

# 蜂窝梁柱子结构抗连续性倒塌性能研究

贾连光<sup>1</sup>,李鹏宇<sup>1</sup>,刘洋<sup>2</sup>,王春刚<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳城市建设学院土木工程学院, 辽宁 沈阳 110167)

**摘要** 目的 研究蜂窝梁柱子结构的抗连续性倒塌性能,为工程应用提供设计依据。  
**方法** 基于拆除构件法,应用 ABAQUS 有限元分析软件建立蜂窝梁柱子结构与实腹梁柱子结构模拟模型,研究中柱失效作用下的结构性能,分析孔型、开孔率和首孔距离等参数对蜂窝梁柱子结构抗连续性倒塌性能的影响。  
**结果** 蜂窝梁柱子结构相比于实腹梁柱子结构的峰值承载力增长 64.26%,所对应的位移增长 73.57%;蜂窝梁良好的成铰机制使悬链线效应发展更充分;孔型、开孔率、首孔距离对其破坏模式、峰值荷载、悬链线效应发展程度均具有一定影响。  
**结论** 蜂窝梁柱子结构具有良好的抗连续性倒塌能力,孔型宜为圆形或六边形,开孔率宜取 40%~60%,首孔距离宜取 0.75~1.0 倍梁截面高度。

**关键词** 蜂窝梁柱子结构;抗力机制;塑性铰;悬链线效应;连续倒塌

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

**引用格式:**贾连光,李鹏宇,刘洋,等.蜂窝梁柱子结构抗连续性倒塌性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):608-616.(JIA Lianguang,LI Pengyu,LIU Yang,et al.Study on progressive collapse resistance of castellated beam-column substructure[J].Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(4):608-616.)

## Study on Progressive Collapse Resistance of Castellated Beam-Column Substructure

JIA Lianguang<sup>1</sup>,LI Pengyu<sup>1</sup>,LIU Yang<sup>2</sup>,WANG Chungang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** In order to study the progress collapse resistance of castellated beam-column substructure and provide design basis for engineering application, the finite element analysis software ABAQUS was used to carry out static loading on the castellated beam-column substructure and the solid beam-column substructure based on the alternate path method. The progress collapse resistance of the castellated beam-column substructure under the column loss and the influence of different parameters on the progress collapse resistance of the castellated beam-column substructure were

收稿日期:2023-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422)

作者简介:贾连光(1961—),男,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构、组合结构和抗震防灾等方面研究。

studied. The peak load of castellated beam-column substructure increases by 64.26% and the corresponding displacement increases by 73.57% compared with that of solid beam-column substructure. The catenary effect develops more fully. The failure mode, peak load and catenary effect are affected by the opening type, opening rate and first hole distance. Castellated beam-column substructure has good progress collapse resistance ability. In order to ensure its good progress collapse resistance performance, circular hole and hexagonal hole should be selected as the opening type, the opening rate should be 40% – 60% ,and the first hole distance should be 0.75 – 1.0 times the beam section height.

**Key words:** castellated beam-column substructure; plastic hinge; load resisting mechanism; progressive collapse; catenary effect

2001 年美国纽约世界贸易大厦被飞机撞击,2020 年福建某钢结构酒店发生倒塌,这些钢结构建筑倒塌事故使钢结构的抗连续性倒塌性能得到了工程界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。连续性倒塌是指结构的承重构件在偶然荷载作用下变形、破坏,破坏从构件局部开始扩展,最终导致结构部分或整体失效,发生倒塌<sup>[4-6]</sup>。拆除构件法是一种研究结构连续性倒塌性能被广泛采用的分析方法,即分析拆除部分承重构件后的剩余结构能否形成新的传力路径,将破坏限制在允许的范围内,使之建立一个新的平衡,阻止结构发生连续性倒塌<sup>[7-9]</sup>。高山等<sup>[10]</sup>对中柱失效后的钢框架结构进行了静力试验研究,结果表明,在梁机制与悬链线机制的共同工作下剩余结构内力进行了重分布,提高了结构的抗连续倒塌能力。L. Li 等<sup>[11]</sup>通过对焊接梁柱节点进行中柱加载试验,结果表明焊接梁柱节点易在焊缝处发生断裂,导致梁不能充分发挥悬链线作用。王伟等<sup>[12-13]</sup>对钢管混凝土柱-H 型梁柱子结构进行中柱失效下的静力加载试验,结果表明,当连接处梁端发生破坏时,结构无法充分发挥悬链线作用。

蜂窝梁因具有自重轻、便于管线穿越及外形美观等特点而应用广泛<sup>[14-17]</sup>。蜂窝梁钢结构的设计寿命愈长,遭受偶然荷载的可能性越高。因此,笔者基于拆除构件法构建双半跨蜂窝梁柱子结构的有限元模型,研究在中柱失效下的破坏模式、承载机制、变形能

力及抗力机制,分析孔型、开孔率、首孔距离等对蜂窝梁柱子结构的抗连续性倒塌性能的影响,并给出相应的设计建议。

1 有限元模型

1.1 梁柱子结构

中间承重柱失效后,在竖向荷载作用下失效跨的框架梁会发生反对称双曲变形,梁的反弯点出现在跨中,取节点双半跨子结构作为梁柱子结构,即由中柱节点及两侧半跨梁组成,此时梁端可以自由转动,剩余结构为梁端提供较强的约束,梁端不发生竖向位移与水平位移,故梁端约束可简化为固定铰支约束,如图 1 所示。

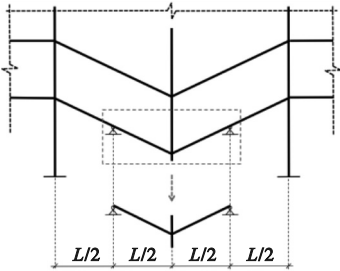


图 1 梁柱子结构选取

Fig. 1 Selection of beam-column substructure

1.2 有限元模型建立

采用文献<sup>[18]</sup>中的实腹梁柱子结构在中柱失效下的静力加载试验建立模拟模型。试件编号为 BASE, H 型钢柱的截面为 250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm,柱高 324 mm; H 型钢梁规格为 200 mm × 100 mm × 5.5 mm × 8 mm,梁长 1 385 mm。

基于 ABAQUS/Explicit 模块的动力显示算法,根据试件实际尺寸建立考虑材料断裂的梁柱子结构有限元模型,梁柱均采用 C3D8R 实体单元。网格设置:柱为 25 mm,梁为 15 mm,靠近节点部分梁截面的网格加密至 5 mm,有限元模型如图 2 所示。通过限制耦合点(RP1,RP2)转角与位移实现梁两端铰接,柱翼缘限制平面外位移的发生。模型中

钢材本构关系采用双折线模型,弹性模量为  $2.05 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 270 MPa。采用 ABAQUS 中金属延性损伤模型来模拟钢材断裂,断裂指标取 0.33<sup>[18]</sup>。梁柱连接方式采用绑定约束(Tie)。加载方式与试验相同,即在柱顶施加集中荷载。

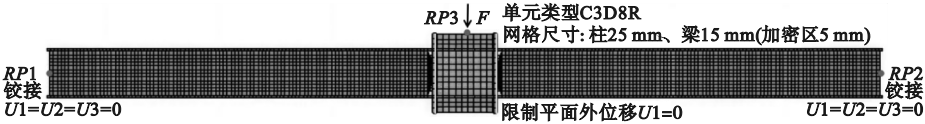


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.3 有限元模型验证

图 3 和图 4 分别为笔者通过有限元模拟得到的破坏模式和荷载 - 位移曲线与文献[18]的试验结果对比。可以看出,二者破坏模式相似,均为梁端翼缘与腹板发生撕裂破坏。有限元计算结果与试验结果相近,荷载 - 位移曲线变化趋势整体一致,吻合较好,峰值荷载相差在 5% 内,表明该有限元建模方法具有良好精度。

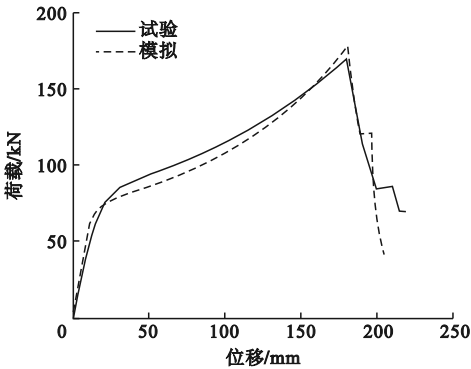


图 4 荷载 - 位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves

2 蜂窝梁柱子结构性能分析

2.1 试件设计

分别用蜂窝梁和实腹梁设计两个梁柱子结构试件,研究蜂窝梁柱子结构的抗连续性倒塌性能。依照文献[19]中的试件来设计梁柱子结构模拟试件,如图 5 所示。实腹梁柱子结构试件编号为 SF,蜂窝梁柱子结构试件编号为 H60-100,60 表示腹板开孔率  $D/h$  为 60%,100 表示首孔距离为距梁端 250 mm ( $1.0 h$ )。钢材牌号均为 Q355,材料强度均取标准值,梁柱连接采用焊接方式。

2.2 破坏模式与承载力分析

试件 H60-100 与 SF 的失效柱柱顶荷载 - 位移曲线与破坏模式如图 6 所示。加载

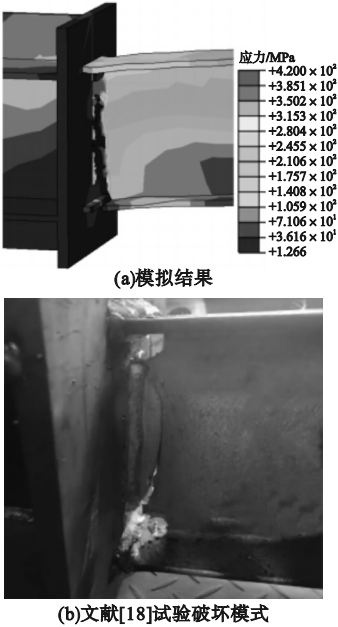


图 3 破坏模式对比

Fig. 3 The failure mode comparison

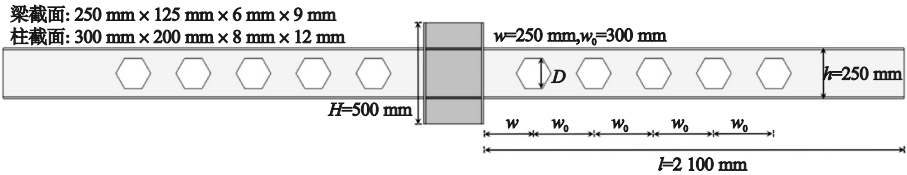


图5 试件尺寸

Fig. 5 Specimen size

前期,试件 H60-100 的失效柱位移与荷载保持线性状态。当位移达到 28.02 mm 时,蜂窝梁首孔孔角处屈服,此后荷载 - 位移曲线进入非线性发展阶段,随位移增加,腹板首孔周塑性区面积逐渐增大,且首孔上翼缘发生塑性变形。当位移达到 182.35 mm 时,蜂窝梁首孔处形成塑性铰,此时柱顶荷载为 199.40 kN。随位移再增加,试件内力发生重分布,蜂窝梁首孔下翼缘由受弯转为受拉,因此荷载继续呈上升趋势。当位移达到 396.13 mm 时,荷载达到峰值 483.30 kN,梁首孔下边中间处腹板产生裂缝,裂缝随位移增加不断发展,荷载下降到 217.11 kN。位移达到 399.77 mm 时,梁下翼及腹板完全开裂,退出工作,转为蜂窝梁上半截面独自受力;柱顶荷载二次发展,当位移达到

437.89 mm 时,梁首孔上边中间处腹板开始撕裂,荷载再次下降;当位移达到 482.03 mm 时,蜂窝梁首孔截面完全断裂,试件 H60-100 完全破坏。

当试件 SF 的位移达到 32.09 mm 时,下翼缘屈服,此后荷载 - 位移曲线进入非线性发展阶段。随位移增加,实腹梁柱子结构逐渐出现较大的受拉变形,直到位移达到 228.22 mm 时,试件荷载达到峰值,右侧钢梁下翼缘发生撕裂,此时荷载由 294.22 kN 下降到 185.51 kN;随位移增加,实腹梁柱子结构中左侧钢梁承受更大拉力,荷载二次增加,当位移达到 336.95 mm 时,左侧钢梁下翼缘也发生撕裂,位移增加到 411.81 mm 时,试件 SF 的右侧钢梁梁端截面完全断裂,试件 SF 完全破坏。

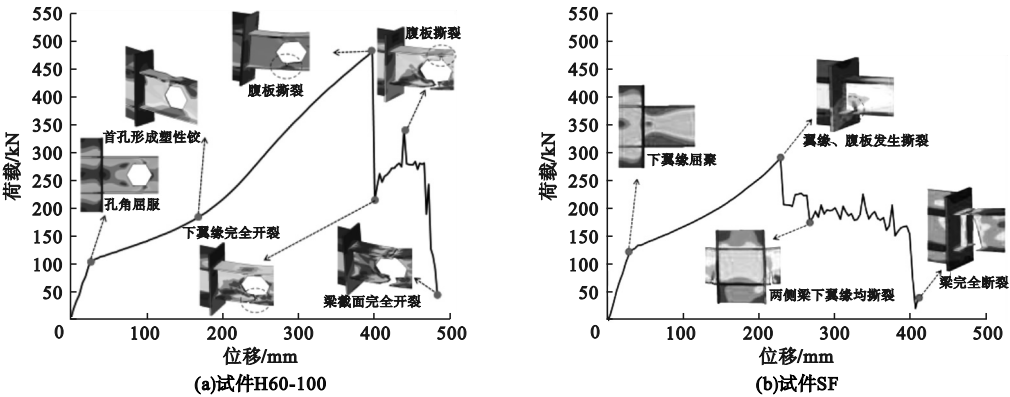


图6 荷载 - 位移曲线及破坏形态

Fig. 6 Load-displacement curves and failure patterns

荷载 - 位移曲线主要特征点的数据见表 1。试件 H60-100 的初始刚度相比试件 SF 下降 4.46%,弹性荷载下降 16.47%。说明在弹性阶段,腹板开孔对试件的抗弯承载力有一定影响。在试件发生初始断裂时,试件

H60-100 的峰值荷载相比于试件 SF 增长了 64.26%,所对应的位移增加了 73.57%,表明试件 H60-100 相比试件 SF 可充分发挥梁的悬链线作用,具有良好的抗连续性倒塌性能。



表1 荷载-位移曲线特征点数据

Table 1 Key point data of load-displacement curves

试件名称	$f_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$f_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$K_0/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$
H60-100	108.20	28.02	483.30	396.13	3.86
SF	129.53	32.09	294.22	228.22	4.04

注: $f_y$ 、 $\Delta_y$  分别为弹性荷载与对应的位移; $f_u$ 、 $\Delta_u$  分别为峰值荷载与对应的位移; $K_0$  为初始刚度。

2.3 竖向变形分析

试件 H60-100 与 SF 在不同加载位移时梁的变形过程如图 7、图 8 所示。两试件加载前期(如位移 50 mm 时)均呈现明显的受弯特征,随着位移的增加,梁的变形轮廓逐渐转为直线,这说明试件 H60-100 与 SF 在中柱失效后,梁的受力变化为由受弯转向受拉,即由梁机制向悬链线机制转化。

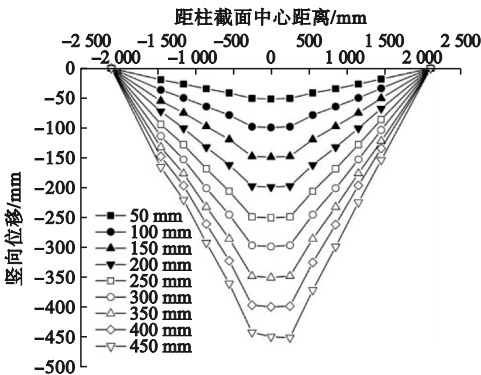


图7 H60-100 变形发展过程

Fig. 7 Deflection development of H60-100

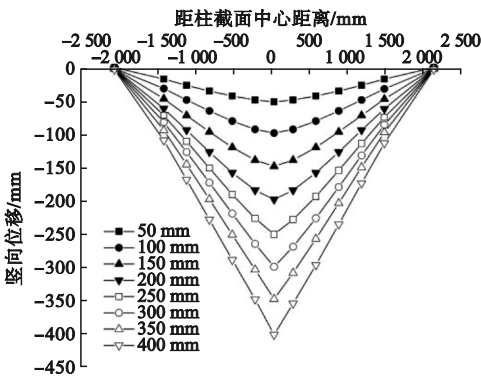


图8 SF 变形发展过程

Fig. 8 Deflection development of SF

试件 H60-100 由于腹板开孔,在距柱 250 mm 处(梁首孔)形成塑性铰,而 SF 的塑

性铰出现在梁端,故蜂窝梁可有效使塑性铰位置外移,提高其变形能力。此外,试件 H60-100 在位移超过 399.77 mm 时与试件 SF 在位移超过 228.22 mm 时,即两试件梁端一侧抗拉翼缘发生断裂后,导致断裂侧位移略大于未断裂侧,呈现明显的非对称性。

2.4 抗力机制分析

梁柱子结构的抗力计算简化模型如图 9 所示。承重柱失效后,荷载通过内力重分配的方式在剩余结构中寻找可替代传力路径,在此过程中,梁柱子结构竖向抗力  $F$  主要由梁机制与悬链线机制构成。梁截面的抗弯作用通过剪力的竖向分量实现,通过轴力的竖向分量提供,抗力可按下式计算<sup>[20]</sup>:

$$F = F_V + F_N.$$

$$F_V = 2V\cos\theta.$$

$$F_N = 2N\sin\theta.$$

$$\theta = \Delta/l.$$

式中: $F_V$ 、 $F_N$  分别为梁机制抗力与悬链线机制抗力; $\theta$  为梁端转角; $V$  为剪力; $N$  为轴力; $\Delta$  为失效柱位移; $l$  为梁的塑性铰位置至梁端的水平距离。

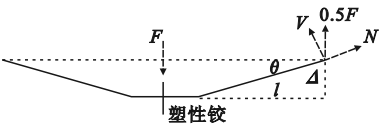


图9 抗力计算简图

Fig. 9 Resistance calculation diagram

两个试件的抗力机制发展过程及其对竖向抗力的贡献比例如图 10 ~ 12 所示。弹性阶段,试件 H60-100 与 SF 的竖向抗力基本由梁机制提供,贡献比分别为 98.02% 与 98.42%。随着位移增加,进入到过渡阶段,梁机制竖向抗力贡献比逐渐下降,悬链线机制抗力贡献比持续增加。当试件 SF 位移达到 194.87 mm 时,悬链线机制抗力贡献比超过梁机制,试件进入悬链线效应阶段;当位移达到 228.22 mm 时,梁截面发生断裂,试件进入破坏阶段,此时悬链线机制抗力贡献比为 69.67%,悬链线效应发展不充分。当试

件 H60-100 位移达到 182.35 mm 时,悬链线机制抗力贡献比超过梁机制抗力,悬链线机制成为蜂窝梁柱子结构竖向抗力的主要来源,相比试件 SF 提前进入悬链线机制阶段。当位移达到 399.77 mm 时,试件达到峰值荷载,首孔下翼缘及腹板发生断裂,此时进入破坏阶段,悬链线机制抗力不仅提供整个结构的竖向抗力,还要抵消由于截面下翼缘断裂导致梁机制所产生的反向抗力,此时悬链线机制抗力对竖向抗力的贡献比例为 101.98%。综上,试件 H60-100 在弹性阶段由于腹板开孔导致梁的抗弯刚度下降,使其总抗力略小于 SF,但蜂窝梁良好的成铰机制可以在前期有效地将塑性铰外移,后期蜂窝梁的悬链线效应充分发展,有利于提高蜂窝梁柱子结构的抗连续性倒塌性能。

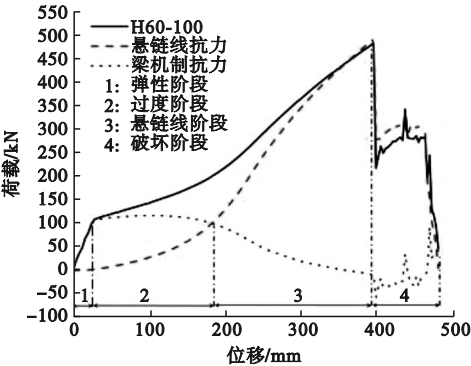


图 10 H60-100 抗力机制转化

Fig. 10 Resistance mechanism transformation of H60-100

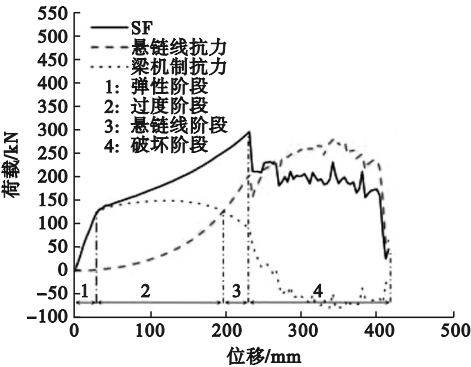


图 11 SF 抗力机制转化

Fig. 11 Resistance mechanism transformation of SF

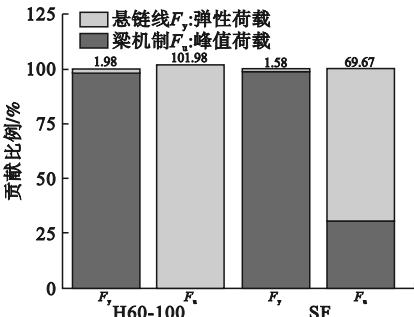


图 12 抗力机制贡献比例

Fig. 12 Contribution ratio of resistance mechanism

3 参数化分析

孔型、开孔率、首孔距离等参数对蜂窝梁的力学性能影响很大,因此有必要明确其对蜂窝梁柱子结构抗连续性倒塌性能的影响。以试件 H60-100 为参照设计了 11 个对比试件,试件参数及有限元计算结果见表 2。图 13 为不同参数试件的荷载 - 位移曲线。

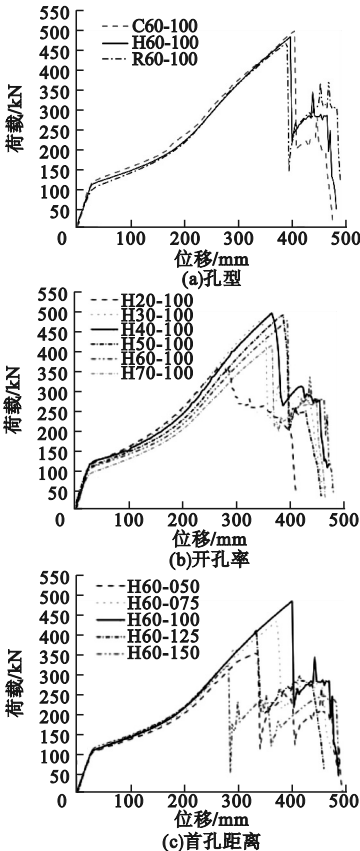


图 13 荷载 - 位移曲线对比

Fig. 13 Comparison of load-displacement curves

表 2 试件设计参数与有限元计算结果

Table 2 The parameters of specimen and finite element calculation results								
试件编号	孔型	开孔率/%	首孔距离/ mm	弹性荷 载/kN	梁机制抗力 贡献比例/%	峰值荷 载/kN	悬链线机制抗 力贡献比例/%	破坏模式
H60-100	六边形	60	250	108.20	98.02	483.30	101.98	首孔破坏
C60-100	圆形	60	250	111.28	97.66	500.22	102.21	首孔破坏
R60-100	矩形	60	250	96.20	98.79	467.80	98.77	首孔破坏
H20-100	六边形	20	250	118.04	97.59	379.49	84.02	梁端破坏
H30-100	六边形	30	250	115.70	97.34	458.11	99.80	首孔破坏
H40-100	六边形	40	250	113.53	98.36	502.02	100.35	首孔破坏
H50-100	六边形	50	250	112.73	98.41	499.45	100.42	首孔破坏
H70-100	六边形	70	250	87.44	99.19	421.31	100.81	首孔破坏
H60-050	六边形	60	125	97.84	98.22	354.08	100.43	首孔破坏
H60-075	六边形	60	187.5	104.41	98.05	433.15	100.51	首孔破坏
H60-125	六边形	60	312.5	109.17	98.32	411.39	96.22	首孔破坏
H60-150	六边形	60	375	110.21	98.45	325.01	68.17	梁端破坏

3.1 孔 型

从表 2 可以看出,在开孔率与首孔距离相同时,不同孔型蜂窝梁柱子结构的破坏模式均为首孔形成塑性铰后受拉破坏。

由图 13(a)和表 2 可知,C60-100 的弹性荷载相比于 H60-100 和 R60-100 分别提高 2.76%、15.68%,此时梁机制为抗力的主要来源;峰值荷载分别提高 3.50%、6.93%,C60-100 与 H60-100 的悬链线抗力贡献比分别为 102.21%、101.98%,而 R60-100 为 98.77%,相比其他两个试件,未能充分发挥悬链线效应。在开孔率相同时,矩形孔比圆形孔、六边形孔对腹板削弱的面积要大,故其承载力下降幅度更大;同时由于矩形孔的孔角易产生应力集中,在悬链线效应阶段首孔孔角处更易发生受拉破坏,影响结构悬链线效应的充分发展。因此,圆形孔与六边形孔的蜂窝梁柱子结构具有良好的抗连续性倒塌性能。

3.2 开孔率

由表 2 可知,不同开孔率的蜂窝梁柱子结构呈现出两种破坏模式。试件 H30-100 到 H70-100 均为首孔形成塑性铰后受拉破坏,

试件 H20-100 为梁端受拉破坏。腹板开孔率较小时,首孔不具有足够的迁移孔间应力的能力,故在加载前期无法在首孔处形成塑性铰,导致试件在梁端发破坏。

由图 13(b)和表 2 可知,在弹性阶段,随开孔率增加,弹性荷载逐渐减小,开孔率每增加 10%,弹性荷载分别下降 1.98%、3.90%、4.68%、8.73%、28.28%。梁机制抗力贡献比随开孔率的增加而增加,由于开孔率越大,蜂窝梁的抗弯刚度削弱越大,导致结构梁机制提前结束,进入悬链线机制。在悬链线机制阶段,随开孔率的增加,峰值荷载先增加后减小。当开孔率在 20%~40% 时,开孔率每增加 10%,峰值荷载分别提高 20.72%、9.59%;当开孔率在 40%~70% 时,开孔率每增加 10%,峰值荷载分别下降 0.51%、3.75%、16.70%。当开孔率小于 30% 时,其变形能力较差,导致蜂窝梁无法充分发挥悬链线作用。由此得出,当开孔率在 40%~60% 时,蜂窝梁柱子结构具有良好的抗连续性倒塌能力。

3.3 首孔距离

由表 2 可知,首孔距离不同会导致蜂窝

梁柱子结构出现两种破坏模式,H60-050 到 H60-125 均为首孔形成塑性铰后受拉破坏,H60-150 为梁端受拉破坏。当首孔距离较大时,蜂窝孔最大削弱截面承受弯矩较小,在加载前期无法形成塑性铰,导致试件在梁端发生破坏。由图 13(c)和表 2 可知,在弹性阶段,随首孔距离的增加,弹性荷载逐渐增大,首孔距离每增加  $0.25 h$ ,弹性荷载分别增加 6.72%、10.59%、11.58%、12.64%,此时梁机制为竖向抗力的主要来源,且在弹性阶段首孔距离对梁机制抗力的贡献比例影响较小。

在悬链线效应阶段,随首孔距离的增加,峰值荷载先增大后减小。当首孔距离在  $0.5 h \sim 1.0 h$  时,首孔距离每增加  $0.25 h$ ,峰值荷载分别提高 22.33%、36.49%;当首孔距离在  $1.0 h \sim 1.5 h$  时,首孔距离每增加  $0.25 h$ ,峰值荷载分别下 14.88%、32.75%。首孔距离小于  $0.5 h$  时,蜂窝孔所在截面承受弯矩较大,使其过早发生破坏,导致峰值荷载较低;首孔距离大于  $1.25 h$  时,蜂窝梁具有较低的变形能力,导致其无法充分发挥其悬链线作用。由此得出,当首孔距离在  $0.75 h \sim 1.0 h$  时,蜂窝梁柱子结构具有良好的抗连续性倒塌能力。

## 4 结 论

(1) 试件 H60-100 在中柱失效下的破坏模式为首孔形成塑性铰后受拉破坏,承载机制为弹性阶段、过渡阶段、悬链线阶段与破坏阶段。

(2) 相比试件 SF,试件 H60-100 能有效地将塑性铰外移至首孔处,蜂窝梁可充分发挥其悬链线作用,使峰值荷载增长了 64.26%,所对应的位移增长 73.57%,表明试件 H60-100 具有良好的抗连续性倒塌性能。

(3) 孔型、开孔率、首孔距离均为蜂窝梁柱子结构的抗连续性倒塌性能的主要影响因

素,建议在工程设计时,孔型选取圆形孔或六边形孔,开孔率为 40% ~ 60%,首孔距离为  $0.75 h \sim 1.0 h$ 。

## 参考文献

- [1] 姜健,吕大刚,陆新征,等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势[J]. 建筑结构学报,2022,43(1):1-28.  
(JIANG Jian, LYU Dagang, LU Xinzheng, et al. Research progress and development trends on progressive collapse resistance of building structures [J]. Journal of architectural structure, 2020, 43(1):1-28.)
- [2] 熊进刚,李政策,胡淑军,等. 装配式 RCS 组合框架梁柱子结构抗连续倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(增刊2):22-30.  
(XIONG Jingang, LI Zhengce, HU Shujun, et al. Experimental research on anti-progressive collapse performance of beam-column substructure in prefabricated RCS composite frame [J]. Journal of architectural structure, 2021, 42(S2):22-30.)
- [3] 宋怀金,刘桥. 江门站复杂支承屋盖结构稳定及抗连续性倒塌分析[J]. 建筑结构,2022,52(1):17-23.  
(SONG Huaijin, LIU Qiao. Stability analysis and anti-continuous collapse analysis on complex supporting roof structure of Jiangmen railway station [J]. Building structure, 2022, 52(1):17-23.)
- [4] WANG J X, SHEN Y J, GAO S, et al. Anti-collapse performance of concrete-filled steel tubular composite frame with assembled tensile steel brace under middle column removal [J]. Engineering structures, 2022, 266, 114635.
- [5] ZHANG W J, LI G Q, ZHANG J Z. Progressive collapse mechanism of steel framed-structures subjected to a middle-column loss [J]. Advanced steel construction, 2021, 17(2):199-209.
- [6] DINU F, MARGINEAN I, DUBINA D, et al. Experimental testing and numerical analysis of 3D steel frame system under column loss [J]. Engineering structures, 2016, 113:59-70.
- [7] 中国工程建设标准化协会. 建筑结构抗倒塌设计标准: T/CECS 392—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.  
(China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for anti-collapse design of building structures: T/CECS 392—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.)
- [8] 黄远,陈庆. 框支框架结构抗连续倒塌性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(5):800-809.  
(HUANG Yuan, CHEN Qing. Analysis of progressive collapse resistance of frame-supported frame structures [J]. Journal of



- Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(5): 800 – 809. )
- [9] DINU F, MARGINEAN I, DUBINA D. Experimental testing and numerical modelling of steel moment-frame connections under column loss [J]. Engineering structures, 2017, 151: 861 – 878.
- [10] 高山, 郭兰慧, 吴兆旗, 等. 关键柱失效后组合框架抗倒塌试验研究及理论分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 43 – 48.  
(GAO Shan, GUO Lanhui, WU Zhaoqi, et al. Experimental and analytical studies on performance of composite frame under column loss [J]. Journal of architectural structure, 2013, 34(4): 43 – 48. )
- [11] LI L, WANG W, CHEN Y Y, et al. Experimental investigation of beam-to-tubular column moment connections under column removal scenario [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 88: 244 – 255.
- [12] 王伟, 李玲, 陈以一, 等. 圆钢管柱 – H 形梁外环板式节点抗连续性倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 26 – 33.  
(WANG Wei, LI Ling, CHEN Yiyi, et al. Experimental study on progressive collapse behavior of CHS column-to-H beam connections with outer-diaphragm [J]. Journal of architectural structure, 2014, 35(7): 26 – 33. )
- [13] 王伟, 李玲, 陈以一. 方钢管柱 – H 形梁栓焊混合连接节点抗连续性倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 92 – 99.  
(WANG Wei, LI Ling, CHEN Yiyi. Experimental investigation on progressive collapse behavior of WUF-B connections between SHS column and H beam [J]. Journal of architectural structure, 2014, 35(4): 92 – 99. )
- [14] 毕然, 吴金国, 贾连光, 等. 高强螺栓对蜂窝梁 – 柱端板连接节点力学行为的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 786 – 794.  
(BI Ran, WU Jinguo, JIA Lianguang, et al. Effect of high-strength bolt on mechanical behavior of castellated beam-to-column end plate connections [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(5): 786 – 794. )
- [15] 贾连光, 王妍霓, 张丽, 等. 纯弯作用下双排圆孔蜂窝梁应力分析及截面应力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(1): 17 – 25.  
(JIA Lianguang, WANG Yanni, ZHANG Li, et al. Stress analysis and a method of calculating the normal stress for double-row circular web opening castellated beam under pure bending [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(1): 17 – 25. )
- [16] 贾连光, 唐康, 焦禹铭, 等. 负弯矩下钢 – 混凝土蜂窝组合梁力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 769 – 778.  
(JIA Lianguang, TANG Kang, JIAO Yuming, et al. Research on mechanical properties of steel-concrete honeycomb composite beam under negative bending moment [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 769 – 778. )
- [17] 毕然, 吴金国, 贾连光, 等. 高强螺栓对蜂窝梁 – 柱端板连接节点力学行为的影响[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2022, 38(5): 786 – 794.  
(BI Ran, WU Jinguo, JIA Lianguang, et al. Effect of high-strength bolt on mechanical behavior of castellated beam-to-column end plate connections [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(5): 786 – 794. )
- [18] LIN S T, QIAO H Y, WANG J P, et al. Anti-collapse performance of steel frames with RWS connections under a column removal scenario [J]. Engineering structures, 2021, 227: 111495.
- [19] 李显超. 考虑混凝土板效应的蜂窝梁钢框架抗震性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.  
(LI Xianchao. Experimental study on seismic behavior of cellular beam steel frame considering the effect of concrete slab [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017. )
- [20] 唐红元, 黄靖翔, 廖静, 等. 梁贯通型 RCS 组合结构梁柱节点抗连续倒塌研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊2): 1 – 6.  
(TANG Hongyuan, HUANG Jingxiang, LIAO Jing, et al. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of beam-column joints in beam-through RCS composite frame structures [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(S2): 1 – 6. )
- [21] WANG W, FANG C, QIN X, et al. Performance of practical beam – to – SHS column connections against progressive collapse [J]. Engineering structures, 2016, 106: 332 – 347.

(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)