

文章编号:1673-2049(2018)04-0063-09

蜂窝梁-实腹柱十字形节点受力性能研究

聂少锋¹,朱纪钊¹,马 轶²,叶梦娜¹,宋龙飞¹

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061; 2. 陕西省高速公路建设集团公司,陕西 西安 710054)

摘要:为研究蜂窝梁-实腹柱框架中节点的受力性能,利用 ABAQUS 有限元软件对 28 种不同扩高比和开孔位置的蜂窝梁-实腹柱十字形节点足尺模型进行了数值模拟分析,详细研究了蜂窝梁-实腹柱十字形节点的破坏模式、塑性铰产生位置、滞回曲线、骨架曲线、延性性能和耗能能力。结果表明:蜂窝梁-实腹柱十字形节点由于梁上开孔的削弱作用,塑性铰由节点域向梁上第 1 个孔洞处转移,避免在节点域破坏,具有良好的抗震性能;蜂窝梁第 1 开孔位置一定时,随着扩高比 K 增加,节点水平承载力先增加后降低,并在 $K=1.4$ 左右时达到峰值;扩高比 K 一定时,随着梁上第 1 个孔洞中心距柱距离 L 的增大,节点水平承载力先增加后趋于稳定;综合考虑扩高比 K 和开孔位置 L 对节点水平承载力及塑性铰产生位置的影响,并定义参数 α_h ,给出参数 K 和 α_h 的建议合理取值范围;在此取值范围内,蜂窝梁-实腹柱十字形节点水平承载力较高,滞回曲线饱满,具有良好的延性与耗能能力,且塑性铰出现在梁上第 1 个孔洞附近,满足“强节点弱构件”的抗震设计要求,具有良好的抗震性能。

关键词:蜂窝梁-实腹柱十字形节点;有限元分析;扩高比;塑性铰;受力性能

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A

Study on Mechanical Behavior of Castellated Beam-solid Column Cruciform Joints

NIE Shao-feng¹, ZHU Ji-zhao¹, MA Yi², YE Meng-na¹, SONG Long-fei¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Expressway Construction Group Company, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of castellated beam-solid column frame middle joints, 28 types of full-scale castellated beam-solid column cruciform joints(CSCJ) with different expansion ratios and hole locations were analyzed by ABAQUS finite element software. The failure modes, plastic hinge positions, hysteresis curves, skeleton curves, ductility and energy dissipation capacities of CSCJ were studied in detail. The results show that the plastic hinge of CSCJ is transferred from the node zone to the location of the first hole on the beam due to the weakened effect of the hole. The damage of node zone is avoided and the joint has good seismic performance. When the location of the first hole remains constant, the horizontal bearing capacity of CSCJ increases firstly and then decreases with the increasing of expansion ratio K . The horizontal bearing capacity reaches the peak value near $K=1.4$. When the expansion ratio K remains constant, the horizontal bearing capacity of CSCJ increases firstly and then tends to be steady with the increasing of the distance L between the first hole on the beam and the column.

收稿日期:2018-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51408052);陕西省青年科技新星项目(2016KJXX-51);陕西省重点研发计划项目(2018SF-354)

作者简介:聂少锋(1981-),男,河北石家庄人,副教授,工学博士,E-mail:niesf126@126.com。

Considering the influences of the expansion ratio K and the location L of the hole on the horizontal bearing capacity and the locations of plastic hinges of CSCJ, the parameter $\alpha_h = L/h$ is defined, and the reasonable ranges of K and α_h are proposed. Within this range of value, the CSCJ has high horizontal bearing capacity, full hysteresis curve, good ductility and energy dissipation capacity, and the plastic hinge of CSCJ appears near the location of the first hole on the beam so that the CSCJ satisfies the seismic requirements of strong joints and weak members and has good seismic performance.

Key words: castellated beam-solid column cruciform joint; finite element analysis; expansion ratio; plastic hinge; mechanical behavior

0 引言

蜂窝梁是由 H 型钢沿腹板以一定的折线或弧线切割形成的两部分错位焊接而成的新型钢构件形式。与原型钢相比,蜂窝构件自重较轻;采用蜂窝构件可以节省钢材,且便于贯穿管线,减小建筑高度,综合效益显著^[1-3]。在蜂窝结构中,梁柱节点起着传递弯矩和剪力的作用,其性能直接影响着结构的强度、刚度和稳定性^[4]。梁柱节点处应力集中、内力分布复杂,因此对蜂窝梁柱节点的受力性能开展研究是推广应用蜂窝结构亟待解决的问题。

国内外学者已对蜂窝节点进行了部分研究。Zaarour 等^[5]对 12 根蜂窝梁进行试验研究,采用有限元软件预测屈曲载荷,并提出图表法及有限差分法计算屈曲荷载。周朝阳等^[6]通过对六边形孔和圆孔蜂窝梁进行大量有限元分析,得到腹板刚度折减系数表,并给出该系数的半理论半经验计算公式,采用该公式可快速求解蜂窝梁的等效抗弯刚度。张艳霞等^[7]对蜂窝钢框架边节点的受力性能进行有限元分析,研究表明通过调整梁上孔洞大小和间距可以改善蜂窝节点的抗震性能。贾连光等^[8-9]对蜂窝式钢框架边节点进行了低周反复荷载试验研究和有限元分析,结果表明蜂窝节点滞回曲线饱满,耗能能力较好,相比于柱上开孔位置,梁上开孔位置对节点抗震性能影响更显著;文献^[9]提出了梁上第 1 个孔洞距柱翼缘距离取值的建议公式。张德刚等^[10]对狗骨-蜂窝式梁柱节点进行了梁端循环位移荷载作用下的有限元分析,研究表明狗骨-蜂窝式节点滞回曲线饱满,延性和耗能能力强,塑性变形能力良好。王培军等^[11]对跨中集中力作用下圆角多边形孔蜂窝梁进行有限元分析,研究其腹板的屈曲模式和屈曲承载力,提出可用于计算相邻孔间腹板屈曲承载力的改进斜压柱理论模型。Wang 等^[12]采用有限元分析方法研究影响钢桁架蜂窝梁腹杆纵向剪切屈曲强

度的因素,提出了腹杆竖向剪切屈曲强度的设计方程。李明等^[13]对 24 个不同钢材屈服强度和含钢率的蜂窝节点进行有限元分析,结果表明开孔率对该类节点抗震性能影响最大,孔间距影响最小。Budi 等^[14]对六边形孔蜂窝钢梁的开孔角度及孔距进行了试验与有限元分析结合的优化研究,结果表明蜂窝钢梁最佳孔角为 60° ,最佳孔距为孔高的 $18.6\% \sim 26.6\%$ 。

已有研究大多针对蜂窝式钢框架、蜂窝式钢框架梁柱边节点,且加载方式多为梁端加载,无法考虑荷载-位移($P-\Delta$)效应,这与节点的实际受力状况存在差异。为研究蜂窝梁-实腹柱节点的真实受力状态,本文采用柱端加载模拟分析蜂窝梁-实腹柱十字形节点在框架中的受力情况,通过 ABAQUS 有限元软件建立蜂窝梁-实腹柱十字形节点有限元模型,在与已有试验结果对比分析验证有限元模型正确性的基础上,详细研究蜂窝梁的扩高比 K 与开孔位置 L 等因素对蜂窝梁-实腹柱十字形节点受力性能的影响。

1 蜂窝梁-实腹柱节点设计

蜂窝梁-实腹柱节点设计如下:蜂窝梁长 2 m,由原始型号为 HW200 \times 200 \times 8 \times 12 的型钢加工而成,孔洞为正六边形孔;柱高 3.6 m,柱截面型号为 HW300 \times 300 \times 10 \times 15,无孔洞;加劲肋板的尺寸为 $-270\text{ mm}\times 135\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 。节点设计参照《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)^[15]和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[16]中有关构造规定,柱腹板厚度未满足文献^[15],^[16]对节点域柱腹板厚度的要求,故加设补强板,补强板厚度为 10 mm,贴焊于节点域柱腹板两侧,上下两端分别伸出梁翼缘各 150 mm;蜂窝梁孔洞大小及位置参照文献^[9]相关取值。蜂窝梁-实腹柱节点形式及构件尺寸见图 1,其中 H 为蜂窝梁高, d 为孔边长, t 为贴焊钢板

2.2 加载制度与边界约束条件

为真实模拟梁柱节点在钢框架中的实际受力情况,并考虑 $P-\Delta$ 效应,有限元节点采用柱顶水平单调加载的方式。为避免柱端应力集中现象,在柱顶和柱底分别设置参考点并与端面耦合。分别建立 2 个分析步,在 Step-1 中,对柱顶参考点施加竖向荷载 $N=650\text{ kN}$,轴压比为 0.25;在 Step-2 中,对柱顶参考点施加水平位移荷载。有限元模型中,柱顶在平面内为自由端,约束柱顶 X 方向位移和 Y, Z 方向转动以模拟平面外支撑;柱底为铰接,约束柱底 X, Y, Z 三个方向位移和 Y, Z 方向转动;梁端为单链杆连接,约束梁端 X, Z 方向位移和 Y, Z 方向转动;加载方式及边界约束条件见图 4。

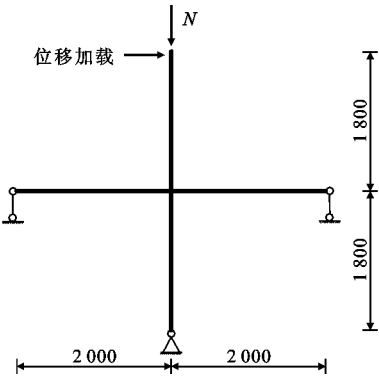


图 4 加载方式及边界约束条件 (单位:mm)
Fig. 4 Loading Method and Boundary Constraint Condition (Unit:mm)

2.3 有限元分析结果验证

为验证本文有限元模型的准确性及适用性,选取文献[8]中具有代表性的蜂窝节点 FWJD-2(梁上第 1 个开孔中心距柱翼缘距离 $L=430\text{ mm}$;柱上第 1 个开孔中心距梁翼缘距离 $e=335\text{ mm}$)、FWJD-3 ($L=130\text{ mm}, e=335\text{ mm}$)进行有限元模型的验证。试件梁截面型号为 $\text{H}150\times100\times6\times8$,孔边长为 58 mm ;柱截面型号为 $\text{H}186\times125\times6\times8$,孔边长为 70 mm 。试验试件构造及尺寸见图 5。有限元验证时材性与试验材性保持一致,试验与有限元分析结果对比见图 6。

由图 6 可知:试验与有限元分析得出的破坏模式基本一致,FWJD-2 梁端应力集中,节点域产生明显剪切变形;FWJD-3 梁上第 1 个孔洞的上下孔角以及所对应的上翼缘屈曲,节点域未出现明显的变形。由 Von Mises 应力云图可以看出,有限元模型中 FWJD-2 破坏时表现为节点域柱腹板屈服;FWJD-3 破坏时表现为应力集中位置出现在梁上第

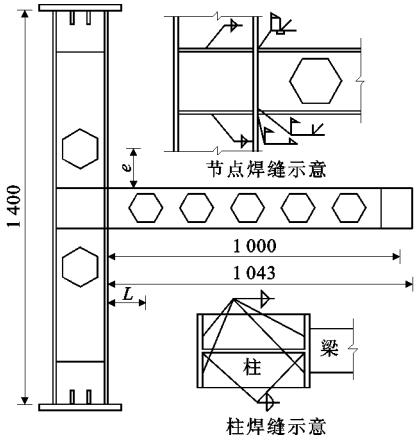


图 5 试件构造及尺寸 (单位:mm)
Fig. 5 Structure and Dimension of Specimen (Unit:mm)

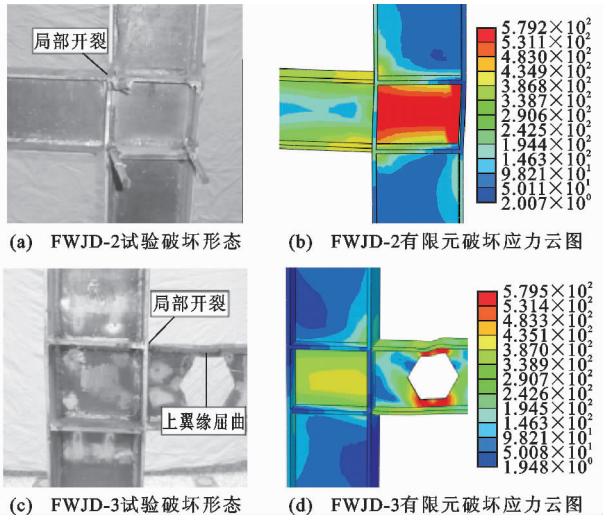


图 6 试验与有限元结果对比 (单位:MPa)
Fig. 6 Comparison Between Experimental and Finite Element Results (Unit:MPa)

1 个孔洞上下孔角处,并形成明显的塑性铰,与试验结果保持一致。

通过试验与有限元分析得到的荷载-位移滞回曲线对比见图 7。由图 7 可知:试验与有限元所得滞回曲线吻合较好,FWJD-2 有限元模拟最大荷载为 55.33 kN ,试验值为 58.76 kN ,最大相对误差为 6% ;FWJD-3 有限元模拟最大荷载为 46.68 kN ,试验值为 49.67 kN ,最大相对误差为 6% 。试验结果和有限元分析结果的节点刚度以及滞回环面积基本一致,表明所建立的有限元分析模型是正确的,具有较高的精度。

3 蜂窝梁-实腹柱节点受力性能分析

3.1 蜂窝梁-实腹柱节点破坏形态和塑性铰位置

对表 1 中不同扩高比所对应模型参数范围进行

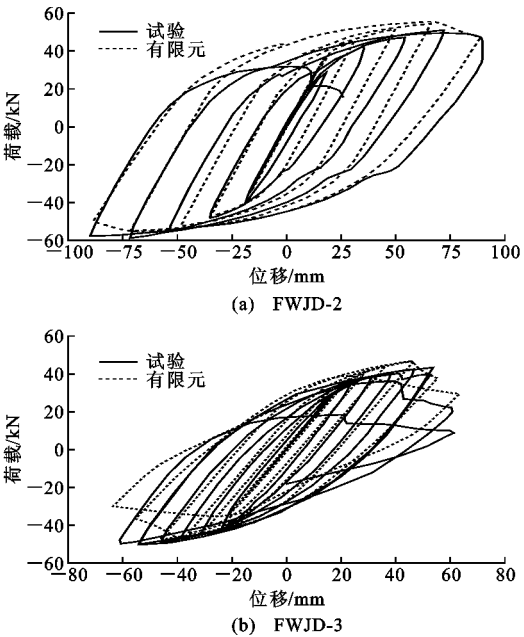


图 7 试验与有限元荷载-位移滞回曲线对比
Fig. 7 Comparisons Between Experimental and Finite Element Load-displacement Hysteresis Curves

有限元分析,研究蜂窝梁-实腹柱节点在柱顶水平单调荷载作用下的最大承载力以及破坏形态。各蜂窝梁-实腹柱节点最大承载力见表 3,其中原型钢梁柱节点(未开蜂窝孔洞)最大承载力为 72.23 kN;图 8 为原型钢梁柱节点和当 $L=300\text{ mm}$ 时,不同扩高比 K 以及当 $K=1.4$ 时,梁上开孔位置不同的蜂窝梁-实腹柱节点破坏模式及 Von Mises 应力云图。

表 3 蜂窝梁-实腹柱节点最大承载力

Tab. 3 Maximum Bearing Capacity of Castellated Beam-solid Column Joints

L/mm	不同 K 时的最大承载力/kN				
	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
200	97.86	100.51	85.56		
300	98.81	103.53	86.62	61.92	40.28
400	98.84	105.07	88.55	62.88	40.34
500	99.13	105.43	90.40	63.76	40.54
600	99.20	105.90	92.63	64.59	40.63
700			95.32	65.56	41.56
800			97.44	66.31	41.92

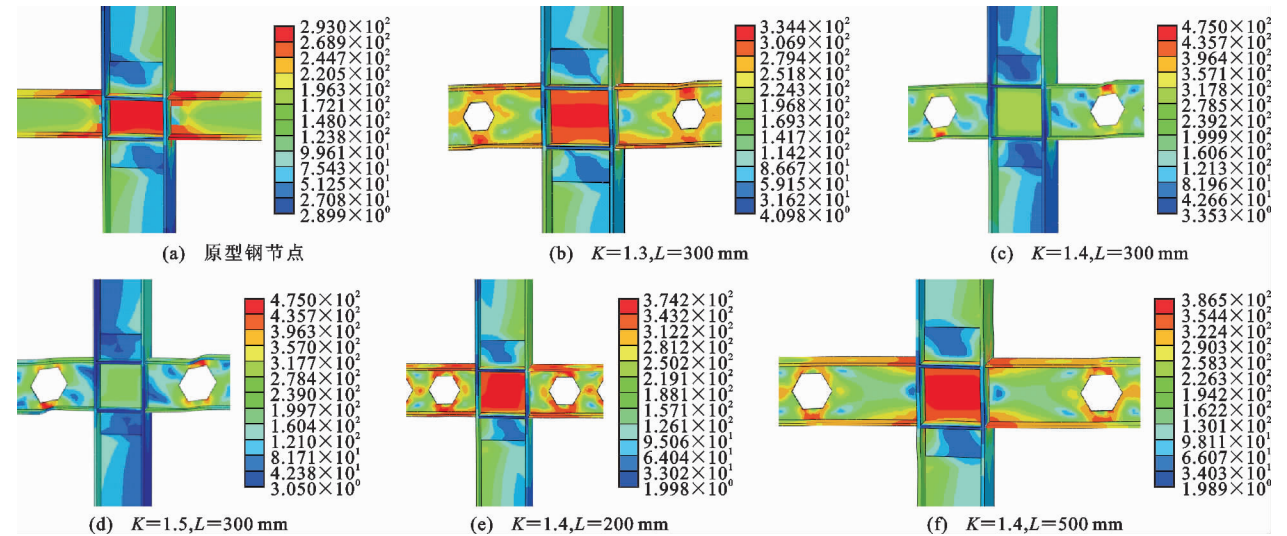


图 8 典型试件破坏模式及应力云图(单位:MPa)

Fig. 8 Failure Modes and Stress Nephograms of Typical Specimens (Unit:MPa)

对比分析图 8 可知:当蜂窝梁的扩高比以及梁上第 1 个孔洞位置不同时,蜂窝梁-实腹柱节点破坏时表现为截然不同的破坏形态;当扩高比较小或孔洞位置距离节点域较远时,节点破坏模式为梁端应力集中,节点域产生明显剪切变形,与原型钢节点破坏模式相似;当扩高比和孔洞位置选择合适时,蜂窝梁-实腹柱节点在水平荷载作用下的破坏位置将出现在第 1 个孔洞附近,使塑性铰由节点域外移,从而具有较好的静力性能以及抗震性能。因此,本文所选的 2 个参数扩高比 K 以及梁上第 1 个孔洞中心

距柱翼缘的距离 L 对此类蜂窝节点的受力性能影响很大,以下结合图 8 分别分析 2 个参数对蜂窝梁-实腹柱节点承载力造成的影响。

3.2 扩高比对蜂窝梁-实腹柱节点承载力和塑性铰位置的影响

图 9 为 $L=300,400,500,600\text{ mm}$ 和不同扩高比时蜂窝梁-实腹柱节点在水平荷载作用下的荷载-位移曲线。由图 9 可知:当梁上第 1 个孔洞中心距柱翼缘的距离 L 不变时,蜂窝梁-实腹柱节点在水平荷载下承载力随扩高比 K 的变化趋势是一致的,即

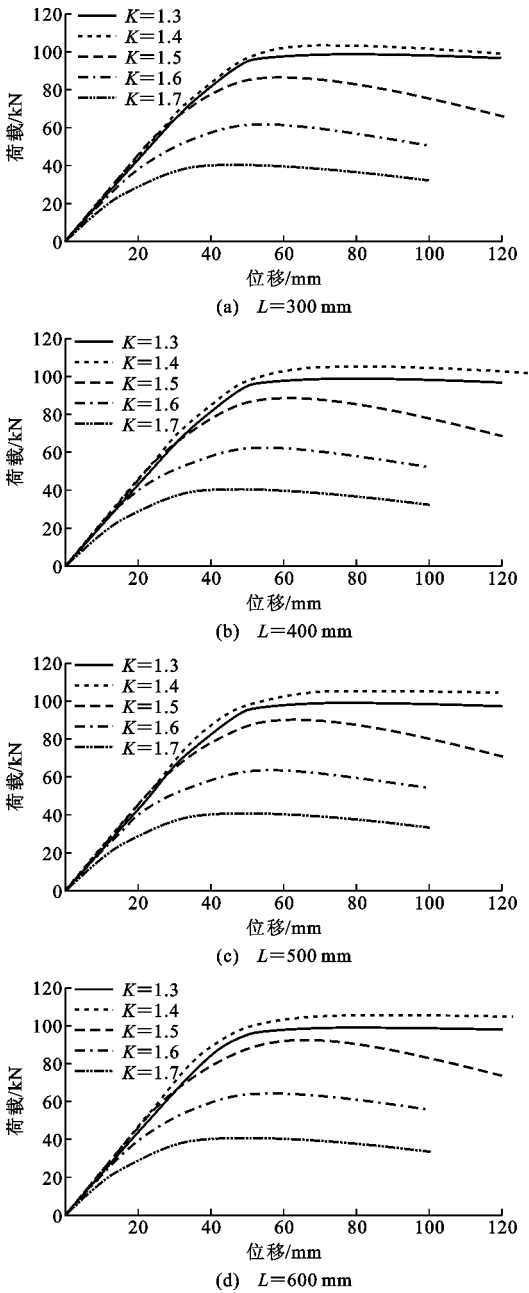


图9 不同扩高比时节点荷载-位移曲线对比
Fig. 9 Comparisons of Load-displacement Curves of Joints with Different Expansion Ratios

随着 K 的增加,承载力先增加后降低,并在 $K=1.4$ 左右时达到峰值。这是由于扩高比较小时,提高梁高对蜂窝梁抗弯承载力的贡献大于开孔对其造成的削弱作用,而扩高比大于 1.5 时,梁上开孔造成的削弱作用过大,使其抗弯承载力大幅降低。当 K 从 1.3 增大至 1.4 时,最大承载力增长 5.7%;当 K 从 1.4 增大至 1.5,从 1.5 增大至 1.6,从 1.6 增大至 1.7,最大承载力分别降低 14.7%,29.3%,36.1%。可见,当 $K=1.3\sim 1.5$ 时,梁上蜂窝孔洞对蜂窝梁-实腹柱节点水平承载力影响较小,其中 $K=1.4$ 为

此类节点最佳扩高比;当 $K>1.5$ 时,节点水平承载力降幅过大,不利于此类节点的应用。

另外,扩高比会对塑性铰出现的位置产生较大影响。由图 8(b)~(d)可知, $L=300\text{ mm}$ 不变,当 $K=1.3$ 时,节点破坏时节点域先屈服,梁端和孔洞区应力均较大,与原型钢梁柱节点破坏模式类似,这是由于蜂窝梁腹板开孔造成的削弱不足以使塑性铰节点域外移,无法满足“强柱弱梁、强节点弱构件”的设计原则;当 $K=1.4,1.5$ 时,蜂窝梁第 1 个孔洞处抗弯承载力小于梁端抗弯承载力,塑性铰远离梁端区域,出现在第 1 个孔洞处,从而避免在节点域破坏。

3.3 开孔位置对蜂窝梁-实腹柱节点承载力和塑性铰位置的影响

图 10 为扩高比 K 分别为 1.4,1.5 时,不同开孔位置的蜂窝梁-实腹柱节点在水平荷载作用下的荷载-位移曲线。由图 10 可知:当扩高比不变时,随着梁上第 1 个孔洞中心距柱翼缘的距离 L 增大,蜂窝梁-实腹柱节点水平承载力先增加后趋于稳定,这是由于孔洞距节点域越远,对节点的影响越小,距离超过一定范围后,对节点域附近削弱作用消失,故节点水平承载力趋于稳定。

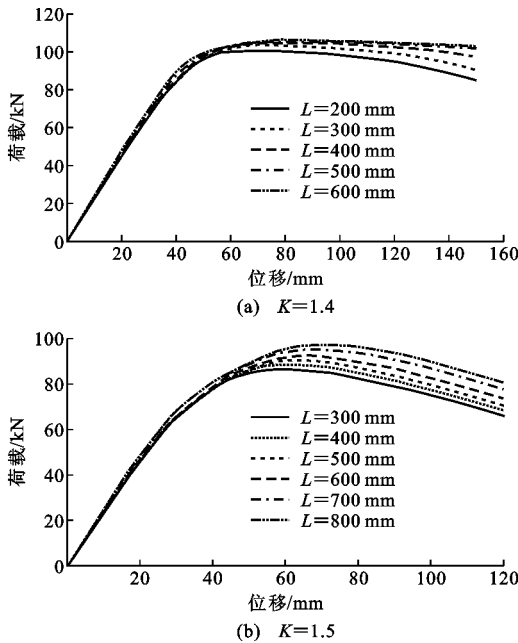


图10 不同开孔位置节点荷载-位移曲线对比
Fig. 10 Comparisons of Load-displacement Curves of Joints with Different Locations of Holes

开孔位置也会对塑性铰出现位置造成影响。由图 8(c),(e),(f)可知:扩高比 $K=1.4$ 不变,当 $L=200\text{ mm}$ 时,开孔位置与节点域较近,塑性铰在孔洞

附近形成后迅速向节点域发展,故开孔对塑性铰外移的影响不够明显;当 $L=300\text{ mm}$ 时,塑性铰出现在梁上第 1 个孔洞中心;当 $L=500\text{ mm}$ 时,开孔位置距节点域距离较远,节点域先于孔洞处出现塑性铰,塑性铰外移影响同样不明显。

3.4 蜂窝梁-实腹柱节点的扩高比和开孔位置建议取值

综合考虑扩高比和开孔位置对蜂窝式梁柱节点塑性铰产生位置的影响,表 4 为同时考虑 2 组参数情况下,各蜂窝梁-实腹柱节点塑性铰出现位置距柱翼缘的距离。定义塑性铰出现在节点域时,距柱翼缘距离为 0;塑性铰出现在孔洞附近时,距柱翼缘距离为 L 。由表 4 可知:当扩高比 $K=1.3$ 时,梁上开孔对塑性铰出现位置影响较小;当 $K=1.4$ 且开孔位置合理时,梁上塑性铰将外移至开孔处;当 $K>1.4$ 时,孔洞较大,均可控制塑性铰出现在孔洞处。综合考虑图 9 所示不同扩高比的蜂窝梁-实腹柱节点在水平荷载作用下的荷载-位移曲线,当 $K>1.5$ 时,节点水平承载力降幅过大,不利于此类节点的应用。综上所述,蜂窝梁-实腹柱节点扩高比 K 建议取值为 $1.4\sim1.5$ 。

表 4 塑性铰出现位置距柱翼缘距离					
Tab. 4 Distances from Plastic Hinges to Flange of Column					
L/mm	不同 K 时塑性铰出现位置距柱翼缘距离/ mm				
	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
200	0	0			
300	0	300	300	300	300
400	0	400	400	400	400
500	0	500	500	500	500
600	0	0	600	600	600
700			700	700	700
800			800	800	800

对于开孔位置,为综合考虑原型钢尺寸所带来的影响,定义参数 α_h 为

$$\alpha_h=L/h \tag{1}$$

式中: h 取为 200 mm 。

根据表 4 结果得出 α_h 建议取值,见表 5:当 $K=1.4$ 时, α_h 建议取值为 $1.5\sim2.5$;当 $K=1.5$ 时, α_h 建议取值为 $1.5\sim4.0$ 。

4 蜂窝梁-实腹柱节点抗震性能分析

4.1 滞回曲线与骨架曲线

为分析上述建议取值范围内蜂窝梁-实腹柱节点的抗震性能,对 $K=1.4,L=400\text{ mm}$ 的蜂窝梁-实腹柱节点(JD-1),与 $K=1.4$ 蜂窝梁等高的实腹

表 5 α_{h} 建议取值									
Tab. 5 Proposed Values of α_{h}									
K	1.4			1.5					
L/mm	300	400	500	300	400	500	600	700	800
α_{h}	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

式梁柱节点(JD-2),以及原型钢梁柱节点(JD-3)进行低周反复荷载作用下的抗震性能对比分析。加载制度如下:采用位移控制加载,构件屈服前每级增幅为 $0.25\Delta_y$ (Δ_y 为屈服位移),构件屈服后每级增幅为 Δ_y ,每级循环 1 圈,当荷载下降到峰值荷载的 85% 时停止加载。屈服位移 Δ_y 采用通用屈服弯矩法确定^[20]。图 11 为 3 种节点柱顶的 $P-\Delta$ 滞回曲线和骨架曲线。由图 11(a)可知:蜂窝梁-实腹柱节点 JD-1 与梁上未开孔的实腹式梁柱节点 JD-2 在低周反复荷载作用下的 $P-\Delta$ 滞回曲线均非常饱满,具有良好的耗能能力,说明在参数设置合理的情况下,蜂窝梁-实腹柱节点的抗震性能并未因开蜂窝孔洞而削弱;蜂窝梁-实腹柱节点和实腹式梁柱节点因梁高增大,其最大承载力以及滞回环面积均显著大于原型钢梁柱节点 JD-3。

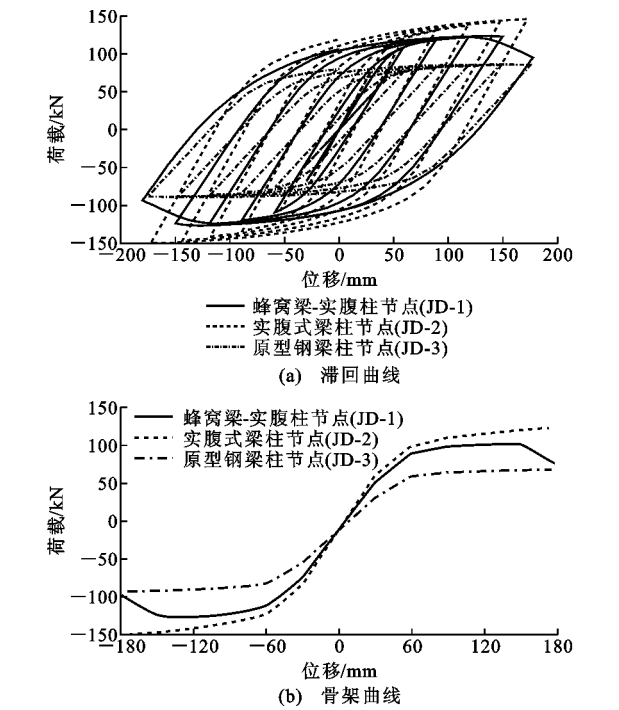


图 11 $P-\Delta$ 滞回曲线与骨架曲线对比分析
Fig. 11 Comparisons of $P-\Delta$ Hysteresis Curves and Skeleton Curves

由图 11(b)可知:加载初期,蜂窝梁-实腹柱节点与实腹式梁柱节点初始刚度相近,且均高于原型钢梁柱节点;加载中后期,蜂窝梁-实腹柱节点梁上开孔处屈服,刚度下降显著,蜂窝梁-实腹柱节点与

实腹式梁柱节点骨架曲线峰值点均大于原型钢梁柱节点,具有较高的承载力。

4.2 节点延性分析

采用延性系数 μ 来衡量梁柱节点的延性,延性系数为节点极限位移与屈服位移之比。节点 JD-1, JD-2, JD-3 的延性系数见表 6。由表 6 可知:蜂窝梁-实腹柱节点的延性系数低于实腹式梁柱节点,与原型钢梁柱节点相差不大,表明梁上孔洞对节点延性削弱较小,蜂窝梁-实腹柱节点具有良好的延性。

表 6 节点延性系数与等效黏滞阻尼系数

Tab. 6 Ductility Coefficients and Equivalent Viscous Damping Coefficients of Joints

节点	JD-1	JD-2	JD-3
延性系数 μ	3.45	4.55	3.70
等效黏滞阻尼系数 h_e	0.51	0.36	0.40

4.3 节点耗能能力

采用等效黏滞阻尼系数 h_e 来衡量节点的耗能能力^[21],等效黏滞阻尼系数计算示意图如图 12 所示,其值按下式计算

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{FBEDF}}{S_{\triangle AOB} + S_{\triangle COD}} \tag{2}$$

式中: S_{FBEDF} 为曲线 $FBEDF$ 围成的面积; $S_{\triangle AOB}$, $S_{\triangle COD}$ 分别为 $\triangle AOB$, $\triangle COD$ 的面积。

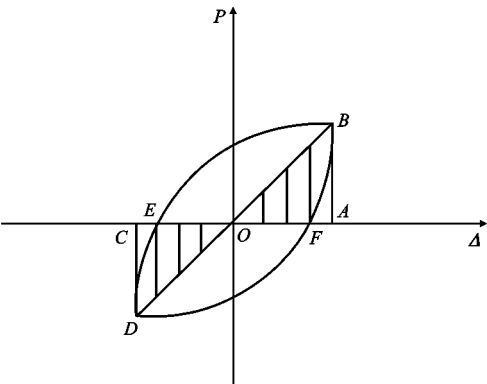


图 12 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig. 12 Calculation Schematic of Equivalent Viscous Damping Coefficient

Damping Coefficient

节点 JD-1, JD-2, JD-3 的等效黏滞阻尼系数见表 6。由表 6 可知:蜂窝梁-实腹柱节点的等效黏滞阻尼系数较实腹式梁柱节点和原型钢梁柱节点分别提高 41.7% 和 27.5%,表明蜂窝梁-实腹柱节点具有良好的耗能能力与抗震性能。

5 结 语

(1)蜂窝梁-实腹柱十字形节点由于扩高,其抗弯刚度和抗弯承载力较原型钢梁柱节点均有较大幅

度的提高,且可以利用梁上开孔的削弱作用,使塑性铰由节点域向第 1 个孔洞处转移,避免在节点域破坏,满足“强节点弱构件”的抗震设计要求。

(2)扩高比 K 和梁上第 1 个孔洞中心距柱翼缘的距离 L 是影响蜂窝梁-实腹柱十字形节点受力性能及塑性铰位置的重要参数。当 $K=1.3\sim1.5$ 时,梁上蜂窝孔洞对节点水平承载力削减作用较小,其中 $K=1.4$ 为最佳扩高比;当 $K>1.5$ 时,节点水平承载力降幅过大,不利于此类节点的应用。

(3)综合考虑扩高比和开孔位置 2 组参数的影响,定义参数 $\alpha_h=L/h$,本文建议参数取值范围如下: K 建议取值为 1.4~1.5;当 K 取 1.4 时, α_h 建议取值为 1.5~2.5,当 K 取 1.5 时, α_h 建议取值为 1.5~4.0。在此参数范围内,蜂窝梁-实腹柱十字形节点滞回曲线饱满,延性与耗能能力良好,具有良好的抗震性能。

参考文献:

References:

[1] 罗烈,罗晓霖.蜂窝梁设计规范的比较研究[J].建筑钢结构进展,2005,7(2):43-47.
LUO Lie, LUO Xiao-lin. Comparative Research of the Design Specifications for Castellated Beam[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(2): 43-47.

[2] 苏益声.圆形孔与多边形孔蜂窝钢梁的试验分析[J].广西大学学报:自然科学版,2003,28(1):5-9.
SU Yi-sheng. The Experiment and Analysis of the Circular and Polygon Holes' Honeycombed Steel Beams[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2003, 28(1): 5-9.

[3] 吴迪,武岳.圆孔蜂窝梁的力学性能[J].建筑科学与工程学报,2007,24(1):47-51.
WU Di, WU Yue. Mechanical Properties of Circular Hole Castellated Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 47-51.

[4] 陈绍蕃.钢结构设计原理[M].4版.北京:科学出版社,2016.
CHEN Shao-fan. Principles of Steel Structure Design [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2016.

[5] ZAAROUR W, REDWOOD R. Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(8): 860-866.

[6] 周朝阳,周云峰.蜂窝梁等效抗弯刚度的确定方法[J].建筑科学与工程学报,2008,25(1):102-106, 115.
ZHOU Chao-yang, ZHOU Yun-feng. Confirm Method of Equivalent Bending Rigidity of Castellated Beams

- [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1): 102-106, 115.
- [7] 张艳霞, 李云鹏, 张万慧, 等. 蜂窝钢梁和腹板开孔钢梁框架梁柱节点抗震性能有限元分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(增1): 713-715.
- ZHANG Yan-xia, LI Yun-peng, ZHANG Wan-hui, et al. Finite Element Analysis of Seismic Behavior on Cellular Beam and Fabricated Perforated Beams to Column Connection[J]. Building Structure, 2012, 42(S1): 713-715.
- [8] 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.
- [9] 贾连光, 齐政, 张曰果. 蜂窝式钢框架结构梁端塑性铰位置影响因素分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(2): 95-100.
- JIA Lian-guang, QI Zheng, ZHANG Yue-guo. Analysis of Influence Factors on the Plastic Hinge Position at the End of the Cellular Steel Frame Structures[J]. Building Structure, 2013, 43(2): 95-100.
- [10] 张德刚, 俞家欢, 汲野, 等. 狗骨-蜂窝式梁柱节点在低周反复荷载作用下有限元分析[J]. 钢结构, 2014, 29(10): 23-26, 22.
- ZHANG De-gang, YU Jia-huan, JI Ye, et al. Finite Element Analysis of the Dog Bone-cellular Beam Column Joints Under Low Cyclic Loading[J]. Steel Construction, 2014, 29(10): 23-26, 22.
- [11] 王培军, 王旭东, 马宁. 圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲承载力研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 145-152.
- WANG Pei-jun, WANG Xu-dong, MA Ning. Web-post Buckling of Castellated Steel Beam with Fillet Corner Web Openings[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4): 145-152.
- [12] WANG P J, GUO K R, LIU M, et al. Shear Buckling Strengths of Web-posts in a Castellated Steel Beam with Hexagonal Web Openings[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 173-184.
- [13] 李明, 张沛楠, 王元清, 等. 钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点弯矩-转角骨架曲线影响因素[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2017, 33(1): 50-59.
- LI Ming, ZHANG Pei-nan, WANG Yuan-qing, et al. Influencing Factors on CFCST-SCBIJ Moment-curvature Skeleton Curves[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2017, 33(1): 50-59.
- [14] BUDI L, SUKAMTA, PARTONO W. Optimization Analysis of Size and Distance of Hexagonal Hole in Castellated Steel Beams[J]. Procedia Engineering, 2017, 171: 1092-1099.
- [15] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures[S].
- [16] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [17] 王瑞锋, 贾连光, 吴良. 蜂窝式钢框架梁柱节点性能分析[J]. 钢结构, 2010, 25(增): 331-338.
- WANG Rui-feng, JIA Lian-guang, WU Liang. Analysis on Performance of the Beam-column Node of Cellular Steel Frame[J]. Steel Construction, 2010, 25(S): 331-338.
- [18] 卢林枫, 徐莹璐, 周天华, 等. H形梁-工形柱弱轴箱形节点域连接节点单调加载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(2): 73-80.
- LU Lin-feng, XU Ying-lu, ZHOU Tian-hua, et al. Experimental Research on Box Strengthened Joint Connection for Weak Axis of I-section Column-H-shaped Beam Under Monotonic Loading[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(2): 73-80.
- [19] 贾连光, 孙宏达, 王春刚. 蜂窝式钢框架结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 147-153.
- JIA Lian-guang, SUN Hong-da, WANG Chun-gang. Experimental Research on Seismic Behavior of Cellular Steel Frame[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 147-153.
- [20] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- ZHU Bo-long. Earthquake-resistance Test of Structures[M]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [21] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- TANG Jiu-ru. Aseismic of Reinforced Concrete Frame Joints[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.