

# 蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点 抗震性能研究

贾连光<sup>1</sup>,李秋谔<sup>1</sup>,姬文婷<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. 辽宁省建筑设计研究院有限责任公司,  
辽宁 沈阳 110000)

**摘要** 目的 提出一种蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点,探究节点抗震性能及不同因素对其影响规律,为相关设计提供借鉴。**方法** 理论分析蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点传力机制,建立并验证蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点 ABAQUS 模型,研究端板厚度、开孔率对节点初始转动刚度、承载能力、耗能能力、延性、刚度退化及破坏形式影响规律。**结果** 蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点弯矩最终由柱腹板与正向端板抗弯、柱翼缘与侧向端板抗剪承担;剪力最终由高强摩擦型螺栓连接面间摩擦力承担;端板厚度及开孔率越大,节点耗能进入蜂窝梁耗能阶段越早,连接刚度足够时节点抗震性能主要取决于蜂窝梁。**结论** 提出了蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点弯矩路径传递分配系数计算方法,建议节点端板厚度应大于 1 倍柱翼缘厚度,开孔率取值为 60%~65%。

**关键词** 蜂窝梁柱节点;绕弱轴向;端板连接;抗震性能

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

**引用格式:**贾连光,李秋谔,姬文婷,等.蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点抗震性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):223-231.(JIA Lianguang,LI Qiurong,JI Wenting,et al. Research on seismic performance of weak-axis castellated beam-H-shaped column end-plate connection joint[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(2):223-231.)

## Research on Seismic Performance of Weak-axis Castellated Beam-H-shaped Column End-plate Connection Joint

JIA Lianguang<sup>1</sup>,LI Qiurong<sup>1</sup>,JI Wenting<sup>2</sup>,WANG Chungang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Architectural Design Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110000)

**Abstract:** A weak-axis castellated beam-H-shaped column end-plate connection joint was proposed

收稿日期:2023-05-12

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。

to investigate the factors and influencing laws of seismic performance. The aim is to provide a reference for relevant design. The force mechanism of the weak-axis castellated beam-H-shaped column end-plate connection joint was theoretically analyzed, and an ABAQUS model was established and verified. The influence of end plate thickness, opening rate on the initial rotational stiffness, bearing capacity, energy dissipation capacity, ductility, stiffness degradation, and failure mode of the joint were studied. The bending moment of the weak-axis castellated beam-H-shaped column end-plate connection joint is ultimately borne by the bending resistance of the column web and the forward end plate, and the shear resistance of the column flange and the lateral end plate; the shear force is ultimately borne by the friction between the joint surfaces of the high-strength friction bolts. Increasing end plate thickness and opening rate lead to earlier initiation of energy consumption stage in castellated beams. When connection stiffness is sufficient, seismic performance mainly relies on the behavior of castellated beams themselves. Furthermore, a calculation method for determining moment transfer distribution coefficient in weak-axis castellated beam-H-shaped column end-plate connections is provided as follows; it is recommended that the thickness of the end plate should be at least equal to one times that of the column flange; meanwhile, the range for acceptable values of opening ratio falls between 60% to 65%.

**Key words:** castellated beam-column joint; weak axis; end-plate connection; seismic performance

当下我国大力推动建筑工业化,钢结构凭借绿色、低碳环保且易于装配等优点获得了良好的发展前景。H型钢柱与H型钢梁连接节点是一种典型钢结构节点,绕H型柱弱轴向连接时,传统连接方式需要进行大量焊接。相关研究表明,地震作用下现场焊接钢结构节点更容易发生焊缝脆性破坏<sup>[1-4]</sup>。针对上述问题,Bi Ran等<sup>[5]</sup>研究发现,蜂窝梁柱节点通过削弱梁腹板可实现塑性铰外移,可有效避免焊缝脆断;孔间应力迁移及孔角应力集中是实现蜂窝梁梁铰机制重要决定因素。D. T. Konstantinos等<sup>[6-7]</sup>也得到了类似结论,并且认为采用螺栓连接蜂窝梁柱节点将具有更好抗震性能。H型钢柱绕弱轴向单端板连接因为连接区域截面抗弯刚度小,所以连接区域转动变形较大<sup>[8]</sup>,进而不利于梁端塑性铰外移<sup>[9]</sup>,端板连接焊缝失效是该节点主要破坏形式<sup>[10-11]</sup>。《端板式半刚性连接钢结构技术规程》(CECS 260:2009)<sup>[12]</sup>中规定:对于实腹钢梁H型柱节点绕弱轴向不建议采用单端板连接。贾连光等<sup>[13]</sup>提出全栓接蜂窝梁柱端板连接节点,通过环向端板补强H型钢柱绕弱轴向连接区域刚度,增加

螺栓连接数目,使蜂窝梁H型钢柱绕弱轴向连接可以实现梁铰机制,其节点设计思想与卢林枫等<sup>[14-15]</sup>提出的加强式工字形弱轴节点相接近。同时,蜂窝梁H型钢柱绕强轴向端板连接已经被证实具有良好抗震性能<sup>[16]</sup>。

基于上述研究,笔者通过对蜂窝梁H型钢柱绕弱轴向端板连接节点开展抗震性能研究,分析开孔率及端板厚度对其受力机制、破坏形式、承载能力、延性、耗能能力及刚度退化影响规律,旨在为相关节点设计提供理论依据。

## 1 蜂窝梁H型柱绕弱轴向端板连接

笔者提出的蜂窝梁H型钢柱绕弱轴端板连接节点型式如图1所示。节点由H型钢、蜂窝梁、环向端板连接、环向端板加劲构件及高强螺栓组成,蜂窝梁与环向端板通过全熔透对接焊缝相连;按照《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99—2015)<sup>[17]</sup>要求设置外伸板,环向端板及环向端板加劲构件通过高强型摩擦螺栓与柱翼缘、柱腹板相连。设置环向端板加劲构件不仅可以提高节点区域整体刚度,而且增加了增加摩擦面数目。



$$\theta_{cf} = \theta_{v,cep} = \frac{0.385EA_v}{z_v h_b \beta n} \tag{5}$$

式中: $\theta_{cf}$ 为柱翼缘剪切变形使节点产生转动的转角; $\theta_{v,cep}$ 为侧向端板剪切变形使节点产生转动的转角; $A_v$ 为板件的有效抗剪面积,为板件受剪向长度与厚度乘积; $z_v$ 为板件受剪高度; $h_b$ 为蜂窝梁高度; $\beta$ 为与连接受剪边数相关参数,对于单边节点 $\beta$ 取1; $n$ 为受剪板件个数,柱翼缘取2,侧向端板取4。

根据刚度分配可认为梁端弯矩通过正向端板传递弯矩 $M_{zep}$ 与侧向端板传递弯矩 $M_{cep}$ 的比值可按式(6)计算:

$$\frac{M_{zep}}{M_{cep}} = \frac{\theta_b}{\theta_v} \tag{6}$$

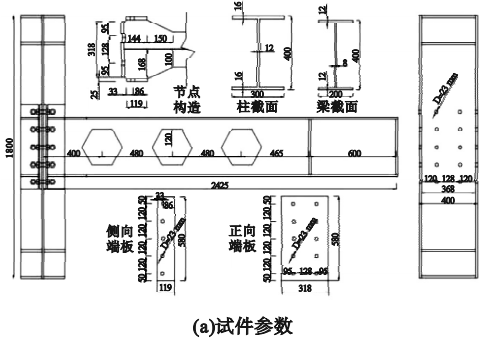
3 有限元模型建立与验证

3.1 有限元模型建立

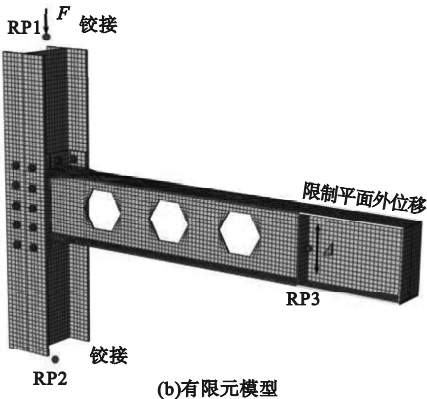
根据文献[11]设计蜂窝梁H型柱绕弱轴端板连接节点如图4(a)所示,其中柱截面高×柱截面宽×柱腹板厚度×柱翼缘厚度为

400 mm×300 mm×12 mm×16 mm,梁截面高×梁截面宽×梁腹板厚度×梁翼缘厚度为400 mm×200 mm×8 mm×12 mm,采用10.9级高强摩擦型螺栓,钢材牌号为Q355B。有限元模型如图4(b)所示,模型网格单元类型为C3D8I,网格尺寸钢柱与钢梁为25 mm,螺栓为8 mm,通过限制耦合点RP1与RP2转角与位移来实现柱上下铰接,梁端限制平面外位移以防止发生平面外破坏。模型中钢材与螺栓本构模型采用双折线模型,弹性模量为 $2.05 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.3,屈服强度分别为360 MPa和910 MPa,抗拉强度分别为584 MPa和1 020 MPa。

通过在柱顶施加竖向荷载 $F$ (1 000 kN)来模拟实际工况,采用施加螺栓荷载建立螺栓预紧力,螺杆接触面之间法向设置“硬”接触,螺帽接触面与端板、柱之间接触面切向设置“罚摩擦”,根据相关文献罚摩擦系数设置为0.35<sup>[18]</sup>。对耦合点RP3进行位移控制加载,加载制度见图5。



(a)试件参数



(b)有限元模型

图4 试件参数及有限元模型

Fig. 4 Specimen size and finite element model

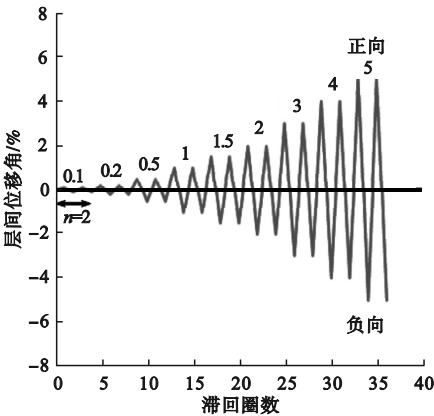


图5 加载制度

Fig. 5 Loading regime

3.2 有限元模型验证

根据上述建模方法对文献[16]中试验试件进行建模并计算,将有限元模拟得到的滞回曲线、骨架曲线及破坏形式与试验结果进行对比,结果如图6~图8所示。从图中可以看出,有限元模拟得到滞回曲线与试验测得滞回曲线较为吻合;初始刚度几乎一致,



峰值荷载仅相差 8%;两者破坏形式相似。表明笔者建立的有限元模型可靠。

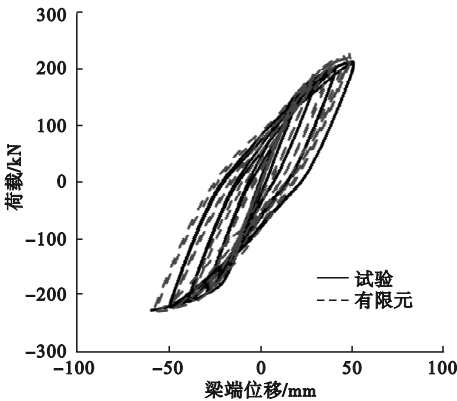


图 6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves

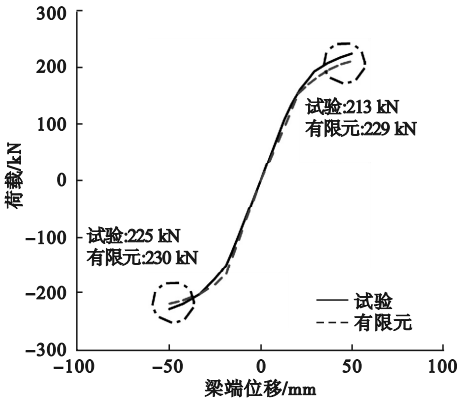


图 7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves

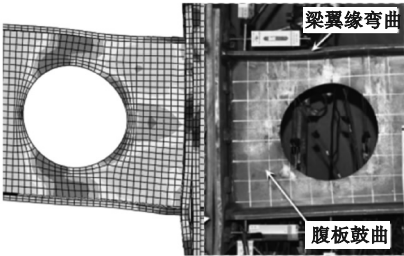


图 8 破坏形式

Fig. 8 Failure mode

## 4 参数分析

### 4.1 端板厚度

蜂窝梁 H 型柱绕弱轴端板连接节点梁端位移  $\Delta_b$  可以视作蜂窝梁变形  $\Delta_{cb}$  及端板连接变形  $\Delta_{con}$  之和,其中  $\Delta_{con}$  可以近似认为是端板连接转动角  $\theta_{con}$  与梁长  $l_b$  乘积(见

图 9)。通过有限元模拟得到梁端整体变形及端板变形引起梁端变形,并以此来衡量端板连接与蜂窝梁之间相互影响作用。

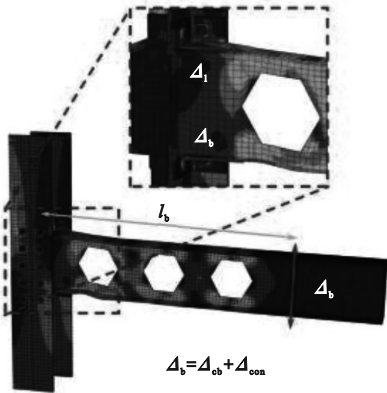


图 9 梁端变形示意图

Fig. 9 Diagram of beam end deformation

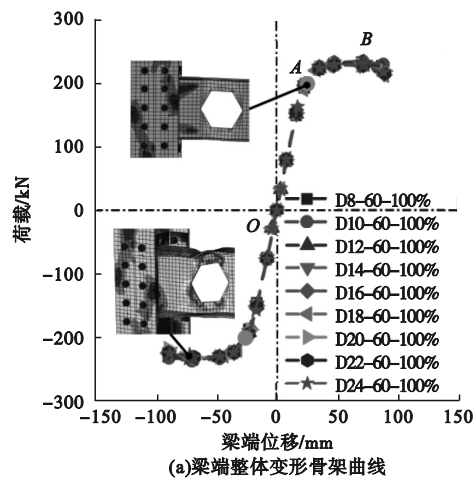
荷载特征值及采用 Park 法<sup>[18]</sup> 计算得到的延性系数见表 1。不同端板厚度的试件骨架曲线如图 10 所示。从图 10 和表 1 可以得出,端板厚度对屈服荷载、峰值荷载及延性影响不大,这是因为在连接刚度足够时,蜂窝梁柱端板连接节点性能主要取决于蜂窝梁。当开孔参数一致时,不同端板厚度的蜂窝梁柱端板连接节点抗震性能相差不大。当端板

表 1 不同端板厚度试件计算结果

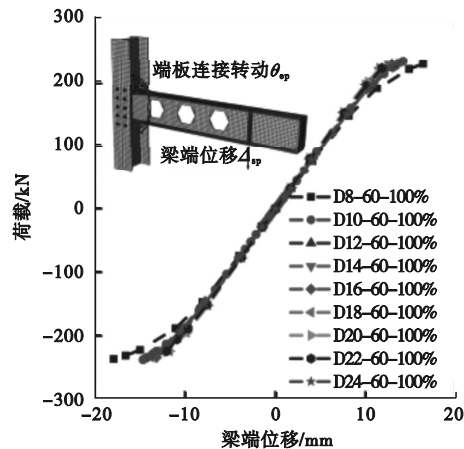
Table 1 Results of different end-plate thickness specimens

模型编号	$F_y$ / kN	$F_p$ / kN	$\Delta_y$ / mm	$\Delta_p$ / mm	$\mu$
D8-60-100%	205	235	27.5	73.9	2.68
D10-60-100%	204	234	26.8	71.8	2.68
D12-60-100%	204	234	26.5	70.4	2.65
D14-60-100%	203	230	26.2	71.9	2.74
D16-60-100%	203	230	26.1	71.8	2.75
D18-60-100%	203	230	26.1	71.8	2.75
D20-60-100%	203	229	25.9	71.8	2.77
D22-60-100%	203	229	25.7	71.7	2.78
D24-60-100%	203	229	25.4	71.6	2.81

注:以试件 D8-60-100% 为例,D8 表示端板厚度为 8 mm,60 表示开孔率为 60%,100% 表示开孔中心距离柱腹板面为 1 倍梁高; $F_y$  为屈服荷载; $F_p$  为峰值荷载; $\Delta_y$  为屈服位移; $\Delta_p$  为峰值位移; $\mu$  为延性系数。



(a)梁端整体变形骨架曲线



(b)端板变形引起梁端变形骨架曲线

图 10 不同端板厚度试件骨架曲线

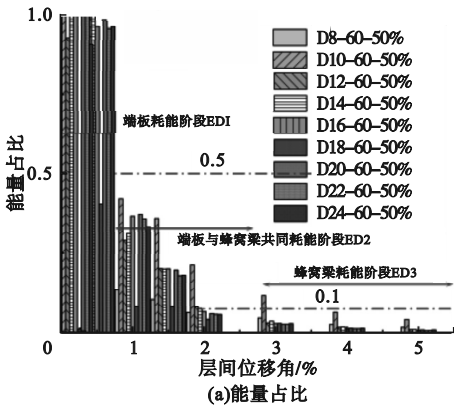
Fig. 10 Skeleton curves with different end-plate thicknesses specimens

厚度大于  $0.875t_{cf}$  (10 mm) 时,端板连接转动引起梁端位移与梁端整体位移比值相差不大,平均值约为 13.9%,较端板厚度  $0.5t_{cf}$  (8 mm) 时下降了 3.9%;表明端板厚度对端板连接转动引起梁端位移影响较小。但仍需注意的是,端板连接发生转动会直接引发节点发生同等转动,因此进行相关设计时应尽可能加强端板连接区域柱刚度来减小端板连接发生转动。

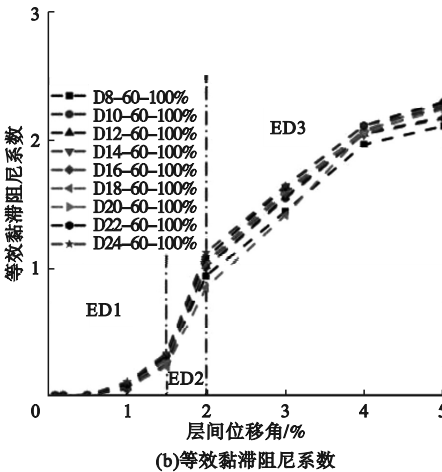
将蜂窝梁 H 型柱绕弱轴端板连接节点受力过程划分为 3 个阶段(见图 10(a)):OA 段(弹性阶段):此时骨架曲线大致呈现线性;当开孔截面上下翼缘发生不均匀变形后进入 AB 段,即弹塑性阶段,在此阶段,梁端塑性较

将发展并且外移;当开孔截面上下翼缘失效时,进入完全塑性阶段(B 点后曲线段)。

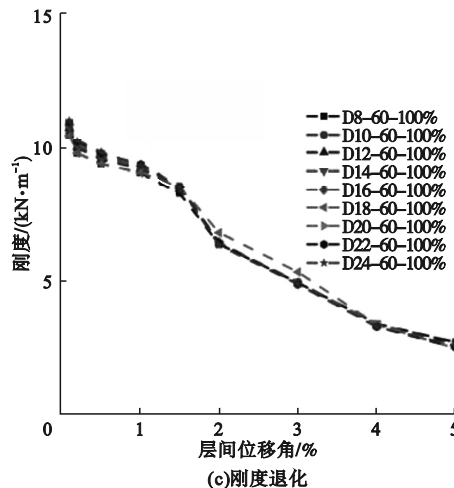
不同端板厚度试件抗震性能指标变化规律如 11 所示。



(a)能量占比



(b)等效黏滞阻尼系数



(c)刚度退化

图 11 不同端板厚度试件抗震性能指标  
Fig. 11 Seismic performance index with different end-plate thicknesses specimens

图 11(a)为端板连接引发梁端位移滞回环面积与梁端整体位移滞回环面积之比,即端板连接耗能与节点整体耗能之比。从图中可以看出,绕弱轴向蜂窝梁 H 型柱端板连接节点耗能可以划分为 3 个阶段:端板耗能阶段(ED1):此时端板连接耗能与节点整体耗能之比  $\gamma$  大于 0.5,端板连接区域是主要耗能区域,蜂窝梁处于弹性状态;端板与蜂窝梁共同耗能阶段(ED2):此时端板连接耗能与节点整体耗能之比  $\gamma$  介于 0.1~0.5,蜂窝梁出现塑性变形;蜂窝梁耗能阶段(ED3):此时端板连接耗能与节点整体耗能之比  $\gamma$  小于 0.1,蜂窝梁塑性变形严重,端板耗能贡献几乎可以忽略。端板厚度越小,进入 ED3 历程越长,对连接区域可靠性要求更高,且不能充分发挥蜂窝梁良好耗能能力,因此进行设计时应充分保证端板厚度。从图 11(b)可以看出,随着端板厚度提升等效黏滞阻尼系数增大,表明节点耗能能力越好。当端板厚度大于  $0.875 t_{cf}$  时,等效黏滞阻尼系数增加幅度减缓。从图 11(c)可以看出,端板厚度对节点刚度及刚度退化规律影响较小,这是因为连接刚度足够时,节点抗震性能主要取决于蜂窝梁。

4.2 开孔率

不同开孔率的试件骨架曲线如图 12 所示,荷载特征值及延性系数见表 2。

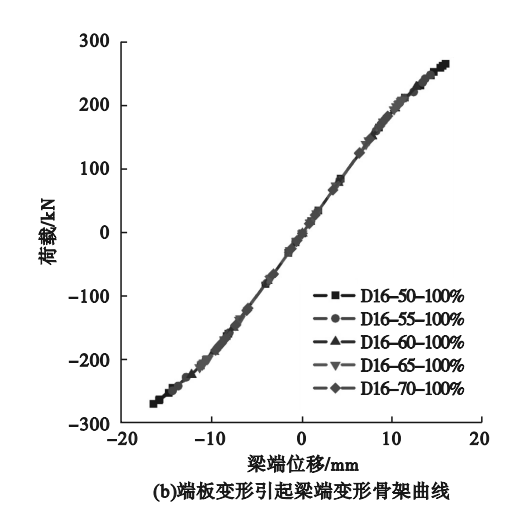


图 12 不同开孔率试件骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves with different opening rates specimens

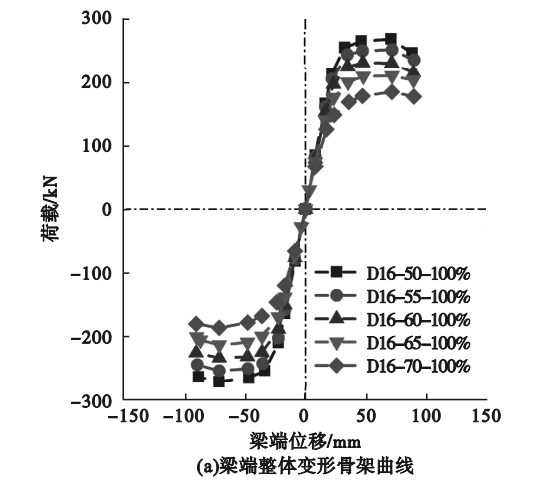
表 2 不同开孔率试件计算结果

Table 2 Results of different opening rate specimens

模型编号	$F_y$ / kN	$F_p$ / kN	$\Delta_y$ / mm	$\Delta_p$ / mm	$\mu$
D16-50-100%	232	266	27.3	71.1	2.60
D16-55-100%	217	250	26.5	71.9	2.71
D16-60-100%	203	230	26.1	71.8	2.75
D16-65-100%	181	209	26.4	71.5	2.70
D16-70-100%	155	184	27.9	71.4	2.56

从图 12 和表 2 可以看出,随着开孔率增大,节点整体初始转动刚度、屈服荷载与峰值荷载均下降。当开孔率大于 65% 时,下降幅度明显增加,最大降低幅度达 31%。延性随着开孔率增大呈现先上升后下降趋势,当开孔率为 60% 时,节点延性最好,开孔率 50%~70% 时,节点延性大致相等。上述结果表明,开孔率对蜂窝梁 H 型柱绕弱轴端板连接节点端板连接区域初始转动刚度的影响较小(端板变形引起梁端变形),对端板连接区域峰值转动角影响较大,影响幅度最大可达 128.6%。

不同开孔率试件抗震性能指标变化规律如 13 所示。



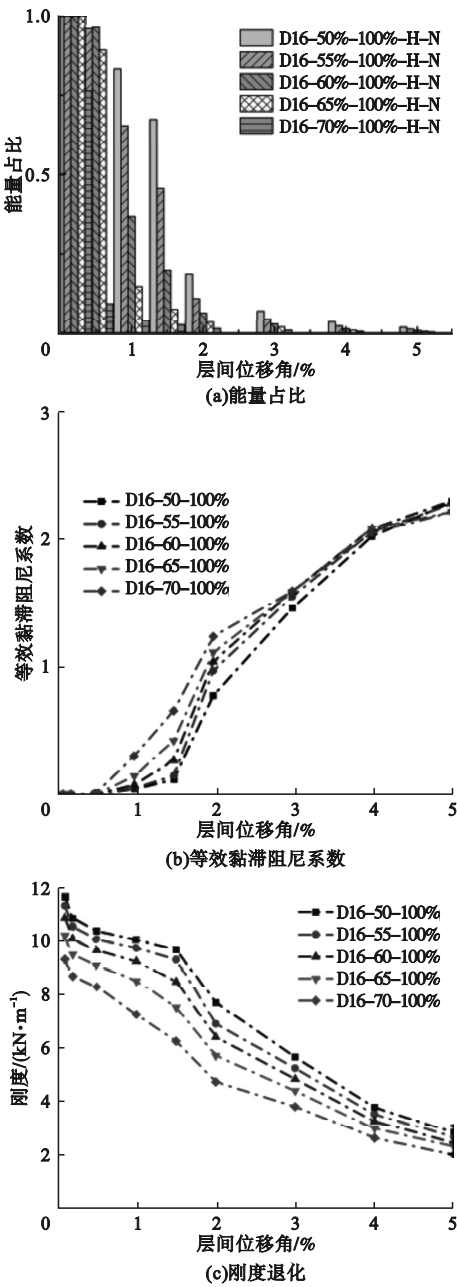


图 13 不同开孔率试件抗震性能指标

Fig. 13 Seismic performance index with different opening rates specimens

从图 13(a)可以看出,开孔率小于 60% 时,节点耗能进入 ED3 阶段历程较长,这是因为开孔率较小时,孔周应力集中现象不明显,蜂窝梁开孔截面受剪力次生弯矩作用小进而蜂窝梁塑性变形发展相对缓慢。当开孔率大于 65% 时,节点耗能会迅速进入 ED3 阶

段,表明蜂窝梁过早进入了弹塑性发展阶段。从图 13(b)可以看出,随着开孔率增加,节点耗能会快速发展至 ED3 阶段,因此较大开孔率节点等效黏滞阻尼系数会大幅增加,开孔率 70% 较开孔率 50% 时,最大可增幅 97.1%。当所有节点耗能均发展至 ED3 阶段时,节点等效黏滞阻尼系数大致相当;同时可以看出,端板连接整体耗能能力要弱于蜂窝梁整体耗能能力,在进行相关设计时应确保端板耗能阶段 ED1 历时小且端板连接有足够可靠性。如图 13(c)所示,不同开孔率对节点刚度退化规律影响较小,但对初始刚度影响较大,当开孔率大于 60% 时,初始刚度下降幅度明显增加。

5 结 论

- (1) 蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点弯矩最终由柱腹板与正向端板抗弯、柱翼缘与侧向端板抗剪承担,剪力最终由高强摩擦型螺栓连接面间摩擦力承担,给出节点弯矩路径传递分配系数计算方法。
- (2) 蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点连接刚度足够时,抗震性能主要取决于蜂窝梁,端板厚度对节点承载性能及初始转动刚度影响较小。
- (3) 开孔率对蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点抗震性能影响较大,蜂窝梁耗能阶段 ED3 是节点耗能主要阶段,端板厚度、开孔率对节点耗能有重要影响。
- (4) 基于抗震性能建议蜂窝梁 H 型柱绕弱轴向端板连接节点端板厚度应大于 1 倍柱翼缘厚度,开孔率建议取值为 60% ~ 65%。

参考文献

[1] DAVARPANAH M, RONAGH H, MEMARZADEH P, et al. Cyclic behaviour of elliptical-shaped reduced web section connection [J]. Structures, 2019, 24: 955 - 973.

[2] WANG Meng, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, et al. Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections [J]. Journal of constructional steel research,



- 2013,90:140-152.
- [3] JIA Lianguang, LI Qirong, BI Ran, et al. Behaviour of castellated beam-to-column end-plate connection under monotonic load [J]. Structures, 2021, 34:4616-4633.
- [4] 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.)
- [5] BI Ran, JIA Lianguang, LI Pengyu, et al. Multiparameter seismic behavior of castellated beam-to-column connections based on stress migration [J]. Structures, 2021, 29:1137-1158.
- [6] KONSTANTINOS D T, CEDRIC D. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(10):1605-1620.
- [7] TSAVDARIDIS D K, PAPADOPOULOS T. A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 11(6):92-113.
- [8] 李峰宇, 郑晓燕, 史誉州, 等. 钢柱弱轴外伸端板连接静力试验与钢框架抗震性能[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(2):41-47.  
(LI Fengyu, ZHENG Xiaoyan, SHI Yuzhou, et al. Research on static tests of beam-to-column minor-axis extended end-plate connections and seismic behavior of steel frames [J]. Progress in steel building structures, 2016, 18(2):41-47.)
- [9] 郁有升, 孙婷, 王燕. 梁柱弱轴连接翼缘削弱型节点的滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(1):15-21.  
(YU Yousheng, SUN Ting, WANG Yan. Analysis on the hysteretic behavior of reduced section beam-to-column connections in minor-axis direction of steel frames [J]. Progress in steel building structures, 2013, 15(1):15-21.)
- [10] 郁有升, 王建, 黄伟平, 等. 钢框架梁柱弱轴栓焊混合连接翼缘削弱型节点破坏形态试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(17):30-33.  
(YU Yousheng, WANG Jian, HUANG Weiping, et al. Experimental study on the failure mode of reduced beam section connections of the bolted-welded connection of steel frame beam-column about minor axis [J]. Building structure, 2014, 44(17):30-33.)
- [11] 王湛, 王涛. 半刚性钢框架梁柱弱轴端板连接的试验研究和有限元分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8):83-89.  
(WANG Zhan, WANG Tao. Experiment and finite element analysis for the end plate minor axis connection of semi-rigid steel frames [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(8):83-89.)
- [12] 同济大学. 端板式半刚性连接钢结构技术规范:CECS 260:2009 [S]. 北京:中国计划出版社, 2009.  
(Tongji University. Technical specification for steel structures with end-plate semi-rigid connections: CECS 260:2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.)
- [13] 贾连光, 李秋谔, 郑圆维, 等. 全栓接蜂窝梁柱端板连接空间节点梁铰机制有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(4):596-603.  
(JIA Lianguang, LI Qirong, ZHENG Yuanwei, et al. Finite element analysis of beam hinge mechanism for fully bolted castellated beam-to-column joints with end-plate connection [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(4):596-603.)
- [14] 卢林枫, 徐莹璐, 郑宏, 等. H型钢柱弱轴连接组合节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(8):124-132.  
(LU Linfeng, XU Yinglu, ZHENG Hong, et al. Experimental study on seismic behavior of composite joints in weak-axis of H-section column [J]. Journal of building structures, 2017, 38(8):124-132.)
- [15] 卢林枫, 徐莹璐, 郑宏, 等. 带混凝土楼板的钢框架梁柱弱轴连接节点滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12):12-21.  
(LU Linfeng, XU Yinglu, ZHENG Hong, et al. Experimental investigation on cyclic performance of beam-to-column weak-axis connections with concrete slab in steel frame [J]. Journal of building structures, 2017, 38(12):12-21.)
- [16] 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 Qirong. Experimental research on seismic performance of end-plate connections between castellated beams and columns [J]. Industrial construction, 2022, 52(12):121-127.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ99—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for steel structures of high rise civil buildings: JGJ99—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [18] 李秋谔. 蜂窝梁H型柱端板式连接静力性能试验研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2020.  
(LI Qirong. Experimental study on static performance of H-section column end plate connection of castellated beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)