e)、(g) 和 (h) 可以看出,悬臂梁的塑性变形随着翼缘螺栓数的增加而增大,当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 2/3 ~ 1.0 倍时,适当减少螺栓数可以提高节点的延性和塑性转动能力;当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 1.0 ~ 4/3 倍时,悬臂梁上翼缘比梁拼接区下翼缘先出现屈服。综上分析,在不同拼接参数下试件能有效利用拼接区螺栓的滑移、螺栓杆与孔壁的挤压、板件的变形以及悬臂梁的塑性变形来实现耗能。

3.2 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。梁柱“上焊下栓”节点的等效

黏滞阻尼系数计算结果见表3。由表可知,试件 BASE 的等效黏滞阻尼系数均大于其他试件,说明由等强设计法设计的基本试件具有较好耗能能力,且试件的等效黏滞阻尼系数随着接触面摩擦系数的减小而减小;翼缘螺栓数对试件的能量耗散能力有一定程度的影响,在试件 BASE 的基础上增大或减小翼缘螺栓数,试件的等效黏滞阻尼系数均有一定程度的降低,说明在等强设计法设计的基本试件的基础上,改变翼缘螺栓数或接触面的摩擦系数对试件的能量耗散能力均有降低趋势。

表3 等效黏滞阻尼系数

Table 3 Equivalent viscose damping coefficient

试件	ζ_{eq}				
	$2\Delta_y$	$3\Delta_y$	$4\Delta_y$	$5\Delta_y$	$6\Delta_y$
EPS1	0.421 2	0.456 5	0.446 5	0.481 4	0.433 9
EPS2	0.435 1	0.468 9	0.453 4	0.490 7	0.426 6
EPS3	0.439 1	0.459 0	0.452 2	0.508 3	0.537 8
EPS4	0.440 2	0.472 7	0.460 8	0.509 9	0.533 2
BASE	0.440 9	0.472 9	0.462 9	0.512 9	0.541 2
BPS1	0.417 2	0.438 4	0.417 7	—	—
BPS2	0.438 1	0.473 2	0.459 3	0.492 8	0.523 7
BPS3	0.440 9	0.427 9	0.463 7	0.498 1	0.521 0

3.3 拼接区的耗能

拼接区的位移角 θ_1 包括拼接区板件的变形和滑移变形, M_1 、 θ_1 的计算见式(2)、式(3)。由于节点拼接区上翼缘采用对接焊缝连接,下翼缘一侧采用角焊缝连接,另一侧采用螺栓连接,其受力机理不同于传统节点。开始加载时,节点的钢材进入弹性阶段,梁下翼缘所受的压力或拉力小于接触面的摩擦力,节点主要发生弹性弯曲变形;继续加载,当节点的梁下翼缘所受的压力或拉力大于接触面的摩擦力时,拼接区下翼缘的螺栓出现滑移和板件出现较小变形,且悬臂梁上翼缘和腹板未出现塑性变形,拼接区下翼缘的板件变形及螺栓的滑移量在正向和负向加载时基本相同。

在加载后期,除了试件 BPS1 外,其余试件梁拼接区的负向位移角远大于正向位移角,原因是在负向加载时,梁下翼缘受到的压

力远大于接触面的摩擦力,梁拼接区的螺栓出现滑移、螺栓杆与孔壁发生挤压以及梁拼接区板件发生变形,且拼接区产生较大的螺栓滑移以及板件的变形,而梁上翼缘受拉且悬臂梁上翼缘靠近柱面处的钢材产生应力集中。当负向加载完成后卸载并沿正向加载时,在悬臂梁上翼缘钢材产生应力集中处出现塑性变形,同时腹板也开始出现鼓起,且梁上翼缘的塑性变形和腹板的鼓起随着加载位移的增大而增大,由于梁上翼缘的塑性变形和腹板的鼓起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螺栓的滑移变小,故节点拼接区的正向位移角小于负向位移角。

当接触面的摩擦系数取 0.1 ~ 0.45 时,随着接触面摩擦系数的减小,节点的正向位移角逐渐增大,说明随着接触面摩擦系数的减小,梁拼接区板件的变形和螺栓的滑移逐渐增大。试件 BPS1 由于梁拼接区的受弯承载力远小于梁未拼接区的全塑性受弯承载力,因此试件 BPS1 在梁拼接区下翼缘先出现破坏,且试件主要以梁拼接区螺栓的滑移和板件的变形耗能为主,故试件 BPS1 的拼接区的正向位移角比其余 BPS 试件大。

不同拼接参数下“上焊下栓”节点的耗能见表4。表中拼接区的耗能是指拼接区的滞回曲线包围的面积之和,梁端滞回曲线包围的面积之和为节点的总耗能,梁拼接区的耗能除以总耗能为拼接区耗能占比。

表4 试件的耗能

Table 4 Energy dissipation of specimens

试件	拼接区耗能/	总耗能/	拼接区耗能
	(kN·m)	(kN·m)	占比/%
EPS1	107.64	228.39	47.13
EPS2	104.36	228.95	45.58
EPS3	77.16	185.32	41.64
EPS4	79.84	193.93	41.17
BASE	79.18	192.15	41.21
BPS1	43.98	85.82	51.25
BPS2	80.77	188.30	42.89
BPS3	78.61	182.55	43.06

由表4可知,试件EPS1和EPS2的总耗能和拼接区的耗能明显大于其他EPS试件,这是由于当梁端位移角达到0.048 rad时,试件EPS1和EPS2的接触面摩擦系数过小,拼接区的腹板和下翼缘板件之间出现较大滑移,且试件的延性和塑性转动能力均有一定程度的提高,使试件能继续吸收能量.由于试件BPS1的翼缘螺栓数过少,试件较早出现破坏,且其总耗能只有BASE试件的44.66%;而其余BPS试件和BASE试件的总耗能和拼接区的耗能所占比例变化不大.当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 $2/3 \sim 4/3$ 时,梁拼接区耗能占总耗能的41%~44%;当接触面的摩擦力取0.1~0.45时,梁拼接区耗能占总耗能的41%~48%.翼缘拼接板螺栓孔的孔径变化结果见表5.

表5 翼缘拼接板螺栓孔的孔径变化

Table 5 Variation of bolt hole distance of flange splice plate

试件	最大螺栓 孔径/mm	原螺栓 孔径/mm	增大率/%
EPS1	24.48	21.50	13.86
EPS2	24.40	21.50	13.49
EPS3	24.19	21.50	12.51
EPS4	24.04	21.50	11.81
BASE	24.03	21.50	11.77
BPS1	28.22	21.50	31.26
BPS2	24.23	21.50	12.70
BPS3	23.54	21.50	9.49

由表5可知,随着接触面摩擦系数的减小,翼缘拼接板的螺栓孔径增加,这是由于拼接处板件之间出现滑移时对应的加载位移随着接触面摩擦系数的减小而减小,螺栓杆与孔壁的挤压变形逐渐增大,因此翼缘拼接板的螺栓孔径也在逐渐增加,且螺栓孔径增大将更加有利于试件利用摩擦耗能和钢材的变形耗能来抵消外界能量,说明节点能有效地利用螺栓的滑移、板件的变形和螺栓杆与孔壁的挤压实现耗能.

当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 $2/3 \sim 4/3$ 时,拼接区下翼缘的螺栓杆与孔壁的挤压变形随着翼缘螺栓数的减小而增大,翼缘拼接板的螺栓孔径也在逐渐增加,且螺栓孔径的增加将更加有利于试件利用摩擦耗能和钢材的变形耗能来抵消外界能量.

4 结论

(1)当翼缘螺栓数为翼缘等强设计螺栓数的 $2/3 \sim 4/3$ 时,“上焊下栓”节点拼接区的耗能占总耗能的41%~44%,且随着翼缘螺栓数的减少,节点在达到极限承载力后其承载力下降较缓;适当的减少螺栓数可以增大拼接区螺栓的滑移、板件变形、螺栓杆与孔壁的挤压和翼缘拼接板的螺栓孔径,且螺栓孔径的增加将更加有利于试件利用摩擦耗能和钢材的变形耗能来抵消外界能量.

(2)当接触面的摩擦系数取0.1~0.45时,“上焊下栓”节点拼接区的耗能占总耗能的41%~48%,且随着接触面摩擦系数的减小,节点的等效黏滞阻尼系数减小,但节点的延性性能有一定程度的提高,因此可以增加节点总的耗能量.

(3)“上焊下栓”节点在地震作用下能有效利用拼接区螺栓的滑移、螺栓杆与孔壁的挤压以及板件的变形来实现耗能,且该节点具有良好的耗能能力.

参考文献

- [1] 鲁秀秀,王燕,刘秀丽. 钢结构装配式梁柱连接节点研究进展[J]. 钢结构, 2016, 31(10): 1-7.
(LU Xiuxiu, WANG Yan, LIU Xiuli. Research progress in fabricated beam-column joint of steel structure[J]. Steel construction, 2016, 31(10): 1-7.)
- [2] 石永久,王萌,王元清,等. 钢框架改进型梁柱节点滞回性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 205-210.
(SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing, et al. FEM analysis on cycle behavior of improved beam-column connection in steel frame[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2): 205-210.)

- [3] 贾连光,王瑞峰.蜂窝式钢框架梁柱节点的试验与有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(3):34-39.
(JIA Lianguang, WANG Ruifeng. Analysis on performance of beam-column node of cellular steel frame[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2011, 27(3):34-39.)
- [4] 隋伟宁,白雪,李桐昌.节点域构造不同的外加环式梁柱异型钢框架节点有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(4):675-681.
(SUI Weining, BAI Xue, LI Guochang. Finite element analysis on steel beam-column joints strengthened by plate ring with different details in the panel zone [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(4):675-681.)
- [5] KONG Z, KIM S E. Numerical estimation for initial stiffness and ultimate moment of T-stub connections[J]. Journal of constructional steel research, 2018, 141:118-131.
- [6] ZHAO Xin, WU Mai. Nonlinear analysis on static behaviors of new all-bolted beam-to-column connections for concrete-filled square steel tube [J]. Advanced materials research, 2013, 4:671-674.
- [7] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等.带Z字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能分析[J].北京工业大学学报,2016,42(11):1669-1680.
(ZHANG Ailin, GUO Zhipeng, LIU Xuechun, et al. Analysis of seismic behavior of prefabricated steel frame joints with Z-shaped cantilever beam splicing [J]. Journal of Beijing university of technology, 2016, 42(11):1669-1680.)
- [8] 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 Zhipeng, ZHANG Ailin, LIU Xuechun, 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.)
- [9] LIU X, CUI X, YANG Z, et al. Analysis of the seismic performance of site-bolted beam to column connections in modularized prefabricated steel structures [J]. Advances in materials science & engineering, 2017, 2017(9):1-18.
- [10] OH K, LI R, CHEN L, 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.
- [11] OH K, LEE K, CHEN L, 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.
- [12] GUO Xiaonong, ZHANG Yan, XIONG Zhe. Load-bearing capacity of occlusive high-strength bolt connections [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 127:1-14.
- [13] CHEN Chengchih, LIN Chunchou. Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with tapered beam flanges [J]. Engineering structures, 2013, 48:588-601.
- [14] ABDULKADIR Cüneyt Aydın, MAHMUT Kılıç, MAHYAR Maali, et al. Experimental assessment of the semi-rigid connections behavior with angles and stiffeners [J]. Journal of constructional steel research, 2015, 114:338-348.
- [15] DIAZ Concepción, VICTORIA Mariano. FE model of three-dimensional steel beam-to-column bolted extended end-plate joint [J]. International journal of steel structures, 2018, 18:843-867.
- [16] DIMITRIOS S Sophianopoulos, AGORITSA E Deri. Steel beam-to-column RBS connections with European profiles: I. Static optimization [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 139:101-109.
- [17] 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 Xiaodong. Experiment and finite element study of steel structure “HU” assembly rigid connection [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.)
- [18] 中华人民共和国建设部. 钢结构工程施工质量验收规范:GB50205—2001[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for acceptance of construction quality of steel structures: GB50205—2001 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.)
- [19] 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 University of Technology, 2009.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)