

蜂窝梁钢框架中柱节点抗震性能 与恢复力模型研究

董 炆¹, 贾连光¹, 王春刚¹, 赵庆岩²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 目的 基于蜂窝梁钢框架中柱节点的抗震性能的研究, 提出一种针对此类节点的恢复力模型骨架曲线, 为此类工程实践提供理论依据。方法 对 18 个蜂窝梁钢框架中柱节点模型进行数值模拟分析, 以开孔率、开孔位置、孔型为变化参数, 研究节点的滞回性能、承载性能、刚度退化、延性、耗能能力等抗震性能, 建立一种针对此类节点的恢复力模型。结果 圆形孔节点开孔位置为 0.75~1 倍梁高、正六边形孔节点开孔位置为 1~1.25 倍梁高, 开孔率均为 60%~65% 时, 可实现塑性铰外移, 并对节点的承载力、延性和耗能能力产生明显的影响。所建立的恢复力模型骨架曲线与模拟曲线吻合较好。结论 蜂窝梁中柱节点抗震性能良好, 可实现梁铰机制。笔者提出的恢复力模型可为此类节点的弹塑性反应分析和工程抗震分析提供参考。

关键词 蜂窝梁钢框架中柱节点; 有限元分析; 抗震性能; 恢复力模型

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式: 董炆, 贾连光, 王春刚, 等. 蜂窝梁钢框架中柱节点抗震性能与恢复力模型研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 1029-1037. (DONG Yang, JIA Lianguang, WANG Chungang, et al. Research on seismic performance and restoring force model of mid-column joints in steel frame with cellular beam[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(6): 1029-1037.)

Research on Seismic Performance and Restoring Force Model of Mid-column Joints in Steel Frame with Cellular Beam

DONG Yang¹, JIA Lianguang¹, WANG Chungang¹, ZHAO Qingyan²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd., Ji'nan, China, 250100)

Abstract: Based on the study of the seismic performance of mid-column joints in steel frames with cellular beams, a restoring force model skeleton curve for these joints is proposed, providing a theoretical basis for similar engineering applications. Numerical simulations were conducted on 18

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978422)

作者简介: 董炆(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事钢结构和组合结构等方面研究。

joints of mid-column joints with cellular beams, varying parameters such as opening ratio, opening position, and hole shape. The seismic performance, including hysteresis behavior, bearing capacity, stiffness degradation, ductility, and energy dissipation, was analyzed to develop a restoring force model for these nodes. When circular hole openings are positioned at 0.75 to 1 times the beam height, and hexagonal hole openings at 1 to 1.25 times the beam height, with an opening ratio between 60% and 65%, plastic hinge relocation can be achieved, significantly influencing on bearing capacity, ductility, and energy dissipation of the joint. The skeleton curve of the proposed restoring force model aligns well with the simulation results. Cellular beam mid-column joints exhibit good seismic performance and facilitate the formation of a beam-hinge mechanism. The restoring force model proposed in this paper can serve as a reference for elastic-plastic response analysis and seismic analysis of such joints in engineering practice.

Key words: mid-column joints in steel frame with cellular beam; finite element analysis; seismic performance; restoring force model

历史震害表明,钢结构在抵御地震作用时也会发生超乎预期的破坏现象,甚至倒塌,破坏主要出现在梁柱节点或节点附近区域^[1]。部分学者针对钢框架梁柱节点脆性破坏问题,提出了几种新型钢结构梁柱节点,例如加强型节点^[2-3]、削弱型节点^[4-7]和半刚性节点^[8-10]。在梁柱连接节点的设计中,使用蜂窝梁可增强梁柱刚接的能量耗散能力,并将梁柱节点的损伤传递到蜂窝梁的孔角,这会使连接处应力分布发生变化,减少脆性破坏概率,使得连接处破坏形式从脆性破坏向塑性破坏过渡,结构的延性得到了显著提高^[11]。

目前,采用削弱型节点将塑性铰外移至梁端的方法已经得到广泛认可,国内外学者针对蜂窝梁柱节点的抗震性能做了大量研究工作。K. D. Tsavdaridis 等^[12]通过数值模拟得出首孔距离对节点受力性能影响较大。王瑞锋^[13]对不同孔型蜂窝框架节点的抗震性能进行分析,得到了参数的合理取值范围,同时建立了强度计算公式。秦雨生等^[14]通过对比蜂窝梁钢框架和实腹梁钢框架,对蜂窝梁钢框架抗震性能及影响因素进行分析。贾连光等^[15-19]研究发现孔型变化、楼板效应、扩高比及高厚比对蜂窝梁钢框架抗震性能有明显的影响。

上述研究成果表明,现有研究多集中在

梁-柱 T 型连接的边柱节点,并针对相应的节点类型提出了对应的恢复力模型,而关于蜂窝梁钢框架中柱节点的研究较少,因此有必要对蜂窝梁十字形节点的抗震性能进行研究。基于此,笔者利用数值模拟方法,考虑孔型、开孔率和开孔位置等影响因素,分析了蜂窝梁中柱刚性连接节点的破坏形式、滞回性能,并建立了一种针对蜂窝梁钢框架中柱节点的恢复力模型骨架曲线,以期为此类节点的弹塑性反应分析、非线性分析和结构动力试验提供参考。

1 有限元模型建立及验证

1.1 有限元模型验证

笔者依照文献[20]中的蜂窝梁柱连接节点试验建立了边柱节点模型,并对模型进行验证。试件中 H 型钢柱截面高×宽×腹板厚度×翼缘厚度为 450 mm×300 mm×12 mm×16 mm,柱高 1 800 mm;蜂窝梁截面高×宽×腹板厚度×翼缘厚度为 400 mm×200 mm×8 mm×12 mm,梁长 2 400 mm。梁腹板开孔率为 60%(孔高/梁高),孔型为正六边形,蜂窝梁与柱翼缘板采用焊接连接,试件所用钢材为 Q355 级钢。试件参数见图 1。

依照试验尺寸建立有限元模型,弹性模量为 2.05×10^5 MPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 346 MPa,极限强度为 584 MPa。模型

单元类型为 C3D8I,通过限制耦合点的位移与转角实现边界条件的布置,柱体上下两端铰接连接,梁为悬臂梁,在梁端加劲肋处施加低周往复荷载,柱顶施加 1 260 kN 集中荷载。有限元模型见图 2。

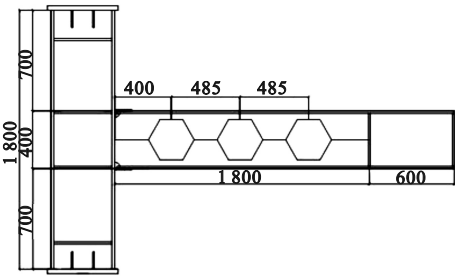


图 1 试件几何尺寸与构造

Fig. 1 The geometry sizes and details of specimens

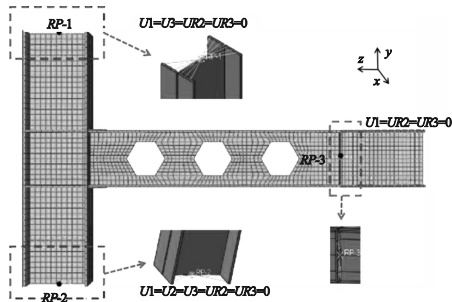


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

试件破坏形态见图 3,有限元模拟破坏形态见图 4。从图 3 可以看出,由于节点域柱腹板设置了加劲肋,约束了柱翼缘的弯曲变形;蜂窝孔首处梁翼缘有轻微的弯曲变形,孔角发生撕裂。从破坏形态上看,有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

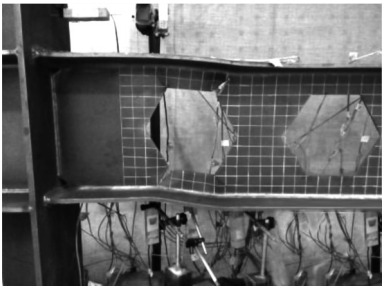


图 3 试验破坏形态

Fig. 3 The failure mode of test

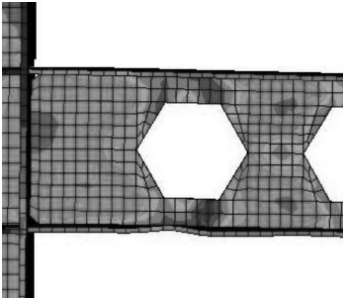


图 4 有限元模型破坏形态

Fig. 4 The failure mode of finite element model

滞回曲线对比如图 5 所示。从图中可以看出,在弹性阶段曲线几乎重合,说明模型能够准确模拟节点的初始刚度。模型的极限荷载值略高于试验值,但误差在 5% 以内,延性系数和耗能性能几乎相同,说明有限元模型的计算精度较好。上述分析表明,有限元模拟结果与试验结果吻合较好,可采用所建立的有限元模型对中柱节点进行模拟分析。

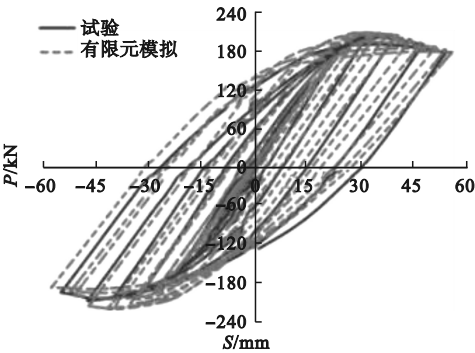


图 5 滞回曲线对比

Fig. 5 The comparison of hysteretic curves

1.2 蜂窝梁柱刚性连接中柱节点

蜂窝梁钢框架中柱节点几何尺寸与构造如图 6 所示。

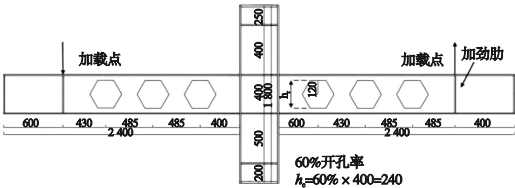


图 6 试件几何尺寸与构造

Fig. 6 The geometry sizes and details of specimens

在实腹柱两侧焊接与试验试件相同尺寸的蜂窝梁,使之成为十字形节点。在蜂窝梁两端距离柱翼缘1 800 mm处施加低周往复荷载,研究开孔率、孔型、首孔位置等参数对蜂窝梁钢框架中柱节点抗震性能的影响。

1.3 建立中柱节点有限元模型

在柱顶按轴压比0.25施加集中荷载,以模拟油压千斤顶在柱上端施加的轴力,两侧梁端加载方式为等值反向加载,采用位移控制加载形式。加载制度如图7所示。

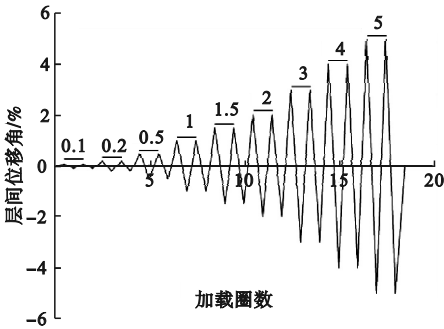


图7 加载制度

Fig. 7 The loading regime

笔者基于上述建模原则,建立了蜂窝梁中柱节点模型(见图8)。试件支座条件为柱上下两端铰接,梁端为自由端,侧向支撑设置在梁的端部;通过对柱上、下端耦合点RP-1和RP-2转角和位移进行约束,模拟柱两端边界条件;通过约束梁端截面的平面外位移,模拟侧向支撑所产生的约束作用。模型编号为FWLZ(50/55/60/65/70)-(1/2)-(200/300/400/500/600),第一个括号内数值表示开孔率,即开孔高度与梁高的百分比;第二个括号内数值表示孔型,1表示圆形孔,2表示正六边形孔;第三个括号内数值表示开孔距离。

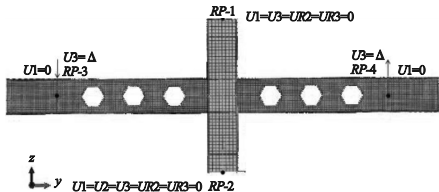


图8 有限元模型

Fig. 8 Finite element mode

2 参数分析

2.1 开孔率

选取开孔率50%~70%的蜂窝梁进行有限元模拟分析,对比两种孔型在不同开孔率下蜂窝梁钢框架中柱节点的抗震性能。

不同孔型和开孔率下试件骨架曲线见图9。从图中可以看出,两种孔型下,不同开孔率节点的骨架曲线走势基本相同,并且节点模型经历了比较长的强化阶段,在到达峰值荷载后,各节点模型承载力下降平缓;在开孔形状相同时,开孔率50%的节点模型的承载力更高。圆形孔节点相较于正六边形孔节点具有更高的极限承载力。

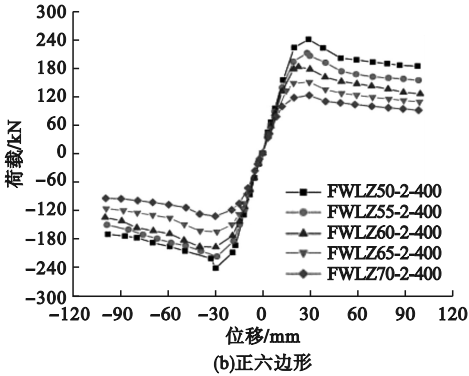
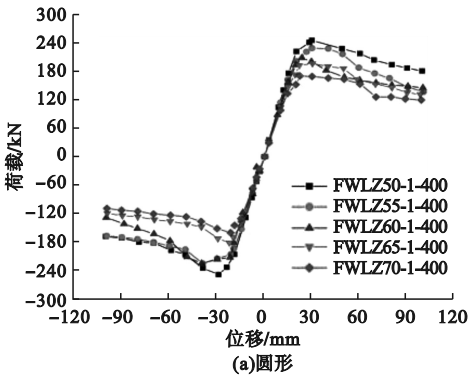


图9 不同开孔率的节点骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of joints with different opening ratio

不同孔型和开孔率试件的荷载特征值见表1。从表中可以看出,节点均表现出了较好的承载能力,随着开孔率的增加,试件的屈服荷载和极限荷载呈现逐渐下降趋势。圆形孔节点开孔率在大于65%时,下降幅度明显

增加,峰值荷载最大降低幅度达 30.6%。正六边形孔节点开孔率在 50%~70% 时,承载力下降平缓。同时可以得出,圆形孔试件的承载能力要比正六边形孔试件的承载能力更

好,受腹板开孔及开孔类型影响,钢梁所能承受的剪力和弯矩相对较小,承载力有所降低。各节点的峰值承载力随开孔率的增大均呈下降趋势。

表 1 不同开孔率的试件计算结果

Table 1 Results of different opening ratios specimens

节点编号	屈服状态		极限状态		μ	h_e	E
	P_y /kN	Δ_y /mm	P_u /kN	Δ_u /mm			
FWLZ50-1-400	225.57	21.69	207.93	65.61	3.03	0.24	1.52
FWLZ55-1-400	206.39	21.62	193.94	56.66	2.62	0.25	1.57
FWLZ60-1-400	192.01	20.26	176.75	42.83	2.16	0.28	1.74
FWLZ65-1-400	179.72	20.01	166.47	56.73	2.84	0.22	1.37
FWLZ70-1-400	148.74	18.78	144.3	62.97	3.35	0.24	1.5
FWLZ50-2-400	220.85	20.98	200.52	47.56	2.27	0.25	1.55
FWLZ55-2-400	191.29	20.21	176.45	46.11	2.28	0.21	1.35
FWLZ60-2-400	165.71	17.99	152.15	45.85	2.55	0.31	1.95
FWLZ65-2-400	134.6	16.51	124.92	48.62	2.94	0.16	0.99
FWLZ70-2-400	105.33	15.82	101.75	56.18	3.55	0.2	1.27

注: P_y 为屈服荷载; Δ_y 为屈服位移; P_u 为峰值荷载; Δ_u 为峰值位移; μ 为延性系数; h_e 为等效黏滞阻尼系数; E 为能量耗散系数。

不同开孔率的节点刚度变化曲线如图 10 所示。从图中可以看出,相同种孔型时,节点初始刚度随开孔率的增加而降低,退化趋势基本相同。由于正六边形孔的孔角应力集中现象更加明显,因此在同样大小的开孔率下,正六边形孔削弱腹板的面积更大,对于腹板的抗剪承载力的削弱作用更大。分析表明,开孔率对于节点初始刚度的影响很大,开孔率相同情况下,圆形孔节点较正六边形节点的初始刚度更大。

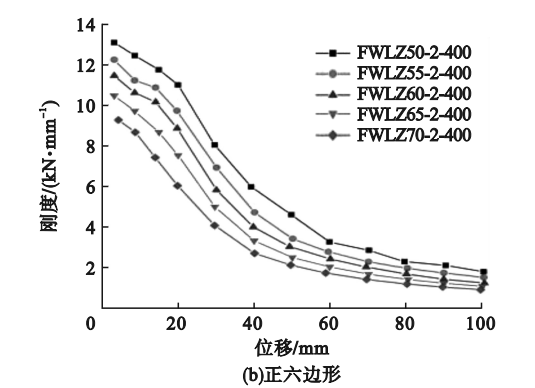
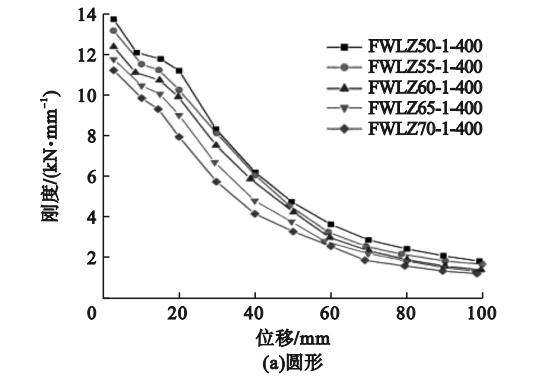


图 10 不同开孔率的节点有效刚度曲线

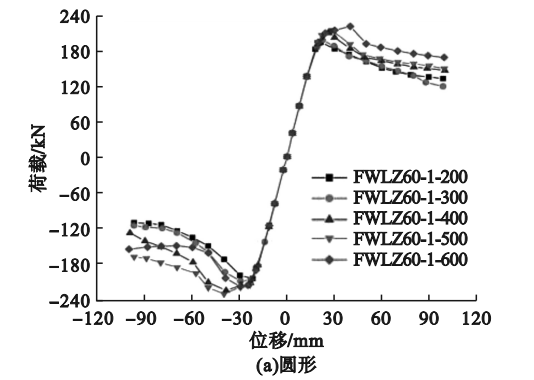
Fig. 10 Effective stiffness curve of joint with different opening ratios



不同开孔率下节点的延性系数见表 1。分析表中数据可以得出,在首孔距离不变的情况下,延性系数随着开孔率增大呈现先下降后上升的趋势。节点开孔率为 65%~70% 时,节点延性性能较好。开孔率越大,腹板削弱面积越大,圆形孔节点孔间腹板屈曲严重,正六边形节点,蜂窝孔角的应力集中现象更加明显,造成蜂窝钢梁的承载力下降明

显,开孔率过小使得节点不易屈服,容易产生脆性破坏。

每个蜂窝梁钢框架中柱节点在峰值荷载滞回环中的等效黏滞阻尼系数 h_e 及能量耗散系数 E 见表1。分析可得,节点开孔率为60%时,等效黏滞阻尼系数最大,耗能优势显著;当开孔率大于60%时,初始刚度下降幅度明显增加(见图10),节点进入弹塑性发展阶段,变形能力增强,耗能能力进一步提高。



2.2 开孔位置

不同孔型、不同首孔位置下节点骨架曲线如图11所示。从图中可以看出,不同开孔位置的节点骨架曲线变化规律基本相同,都经历了比较长的强化阶段,在到达峰值荷载后,承载力平缓下降。在开孔形状相同时,开孔位置在1.5倍梁高的节点模型的承载力更高,说明适当增大首孔与柱翼缘的距离,可以提高节点的承载能力。

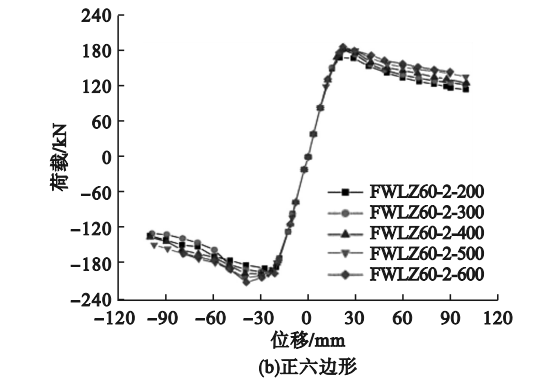


图11 不同开孔位置的节点骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of joints with different opening position

不同孔型、不同开孔位置试件的荷载特征值见表2。

表2 不同开孔位置的试件计算结果

Table 2 Results of different opening position specimens

节点编号	屈服状态		极限状态		μ	h_e	E
	P_y /kN	Δ_y /mm	P_u /kN	Δ_u /mm			
FWLZ60-1-200	180.95	17.95	163.17	46.79	2.61	0.20	1.27
FWLZ60-1-300	183.54	18.67	166.32	42.33	2.27	0.26	1.63
FWLZ60-1-400	192.01	20.26	176.75	42.83	2.11	0.28	1.74
FWLZ60-1-500	197.27	20.52	180.46	43.49	2.12	0.22	1.36
FWLZ60-1-600	200.89	22.12	186.13	55.16	2.50	0.18	1.11
FWLZ60-2-200	152.26	16.41	140.20	49.24	3.00	0.19	1.22
FWLZ60-2-300	162.11	17.98	151.51	41.54	2.31	0.21	1.32
FWLZ60-2-400	165.71	17.99	152.15	45.85	2.55	0.31	1.95
FWLZ60-2-500	165.91	18.27	153.11	52.59	2.88	0.29	1.85
FWLZ60-2-600	166.15	18.34	155.71	58.20	3.17	0.23	1.44

从表2中可以看出,圆形孔节点荷载特征值变化较小。正六边形孔节点,开孔位置在0.5倍梁高时,屈服荷载和峰值荷载较开孔位置0.75倍梁高时分别下降了6%与

7.5%;开孔位置大于0.75倍梁高时,荷载特征值变化很小。节点均表现出了较好的承载能力,开孔位置距离梁根部越近,屈服位移越小。圆形孔节点,开孔位置在1.5倍梁高时

的屈服位移相较于0.5倍梁高节点提高了23.2%,极限承载力提高了14.1%;正六边形孔节点,开孔位置为1.5倍梁高时,屈服位移相较于0.5倍梁高节点提高了11.8%,极限承载力提高了11.1%。分析表明,开孔位置的增大使得节点的峰值承载力得到了提升。

不同开孔位置的节点的刚度退化规律如图12所示。从图中可以看出,开孔位置对试件初始刚度影响很小,试件屈服前刚度衰减较慢,屈服时刚度衰减速率加快,进入到破坏阶段,刚度退化速率均减缓。同孔型节点的刚度衰减趋势大致相同,圆形孔相较于正六边形孔具有更高的初始刚度,这是因为正六边形孔的孔角应力集中现象更加明显,对于腹板的抗剪承载力的削弱作用更大。

点的延性系数随着开孔位置的增大呈先下降后上升的趋势。圆形孔开孔位置为0.5倍梁高时节点延性系数最大,相较于1倍梁高和1.25倍梁高,延性系数提升了23.7%和23.1%。腹板开正六边形孔的蜂窝梁钢框架中柱节点中延性系数最高的是1.5倍梁高节点,其延性系数为3.17。首孔位置距离柱翼缘近时,虽然使得节点提前进入屈服阶段,但是更容易产生脆性破坏。选取适当的首孔位置可以提高节点的延性性能。

不同开孔位置节点的等效黏滞阻尼系数 h_e 及能量耗散系数 E 见表2。可以看出,节点开孔位置为1倍梁高时,等效黏滞阻尼系数最大,耗能能力最好。

3 恢复力模型骨架曲线的建立

采用考虑退化的三线型建立蜂窝梁中柱节点恢复力模型骨架曲线,因此要确定屈服点(Δ_y, P_y),峰值点(Δ_m, P_m)和破坏点(Δ_u, P_u)三个特征点。将FWLZ65-1-400和FWLZ65-2-400的骨架曲线进行无量纲化处理统一于坐标系中,用 Δ/Δ_m 表示横坐标, P/P_m 表示纵坐标,圆形孔和正六边形孔蜂窝梁中柱节点无量纲化后的骨架曲线见图13。

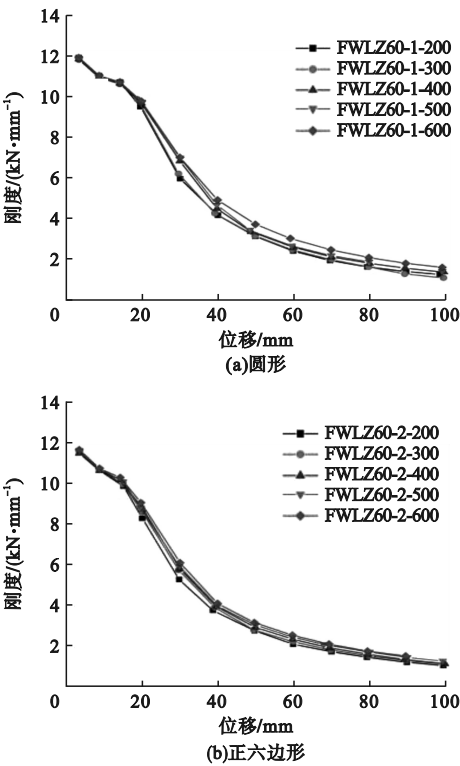


图12 不同开孔位置的节点有效刚度曲线
Fig. 12 Effective stiffness curve of joints with different opening position

不同开孔位置的节点延性系数见表2。可以看出,在开孔率不变的情况下,圆形孔节

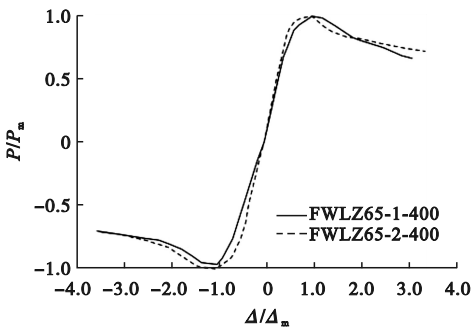


图13 无量纲化骨架曲线
Fig. 13 Dimensionless skeleton curves
由图13可知,两个模型无量纲化后的骨架曲线形状及变化规律相似。将部分模型无量纲化的数据以假定屈服点、峰值点和破坏点为分界点,对无量纲化的骨架曲线进行回归分析,得到统一的骨架模型曲线如图14所

示。其中 OA 段和 OD 段的斜率代表节点的初始相对弹性刚度; AB 段与 DE 段的数据由屈服点与极值点之间进行回归所获得,其斜率表示节点屈服后强化部分的弹塑性刚度; BC 段与 EF 段通过对节点骨架曲线峰值点与破坏点之间的卸载刚度进行回归处理获得。图中的屈服点 A 、 D ,峰值点 B 、 E ,以及破坏点 C 、 F 都是根据模拟计算所得。

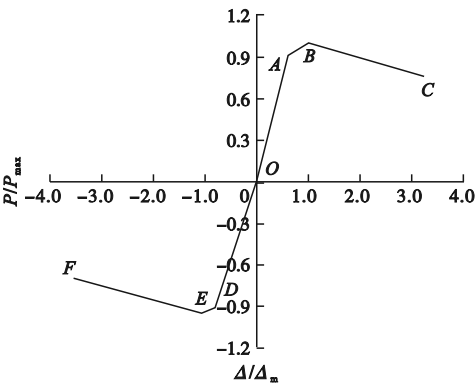


图 14 骨架曲线模型

Fig. 14 Skeleton curve model

回归分析后骨架曲线模型的 6 条线段拟合公式见表 3。

表 3 回归得到的三折线骨架曲线数据

Table 3 Trilinear curve data by regression

折线段	回归方程	夹角/(°)	斜率
FE 段	$\frac{P}{P_{\max}^-} = \frac{-0.01\Delta}{\Delta_{\max}^-} - 0.96$	-5.71	-0.10
ED 段	$\frac{P}{P_{\max}^-} = \frac{0.2\Delta}{\Delta_{\max}^-} + 0.75$	11.31	0.20
DO 段	$\frac{P}{P_{\max}^-} = \frac{1.2\Delta}{\Delta_{\max}^-}$	50.19	1.20
OA 段	$\frac{P}{P_{\max}^+} = \frac{1.5\Delta}{\Delta_{\max}^+}$	56.31	1.50
AB 段	$\frac{P}{P_{\max}^+} = \frac{0.25\Delta}{\Delta_{\max}^+} + 0.75$	14.04	0.25
BC 段	$\frac{P}{P_{\max}^+} = \frac{-0.11\Delta}{\Delta_{\max}^+} + 1.11$	-6.28	-0.11

利用拟合所得到的回归方程计算得到的三线型骨架曲线模型,能很好地体现节点的滞回性能,计算结果与模拟得到的部分骨架曲线结果接近,并且特征点吻合良好。该骨

架曲线模型可以用来描述蜂窝梁钢框架梁柱节点在低周反复荷载作用下力和位移的变化规律。

4 结 论

- (1)设置合理的开孔参数对蜂窝梁钢框架中柱节点在低周反复荷载作用下的抗震性能有重要影响。梁柱节点的破坏多集中在梁首孔截面处,实现了“强节点,弱构件”的设计准则,符合抗震设计的要求。
- (2)梁腹板开圆形孔相较于正六边形孔,具有承载力高、滞回性能好的特点。开孔率建议取值为 60% ~ 65%。圆形孔节点开孔位置建议为 0.75 ~ 1 倍梁高,正六边形孔节点开孔位置建议为 1 ~ 1.25 倍梁高。
- (3)笔者所提出的蜂窝梁钢框架中柱节点恢复力模型能充分反映试件的抗震性能,可以为这类节点的弹塑性反应分析和抗震性能分析提供参考。

参考文献

[1] 黄南翼,张锡云. 日本阪神地震中的钢结构震害[J]. 钢结构,1995,12(2):118-127.
(HUANG Nanyi,ZHANG Xiyun. On disaster of structural steel in great Hanshen quake in Japan [J]. Steel construction, 1995, 12(2): 118-127.)

[2] 陈杰,苏明周,申林,等. 钢结构焊接翼缘板加强式梁柱刚性连接滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(3):1-7.
(CHEN Jie,SU Mingzhou,SHEN Lin,et al. Experimental study on steel moment resistant frame connections with welded flange plates [J]. Journal of building structures, 2007, 28(3):1-7.)

[3] 王燕,冯双,王玉田. 钢框架刚性连接加强型节点滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(5):57-68.
(WANG Yan,FENG Shuang,WANG Yutian. Experimental study on hysteretic behavior for rigid-reinforced connections [J]. China civil engineering journal,2011,44(5):57-68.)

[4] WILKINSON S,HURDMAN G,CROWTHER A. A moment resisting connection for earthquake resistant structures [J]. Journal of constructional steel research, 2006, 62: 295-302.

[5] LEE C H,CHUNG S W. A simplified analytical

- story drift evaluation of steel moment frames with radius-cut reduced beam section [J]. Journal of constructional steel research, 2007, 63:564-570.
- [6] PARK J W, HWANG I K. Experimental investigation of reduced beam section connections by use of web openings [J]. Engineering journal, 2003, 40(2):77-88.
- [7] CHEN S J, TU C T. Experimental study of jumbo size reduced beam section connections using high-strength steel [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(4):582-587.
- [8] SANG W H, KWON G U, MOON K H. Cyclic behavior of post-north ridge WUF-B connections [J]. Journal of constructional steel research, 2007, 63:365-374.
- [9] CHEN S J, CHAO Y C. Effect of composite action on seismic performance of steel moment connections with reduced beam sections [J]. Journal of constructional steel research, 2001, 57:417-434.
- [10] 李国强, 石文龙, 王静峰, 等. 半刚性连接钢框架结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
(LI Guoqiang, SHI Wenlong, WANG Jingfeng, et al. Design of steel frames with semi-rigid connections [M]. Beijing: China Building and Construction Press, 2009.)
- [11] 苏磊, 曹志亮, 林海鹏, 等. 带有盖板的 H 型钢梁柱弱轴连接节点试验及有限元分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(19):98-104.
(SU Lei, CAO Zhiliang, LIN Haipeng, et al. Test and finite element analysis on H-shaped steel beam-to-column connection with cover plate in the weak axis [J]. Building structures, 2022, 52(19):98-104.)
- [12] TSAVDARIDIS K D, P APADOPOILOS T. A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 116:92-113.
- [13] 王瑞锋. 蜂窝式钢框架梁柱节点静力性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
(WANG Ruifeng. Static performance on the design method of cellular steel frame beam-column joints [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [14] 秦雨生, 黄泰杰, 黄炳生, 等. 蜂窝梁钢框架结构 Push-Over 分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2):1187-1191.
(QIN Yusheng, HUANG Taijie, HUANG Bingsheng, et al. Push-over analysis of castellated beam steel frame structure [J]. Building structures, 2022, 52(S2):1187-1191.)
- [15] 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 Lianguang, LI Hongchao, WU Yihong. 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.)
- [16] 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 Lianguang, SUN Hongda, WANG Chungang. Experimental research on seismic behavior of cellular steel frame [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(7):147-153.)
- [17] 贾连光, 刘勖, 史文学. 考虑蜂窝梁腹板屈曲的框架节点滞回性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(6):961-969.
(JIA Lianguang, LIU Meng, SHI Wenxue. Analysis on hysteric behavior of frame joints considering the cellular beam web buckling [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(6):961-969.)
- [18] 贾连光, 毕然, 李秋谔. 端板连接蜂窝梁-柱节点抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(12):121-127.
(JIA Lianguang, BI Ran, LI Qiuorong. Experimental research on seismic performance of end-plate connections between castellated beams and columns [J]. Industrial construction, 2022, 52(12):121-127.)
- [19] 贾连光, 姜莱, 武金国, 等. 考虑混凝土板组合效应的蜂窝钢梁柱连接抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4):54-61.
(JIA Lianguang, JIANG Lai, WU Jinguo, et al. Experimental study on seismic performance of cellular beam column connections considering composite action of floor slab [J]. Journal of building structures, 2017, 38(4):54-61.)
- [20] 回锋. 蜂窝组合梁柱节点抗震性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
(HUI Feng. Experimental study on seismic performance of beam-column joints of cellular composite beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)