

引用本文:李晓东,闫胤积. 蜂窝式可替换塑性铰梁柱节点力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(1): 90-98.

LI Xiao-dong, YAN Yin-ji. Mechanical Behavior of Honeycombed Replaceable Plastic Hinged Beam-column Joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 90-98.

DOI:10.19815/j.jace.2020.04017

蜂窝式可替换塑性铰梁柱节点力学性能

李晓东, 闫胤积

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为避免梁柱翼缘相交处的焊缝在地震作用下发生脆性破坏,提出了一种蜂窝式可替换塑性铰节点形式,以实现中震可修的延性设计抗震目标。通过 ABAQUS 有限元分析软件对 7 个不同蜂窝式耗能环尺寸的节点模型、1 个腹板开圆孔型削弱型节点模型、1 个腹板开六边形孔型削弱型节点模型和 1 个普通梁柱节点模型在同等条件下进行了低周反复加载模拟。分析了各节点的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线、延性性能及塑性耗能曲线等,探讨蜂窝式耗能环的宽度和厚度对蜂窝式可替换塑性铰节点滞回性能的影响。结果表明:蜂窝式可替换塑性铰节点的滞回曲线饱满,刚度退化趋势良好;延性指标均超过了 3.0,具有良好的抗震性能;增加蜂窝式耗能环厚度比增加蜂窝式耗能环宽度能够更有效地提高节点屈服后变形能力、承载能力及耗能能力;节点屈服后变形能力和承载能力保持较好的状态;蜂窝式可替换塑性铰节点保护了梁柱节点焊缝,能够有效实现塑性铰外移。

关键词:梁柱节点;塑性铰;蜂窝式耗能环;耗能能力

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)01-0090-09

Mechanical Behavior of Honeycombed Replaceable Plastic Hinged Beam-column Joints

LI Xiao-dong, YAN Yin-ji

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to avoid the brittle failure of the welds at the intersection of beam and column flanges under earthquake, a form of honeycomb replaceable plastic hinge joints was proposed to achieve the seismic target of repairable ductility design in moderate earthquakes. Low-cycle repeated loading simulation of the node models of seven different honeycomb energy dissipation ring sizes, one weakened node model with round hole opening, one weakened node model with hexagon hole opening and one ordinary beam-column node model was carried out by the ABAQUS under the same conditions. The hysteresis curve, skeleton curve, stiffness degradation curve, ductility performance and plastic energy consumption curve of each joint were analyzed, and the influences of the width and thickness of honeycomb energy dissipation ring on hysteretic performance of honeycomb replaceable plastic hinge joint were discussed. The results show that the hysteretic curve of the honeycomb replaceable plastic hinge node is full and the stiffness

收稿日期:2020-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51968043, 51978320)

作者简介:李晓东(1973-),男,甘肃会宁人,副教授,工学博士, E-mail: xldli@lut.cn.

degradation trend is good. The ductility indicators exceed 3.0, so the joint has good seismic performance. Increasing the thickness of the honeycomb energy dissipation ring is more effective than increasing the width of the honeycomb energy dissipation ring, which can effectively improve the deformation capacity, bearing capacity and energy dissipation capacity of the specimen after yield. The deformation capacity and load-bearing capacity of the joint remains in a good state after yielding. The honeycomb replaceable plastic hinge joint protects the beam-column joint weld and effectively achieves the plastic hinge outward movement.

Key words: beam-column joint; plastic hinge; honeycomb energy consumption ring; energy dissipation capacity

0 引言

钢框架结构中最重要的一部分是梁柱连接节点,美国北岭地震和日本阪神地震的震害调查显示,在梁柱节点处发现了大量的脆性裂缝^[1-2]。因此研究人员对钢框架梁柱连接节点的破坏机理、抗震性能以及设计方法等方面进行了广泛研究,并取得了许多研究成果。当前关于梁柱节点的研究主要是采取加强节点的方法或在梁上容易出现塑性铰的位置进行局部削弱。在地震作用时,把塑性铰区从梁柱翼缘相交的焊缝处外移,避免焊缝发生脆性破坏,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的设计思想。

张爱林等^[3]提出了一种可修复的装配式钢框架梁柱节点,利用翼缘连接盖板上的变形来消耗地震能量。在震后只需要更换连接盖板即可实现节点的快速修复。李玉顺等^[4]对钢-竹组合梁柱节点的性能进行了探究,研究结果表明钢-竹组合框架滞回曲线饱满,抗震性能突出。郑宏等^[5]研究表明,翼缘削弱型节点可使梁端塑性铰外移至梁端翼缘削弱处,避免梁端焊缝处应力集中导致脆性破坏。刘秀丽等^[6]对钢结构 T 形连接件进行试验及有限元研究,比较了 T 形连接件构造参数变化对高强螺栓力学性能的影响,并对高强度螺栓受力进行数值模拟。郁有升等^[7-10]的试验结果表明,梁翼缘削弱节点具有良好的塑性变形能力和耗能性能,将梁翼缘进行适当削弱后形成的骨型节点可以增加梁柱节点的耗能性能,是一种理想的延性节点。

李晓东等^[11]提出了一种基于摩擦摆隔震支座和汽车制动装置的耗能原理的新型摩擦塑性铰节点,进行了有限元模型的低周反复荷载分析,探究了新型摩擦塑性铰节点的抗震性能。黄炳生等^[12]提出了工程中常用的几种孔型蜂窝梁等效抗弯刚度求解方法。贾连光等^[13-15]对不同参数下的正六边形孔蜂窝梁和蜂窝组合梁抗剪性能进行了试验与有限元

分析研究。

以上研究有效地实现塑性铰的外移,转移了梁柱节点焊缝处的应力,但存在震后难以修复的缺陷。本文基于目前的研究现状,提出了一种蜂窝式可替换塑性铰的概念及节点形式,以期增加节点的耗能和延性,并兼顾震后可替换的要求。该新型节点通过蜂窝式单元的六边形耗能环消耗地震能量,且在地震作用后,可通过整体更换蜂窝式单元,实现中震可修的抗震设防目标。

1 塑性铰构造设计

蜂窝式可替换塑性铰节点分为基本单元和蜂窝式单元 2 个部分,基本单元由 H 型钢梁和 H 型钢柱组成。蜂窝式单元由六边形的蜂窝式耗能环和 H 型钢梁组成,蜂窝式耗能环通过焊接嵌在 H 型钢梁腹板间,蜂窝式单元通过拼接板和高强螺栓分别与左右 H 型钢梁栓接。蜂窝式可替换塑性铰节点通过调整蜂窝式耗能环的宽度和厚度来改变节点的耗能能力,其节点详图如图 1(a)所示,蜂窝式耗能环三维视图如图 1(b)所示。

2 有限元模型

2.1 模型基本信息

利用有限元分析软件 ABAQUS 建立了节点三维模型,所有有限元模型中梁柱均为焊接 H 型钢,柱截面为 H300×200×8×12,柱高取 1 500 mm。梁截面为 H250×175×7×11,梁长取 1 200 mm。其中 7 个蜂窝式可替换塑性铰节点模型从梁柱焊缝 150 mm 起为蜂窝式单元(可替换梁段),此单元梁截面为 H272×175×7×11,梁腹板长 L 取 480 mm(考虑拼接板螺栓间距,可替换梁段腹板长度范围为 480 mm≤ L ≤600 mm,梁翼缘长度满足螺栓连接所规定的间距即可),梁翼缘长取 622 mm。蜂窝式单元梁翼缘与左右梁翼缘通过螺栓连接,螺栓采用

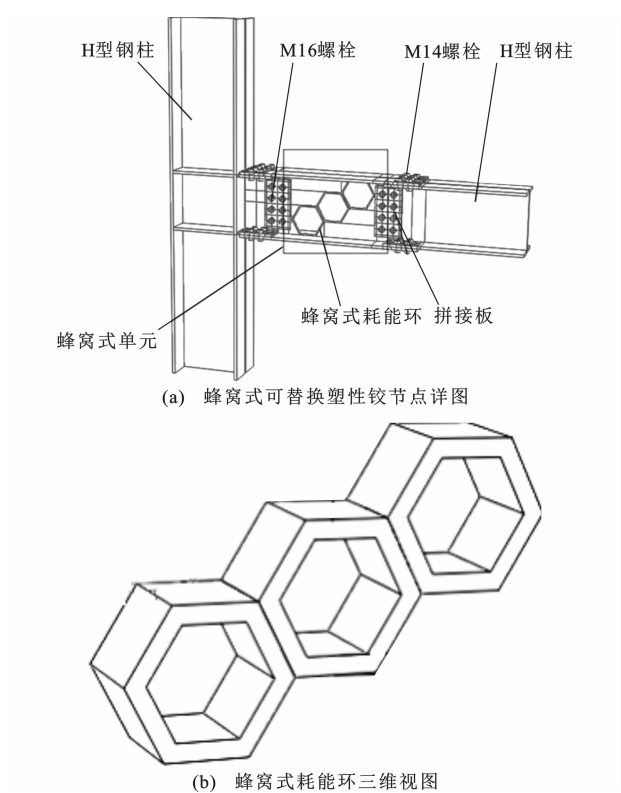


图 1 蜂窝式可替换塑性铰节点

Fig. 1 Honeycomb Replaceable Plastic Hinged Joint

8.8 级 M14 摩擦型高强螺栓,共 32 个。蜂窝式单元梁腹板与左右梁腹板通过螺栓和拼接板连接,螺栓采用 8.8 级 M16 摩擦型高强螺栓,共 16 个。螺栓预紧力取 80 kN,最大程度模拟实际环境。拼接板尺寸为 208 mm×112 mm×7 mm,有限元模型如图 2(a)所示。

普通梁柱节点模型(JZHN)腹板无削弱,其余条件均与其他节点模型相同,有限元模型如图 2(b)所示。腹板开六边形孔型削弱型节点模型(JZHL)取蜂窝式塑性铰节点模型中间六边形的尺寸及位置,其余条件均与其他节点模型相同,有限元模型如图 2(c)所示。腹板开圆孔型削弱型节点模型(JZHY)与腹板开六边形孔型削弱型节点模型(JZHL)区别在于削弱孔型不同,其余条件均与其他节点模型相同。JZHY 有限元模型如图 2(d)所示。

2.2 模型参数及加载条件

有限元分析模型采用三维八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)划分网格。为了减小模型网格划分造成的计算结果误差,对螺栓孔、蜂窝式耗能环及蜂窝式单元腹板等重点研究部位采取了局部网格细化的措施。计算时忽略了节点焊接缺陷及焊接残余应力的影响。有限元模型的网格划分如图 3 所示。

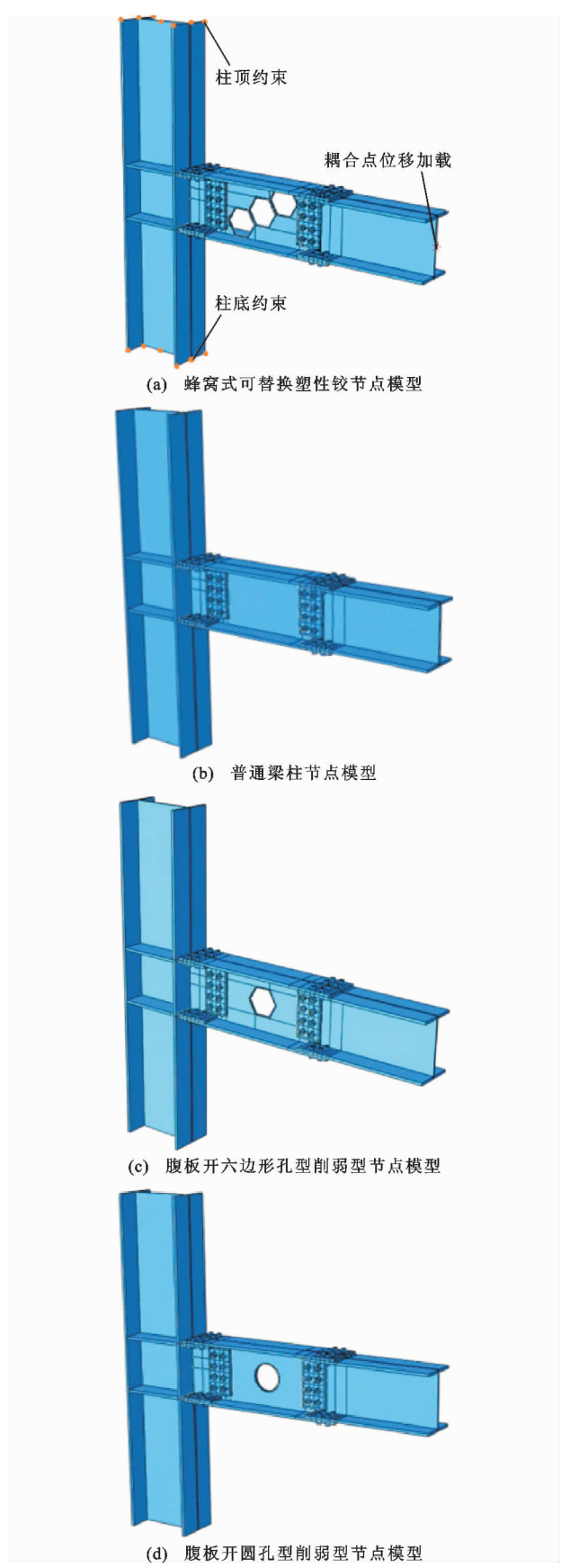


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model

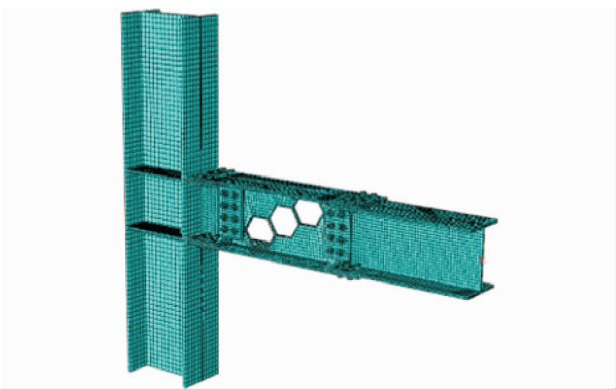


图 3 网格划分

Fig. 3 Mesh Generation

模型中除高强螺栓外其余构件材料均为 Q345B 钢。材料的弹性模量取 206 GPa,泊松比为 0.3,密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。钢材应力-应变(f - ϵ)本构关系选取强化和下降段三折线模型,如图 4 所示,其中, f_y 为屈服应力, f_u 为极限应力, f_{st} 为钢材破坏时的应力, ϵ_y 为屈服应变, ϵ_u 为极限应变, ϵ_{st} 为钢材破坏时的应变。高强螺栓的应力-应变本构关系采用图 5 所示的三段式折线模型^[16]。模型中螺栓通过边界条件的 Bolt Load 定义螺栓的预应力。螺栓的接触属性:法向行为采用硬接触,切向行为为摩擦,摩擦因数大小取决于材料的种类、粗糙度、表面处理 and 连接表面的脱脂。这里摩擦因数取 0.25,最大程度模拟实际环境。其余接触面均采用 Tie 定义焊接面刚接约束。

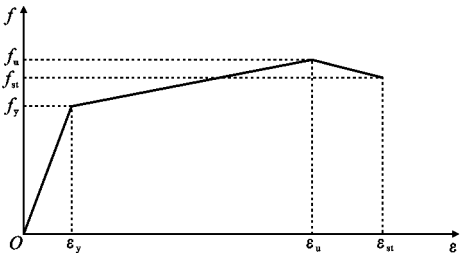


图 4 钢材应力-应变本构模型

Fig. 4 Stress-strain Constitutive Model of Steel

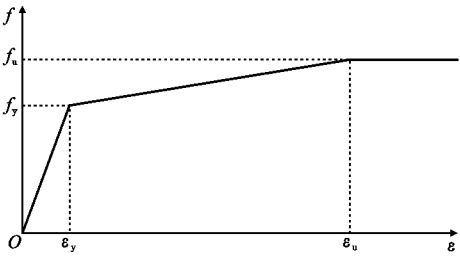


图 5 螺栓应力-应变本构模型

Fig. 5 Stress-strain Constitutive Model of Bolt

为了充分探究蜂窝式可替换塑性铰节点的耗能能力,在蜂窝式耗能环半径固定的情况下,设计了 7 个蜂窝式可替换塑性铰节点、1 个普通梁柱节点模型、1 个腹板开圆孔型削弱型节点模型、1 个腹板开六边形孔型削弱型节点模型。7 个蜂窝式可替换塑性铰节点分为两大类:第 1 类为保持蜂窝式耗能环宽度不变,逐步增加蜂窝式耗能环的厚度;第 2 类为保持蜂窝式耗能环厚度不变,以腹板厚度的倍数增加蜂窝式耗能环的宽度。设置 1 个普通梁柱节点模型是为了对比腹板削弱和不削弱对节点耗能能力的影响;设置 1 个腹板开圆孔型削弱型节点模型和 1 个腹板开六边形孔型削弱型节点模型是为了对比 2 种典型的腹板削弱开孔类型对节点耗能能力的影响。各节点编号及参数如表 1 所示。

表 1 模型的主要参数

Tab. 1 Primary Parameters of Models

节点编号	蜂窝式耗能环 厚度/mm	蜂窝式耗能环 宽度/mm	耗能环 数量	耗能环 种类
JZHH5	5	7(腹板厚度)	3	蜂窝式
JZHH10	10	7(腹板厚度)	3	蜂窝式
JZHH15	15	7(腹板厚度)	3	蜂窝式
JZHK21	5	21(3 倍腹板厚度)	3	蜂窝式
JZHK35	5	35(5 倍腹板厚度)	3	蜂窝式
JZHK49	5	49(7 倍腹板厚度)	3	蜂窝式
JZHK63	5	63(9 倍腹板厚度)	3	蜂窝式
JZH1	5	7(腹板厚度)	1	蜂窝式
JZHY	5	7(腹板厚度)	1	圆形
JZHN	0	0	0	

在有限元模型中,根据试验边界将柱顶与柱底节点 6 个方向的自由度进行完全约束模拟。采用耦合约束方式在梁自由端进行位移加载,加载方式为滞回加载,梁端加载点距离柱翼缘的距离为 1 200 mm,加载过程分为:①施加螺栓预紧力;②在梁端主耦合点施加位移荷载。加载制度如图 6 所示。

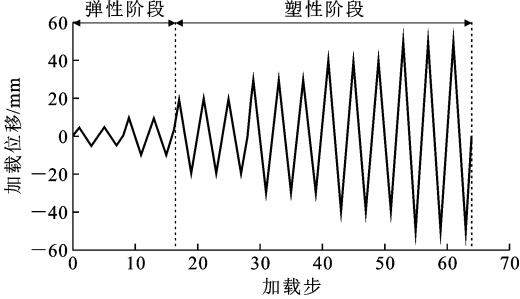


图 6 拟静力加载制度

Fig. 6 Quasi-static Loading System

3 模型计算结果与抗震性能分析

3.1 破坏特征

随着有限元模型梁自由端加载位移的增大,7个蜂窝式可替换塑性铰节点模型的蜂窝式耗能环、蜂窝式单元腹板、蜂窝式单元翼缘等部位均受到不同程度的屈服破坏;节点 JZHH5 整体应力云图如图 7 所示。首先蜂窝式单元腹板屈服,其次翼缘发生屈曲,最后腹板开孔孔角处发生破坏,其中节点 JZHH5 蜂窝式单元应力云图如图 8 所示。蜂窝式耗能环屈服变形,相邻蜂窝式耗能环连接处变形严重。节点 JZHH5 蜂窝式耗能环应力云图如图 9 所示。其余节点的破坏特征与节点 JZHH5 的破坏特征相似。

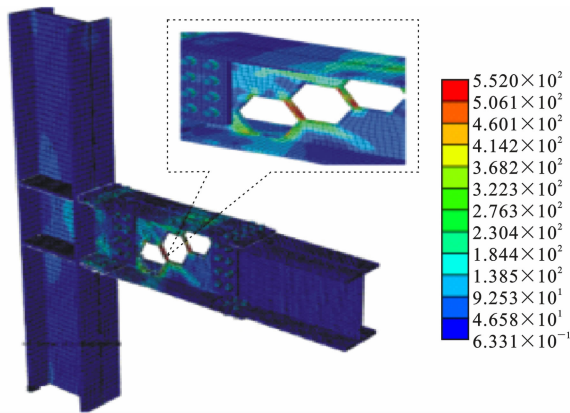


图 7 JZHH5 整体应力云图(单位:MPa)
Fig. 7 Overall Stress Cloud Diagram of JZHH5 (Unit:MPa)

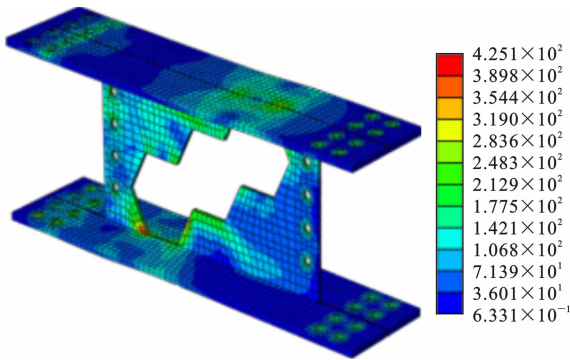


图 8 JZHH5 蜂窝式单元应力云图(单位:MPa)
Fig. 8 Honeycomb Unit Stress Cloud Diagram of JZHH5 (Unit:MPa)

普通梁柱节点模型(JZHN)在梁柱焊缝处破坏较大,梁翼缘变形,其应力云图如图 10 所示;腹板开圆孔型削弱型节点模型(JZHY)在开孔处腹板和翼缘变形,其应力云图如图 11 所示;腹板开六边形孔

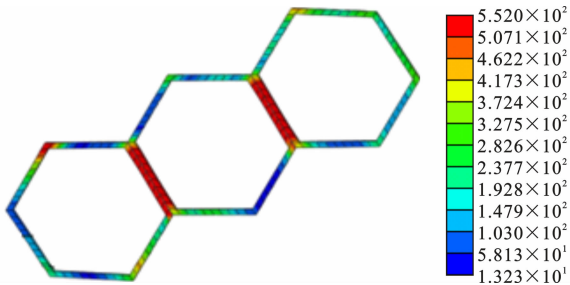


图 9 JZHH5 蜂窝式耗能环应力云图(单位:MPa)
Fig. 9 Stress Cloud Diagram of JZHH5 Honeycomb Energy Dissipating Ring (Unit:MPa)

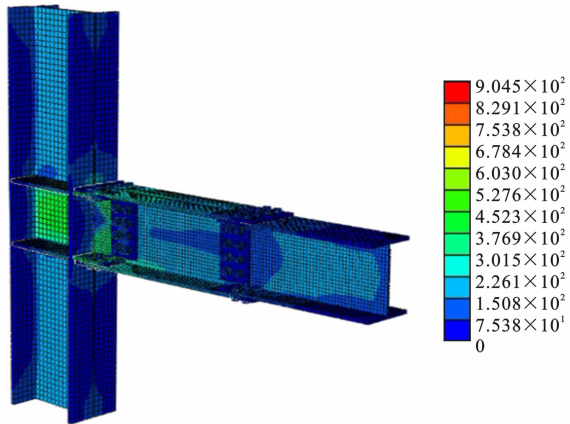


图 10 JZHN 整体应力云图(单位:MPa)
Fig. 10 Overall Stress Cloud Diagram of JZHN (Unit:MPa)

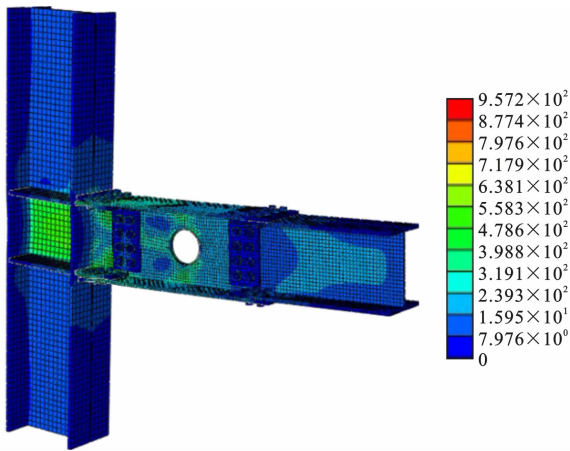


图 11 JZHY 整体应力云图(单位:MPa)
Fig. 11 Overall Stress Cloud Diagram of JZHY (Unit:MPa)

型削弱型节点模型(JZHL)在开孔处腹板和翼缘变形,开孔处上下腹板变形严重,其应力云图如图 12 所示。

3.2 滞回曲线

节点在往复位移荷载作用下获得的荷载-位移关系曲线为滞回曲线,可综合评价节点抗震性能。滞回环越饱满,表明节点耗散地震能量的能力越强,

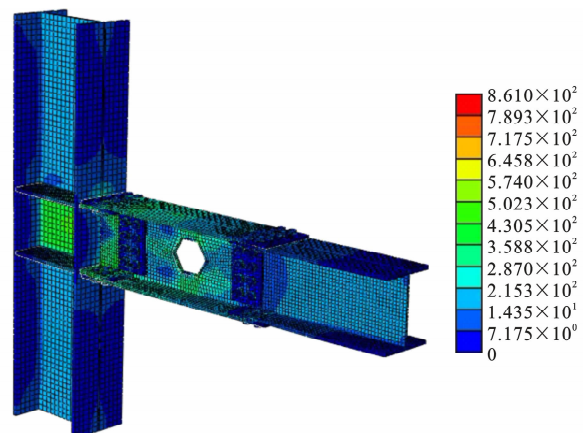


图 12 JZHL 整体应力云图(单位:MPa)

Fig. 12 Overall Stress Cloud Diagram of JZHL (Unit:MPa)

抗震性能越好。有限元节点模型的滞回曲线如图 13 所示,普通梁柱节点模型(JZHN)、腹板开圆孔型削弱型节点模型(JZHY)、腹板开六边形孔型削弱型节点模型(JZHL)的滞回曲线如图 13(a)所示。图 13(b)为增加蜂窝式耗能环厚度(JZHH 系列)的滞回曲线,图 13(c)为增加蜂窝式耗能环宽度(JZHK 系列)的滞回曲线。

由如图 13 滞回曲线可知:

(1)普通梁柱节点模型(JZHN)、腹板开圆孔型削弱型节点模型(JZHY)、腹板开六边形孔型削弱型节点模型(JZHL)的滞回环面积依次增大,节点耗能能力依次增强。因此腹板开六边形孔型削弱型节点模型耗能能力相对较强,在以下研究中重点开展腹板开六边形孔型削弱型节点的研究。

(2)7 个蜂窝式可替换塑性铰节点模型的荷载-位移曲线比较类似,滞回环面积较大,形状比较饱满。说明此类型节点在低周反复荷载试验中能较好地吸收地震能量。各节点的滞回曲线呈弓形,形状上具有“捏缩”效应,显示出滞回曲线受到了一定的滑移影响。这是由于蜂窝式单元腹板上的蜂窝式耗能环孔削弱了腹板截面,导致剪切变形增大。

3.3 骨架曲线

骨架曲线是把滞回曲线在往复位移加载 2 个方向的加载极值点依次连接而成的包络图。骨架曲线反映了节点模型在各不同阶段的受力和变形特征。由图 14 可知:在其他条件不变的情况下,增加蜂窝式耗能环厚度对节点的峰值荷载有影响,但影响不大;增加蜂窝式耗能环宽度对节点的峰值荷载影响几乎不变。在位移达到 ± 12 mm 后,骨架曲线由直线变为曲线,且各曲线逐渐开始分离,但由于梁自由端位移加载限制在 50 mm,使得骨架曲线在曲线段

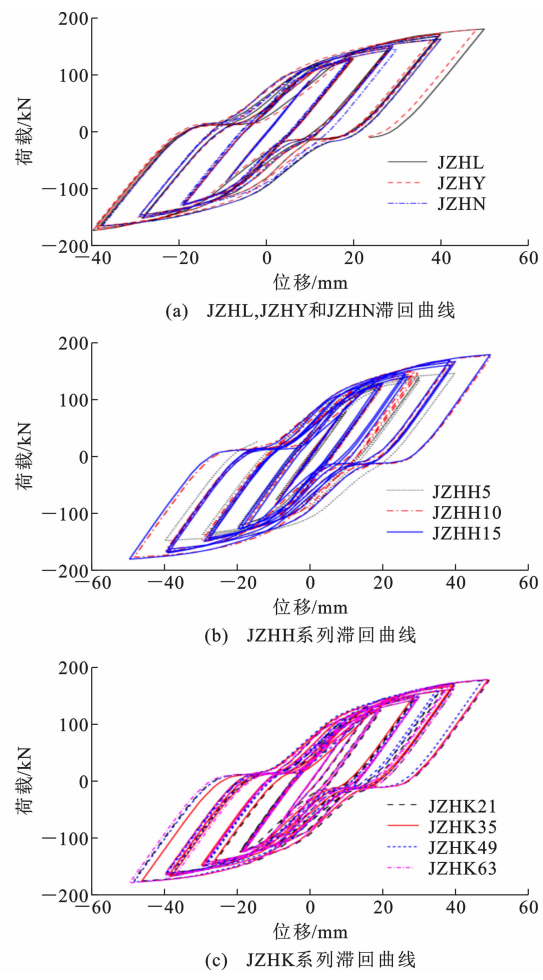


图 13 滞回曲线

Fig. 13 Hysteresis Curve

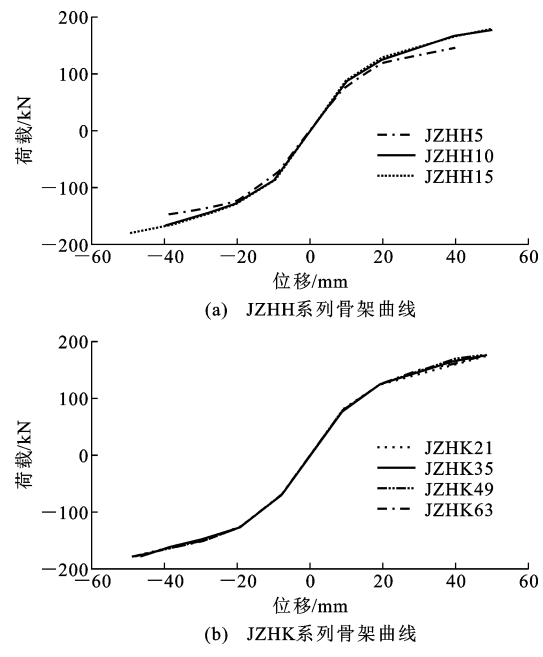


图 14 骨架曲线

Fig. 14 Skeleton Curves

分离不明显。当梁自由端竖向位移达到±50 mm 时,节点达到峰值荷载。

3.4 刚度退化曲线

刚度退化是结构抗震性能及结构抗震计算的重要指标。滞回曲线上坐标原点与某次循环的荷载峰值(骨架曲线上的点)连线的斜率称为节点的等效刚度。等效刚度随位移不断增大而降低的现象称为等效刚度退化,简称刚度退化。滞回环中每次循环的等效刚度与初始等效刚度的比值即为等效刚度退化系数^[17]。将每一个节点滞回曲线的刚度退化系数的数值相连即可得到如图 15 所示的刚度退化曲线。

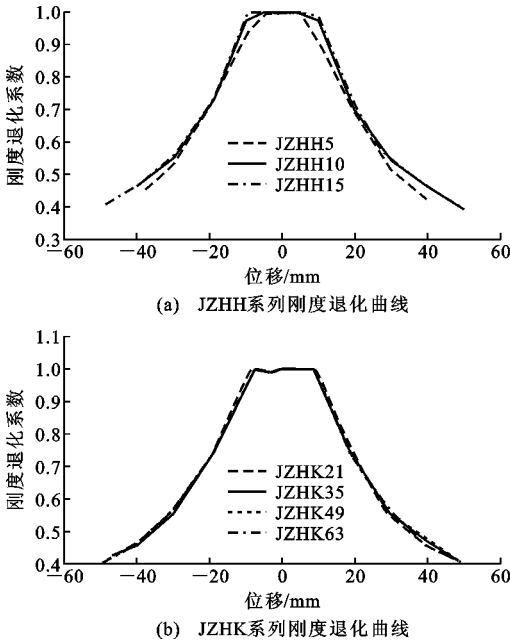


图 15 刚度退化曲线
Fig. 15 Stiffness Degeneration Curves

图 15 显示出各节点刚度退化均较均匀,无明显突变现象。节点在正负 2 个方向上的刚度退化趋势大致相同,图 15 中水平段表示骨架曲线的弹性阶段,表明刚度在弹性阶段基本保持稳定。当节点屈服后,单位位移上刚度退化系数急剧下降,表明节点塑性变形能力增大。当单位位移上刚度退化系数下降变缓慢时,表明刚度退化减缓。

3.5 延性性能

节点耗散地震能量和承受非弹性变形的能力由延性决定,延性越好节点抗震性能越好。延性的大小由位移延性系数来衡量,为了研究节点的延性变化规律,采用位移延性系数作为节点的延性指标。位移延性系数用 μ 来表示,是结构或者构件的极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值,计算公式如下

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

一般情况下极限位移取荷载下降到峰值荷载 85% 时所对应的位移^[18-19],但是一些结构破坏时的荷载并未达到峰值荷载的 85% 以下,此时可以选取峰值荷载对应的位移作为极限位移^[20],因节点未进入塑性破坏阶段,分析已经停止,所以选取峰值荷载对应的位移作为极限位移。通过分析拟静力结果得到的节点延性性能指标如表 2 所示。

表 2 节点延性系数
Tab. 2 Ductility Coefficients of Joints

节点编号	Δ_u /mm		Δ_y /mm		μ	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
JZHH5	39.65	-39.86	11.04	-10.87	3.59	3.67
JZHH10	49.84	-48.42	12.08	-12.03	4.13	4.02
JZHH15	49.43	-49.63	11.98	-11.97	4.13	4.15
JZHK21	49.10	-48.79	12.04	-11.94	4.08	4.09
JZHK35	48.62	-46.49	11.94	-11.95	4.07	3.89
JZHK49	47.21	-48.57	11.88	-11.97	3.97	4.06
JZHK63	48.91	-49.75	11.94	-12.03	4.10	4.14

由表 2 可知,节点延性系数随着蜂窝式耗能环厚度的增大而增大。说明随着蜂窝式耗能环厚度的增大,节点屈服后的变形能力和承载能力显著提高。节点 JZHH10, JZHH15 的节点延性系数整体比 JZHK 系列节点延性系数大,说明增加节点蜂窝式耗能环厚度比增加蜂窝式耗能环宽度更能使节点屈服后变形能力和承载能力提高。

为了使节点在屈服后具备较大的塑性变形能力,使节点不至于快速丧失承载能力,需要使蜂窝式耗能环厚度增大。节点延性指标均超过了 3.0,表明节点屈服后变形能力和承载能力保持较好的状态。

3.6 塑性耗能曲线

本文通过耗能曲线来比较节点的耗能能力。图 16(a)显示节点 JZHH10 比节点 JZHH15 的耗能能力大,具体原因为节点 JZHH5 在节点屈服后变形能力和承载能力丧失,故耗能能力不大。图 16(b)显示相同分析步内节点耗能能力几乎相同。增加蜂窝式耗能环宽度对节点耗能能力影响不大。

图 16(c)是将节点 JZHH5 与节点 JZHK21 对比,结果显示节点 JZHK21 耗能能力大。图 16(d)是将节点 JZHH10 与节点 JZHK35 对比,结果显示节点 JZHH10 耗能能力大。说明增加蜂窝式耗能环厚度比增加蜂窝式耗能环宽度节点的耗能能力增加更为显著。

4 结 语

(1)本文提出的蜂窝式可替换塑性铰节点的滞

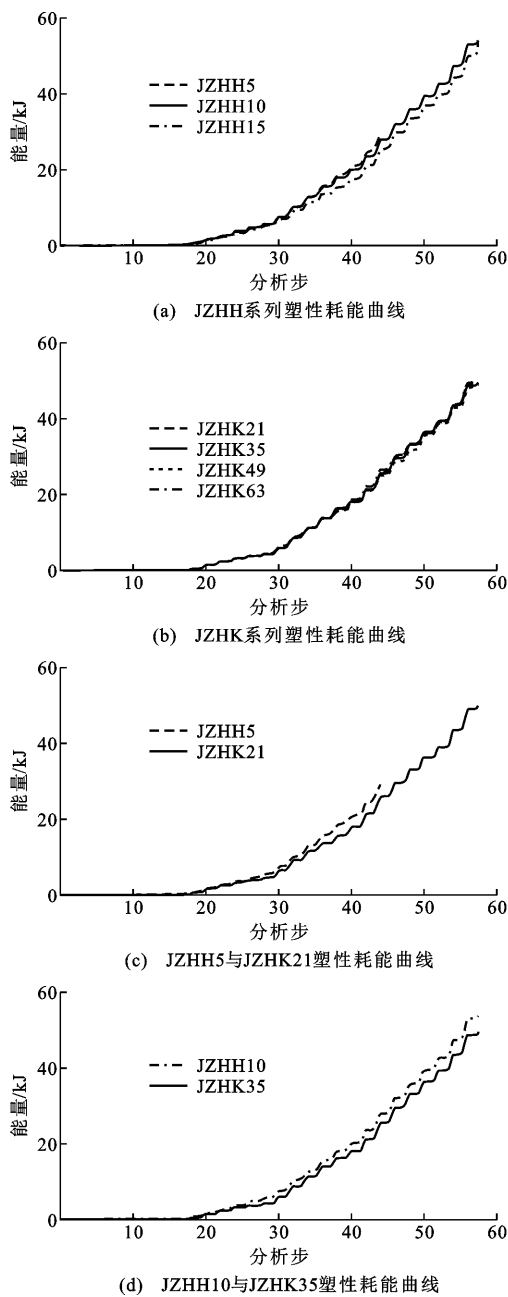


图 16 塑性耗能曲线

Fig. 16 Plastic Energy Dissipation Curves

回曲线较饱满,具有良好的耗能能力。

(2)节点屈服后变形能力和承载能力保持较好的状态。相对于增加蜂窝式耗能环宽度来说,增加蜂窝式耗能环厚度更能提高节点屈服后的变形能力和承载能力。

(3)该类型节点的蜂窝式耗能环在加载过程中容易发生屈曲变形,需要在之后的研究中改进。

参考文献:

References:

[1] MILLER D K. Lessons Learned from the Northridge

Earthquake[J]. Engineering Structures, 1998, 20 (4/5/6): 249-260.

[2] JASPART J P. General Report; Session on Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 55(1/2/3): 69-89.

[3] 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.

[4] 李玉顺,何佳伟,张家亮,等. 基于梁柱节点性能的钢-竹组合框架结构地震反应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(5): 22-28.

LI Yu-shun, HE Jia-wei, ZHANG Jia-liang, et al. Seismic Response Analysis of Bamboo-steel Composite Frame Structure Based on Performance of Beam-column Joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(5): 22-28.

[5] 郑宏,孟春辉,石丹. 翼缘削弱型节点空间钢框架在低周反复荷载作用下的抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(4): 120-126.

ZHENG Hong, MENG Chun-hui, SHI Dan. Seismic Performance of Reduced Beam Section Connection Steel Frames Under Low-cyclic Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4): 120-126.

[6] 刘秀丽,王燕,李美红,等. 钢结构 T 形连接高强度螺栓受力分析及数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(2): 63-70.

LIU Xiu-li, WANG Yan, LI Mei-hong, et al. Force Analysis and Numerical Simulation of High Strength Bolts in T-stub Connection of Steel Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 63-70.

[7] 郁有升,王燕,刘秀丽. 钢框架梁翼缘削弱型节点循环荷载作用下的有限元分析及试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 162-169.

YU You-sheng, WANG Yan, LIU Xiu-li. Finite Element Analysis and Experimental Study on the Behavior of Reduced Beam Section Connections of Steel Frame Under Cyclic Loading[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 162-169.

[8] 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.
- [9] 郁有升, 魏丽, 付国贤, 等. 一种新型梁柱装配式刚性节点的非线性静力分析[J]. 世界地震工程, 2014, 30(1): 50-56.
- YU You-sheng, WEI Li, FU Guo-xian, et al. Nonlinear Static Analysis of a New Beam-column Assembly Rigid Connection[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(1): 50-56.
- [10] 韩明岚, 王燕, 陈建林, 等. 翼缘削弱型节点钢结构的力学性能研究[J]. 钢结构, 2016, 31(5): 6-11, 5.
- HAN Ming-lan, WANG Yan, CHEN Jian-lin, et al. Study of the Mechanical Performance of Steel Structures with Reduced Beam Section Connections[J]. Steel Construction, 2016, 31(5): 6-11, 5.
- [11] 李晓东, 王起台, 孟强, 等. 新型摩擦“塑性铰”构造的抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 549-560, 580.
- LI Xiao-dong, WANG Qi-tai, MENG Qiang, et al. Seismic Performance of a Novel Friction “Plastic Hinge” Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 549-560, 580.
- [12] 黄炳生, 黄泰杰, 王维川, 等. 蜂窝梁等效抗弯刚度计算方法及其影响因素分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增2): 121-127.
- HUANG Bing-sheng, HUANG Tai-jie, WANG Wei-chuan, et al. Calculation Method of Equivalent Bending Stiffness of Castellated Beams and Analysis of Its Influence Factors[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 121-127.
- [13] 贾连光, 杜明坎, 回锋, 等. 六边形孔蜂窝梁和蜂窝组合梁抗剪性能分析[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 81-87, 132.
- JIA Lian-guang, DU Ming-kan, HUI Feng, et al. Analysis of Shear Behavior of Hexagon Hole Cellular Beam and Cellular Composite Beam[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 81-87, 132.
- [14] 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.
- [15] 贾连光, 王健. 蜂窝式梁-柱钢框架结构抗震性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(3): 451-455.
- JIA Lian-guang, WANG Jian. Analysis on the Seismic Behavior of the Cellular Beam-columns of Steel Frame Structure[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(3): 451-455.
- [16] 庄鹏, 王燕, 张茗玮. 装配式方钢管柱与H型钢梁连接节点力学性能研究[J]. 青岛理工大学学报, 2016, 37(5): 7-12, 25.
- ZHUANG Peng, WANG Yan, ZHANG Ming-wei. Mechanics Property Analysis of Prefabricated Rectangular Steel Tube and H-steel-beam Connection Joint[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2016, 37(5): 7-12, 25.
- [17] 杨松森, 王燕, 马强强. 装配式外套筒-加强式外伸端板组件梁柱连接节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 76-86.
- YANG Song-sen, WANG Yan, MA Qiang-qiang. Experimental Study on Seismic Behavior of Prefabricated Outer Sleeve-overhang Plate Joint Between Column and Beam[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 76-86.
- [18] 贾连光, 李秋谔, 刘勖, 等. 蜂窝梁滞回性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(5): 179-187.
- JIA Lian-guang, LI Qiu-rong, LIU Meng, et al. Study on Hysteretic Behavior of Cellular Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(5): 179-187.
- [19] 王燕, 李庆刚, 董建莉, 等. 梁端翼缘削弱型节点空间钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增1): 192-200.
- WANG Yan, LI Qing-gang, DONG Jian-li, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Space Steel Frame with Reduced Beam Section Connections[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 192-200.
- [20] WANG W, CHEN Y Y. Hysteretic Behaviour of Tubular Joints Under Cyclic Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(10): 1384-1395.