

# 腹板开孔组合梁柱子结构抗倒塌性能研究

钟炜辉<sup>1,2</sup>, 段仕超<sup>1</sup>, 崔武杰<sup>1</sup>, 谭 政<sup>1</sup>, 郑玉辉<sup>1</sup>, 孟 宝<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 腹板开孔梁因可提高空间利用率、经济美观、降低自重等特点被应用于钢结构建筑物中, 而关于此类结构的抗倒塌性能研究较少, 因此, 有必要对此类结构的抗倒塌性能及关键参数进行研究. 本文利用 ABAQUS 软件建立腹板开孔组合梁柱子结构的精细化有限元模型, 以组合梁柱子结构的静力加载试验结果作为校验, 验证了有限元建模方法的正确性. 在此基础上, 分析了开孔端距、开孔直径对腹板开孔组合梁柱子结构抗倒塌性能的影响, 结果表明: 不同的开孔端距会影响子结构边柱孔的破坏情况, 而不同开孔直径会影响结构的断裂位置; 模型的承载能力与开孔端距呈正相关, 与开孔直径呈负相关; 开孔端距与开孔直径对子结构的抗力发展影响较大. 通过给出上述参数的合理取值范围建议, 为腹板开孔组合结构抗倒塌设计提供依据.

**关键词:** 腹板开孔; 抗倒塌性能; 破坏模式; 数值模拟

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0500-08

## Collapse-resistant performance of composite beam-column substructure with web openings

ZHONG Weihui<sup>1,2</sup>, DUAN Shichao<sup>1</sup>, CUI Wujie<sup>1</sup>, TAN Zheng<sup>1</sup>, ZHENG Yuhui<sup>1</sup>, MENG Bao<sup>1,2</sup>

(1. School Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance of China Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Web-opening beams are employed in steel structure buildings because of its characteristics of improving space utilization, economical appearance, and reducing self-weight, but there are few studies on the collapse resistance of these structures. Therefore, it is necessary to study the collapse-resistant performance and influencing parameters of these structures. In this study, a refined finite element model of the composite beam-column substructure with web openings was established by ABAQUS software, and the static loading test results of the solid-web composite beam-column substructure are used as verification, which verify the correctness of the finite element modeling method. On this basis, the effects of important parameters such as opening end distance, opening diameter on the collapse resistance of composite beam-column structures with web openings are analyzed. The results show that different opening end distances will affect the failure of the substructure side column holes, while different opening diameters will affect the fracture position of the structure; the bearing capacity of the model is positively correlated with the opening end distance, and negatively correlated with the opening diameter; The opening end distance and the opening diameter has a significant influence on the resistance development of the substructure; The reasonable value ranges of these parameters are given, which provides the basis for the anti-collapse design of the composite structure with web openings.

**Key words:** web opening; collapse-resistant performance; failure mode; numerical simulation

建筑结构的连续性倒塌是指结构在偶然荷载下发生与初始破坏不成比例的倒塌<sup>[1]</sup>. 当建筑结构发生连续倒塌时, 将会造成巨大的财产损失, 严重威胁人们的生命安全. 例如, 2021 年 6 月发生

于美国迈阿密的倒塌事件就造成了 98 人死亡<sup>[2]</sup>. 因此, 如何防止建筑结构发生连续倒塌已成为工程界的研究热点.

钢框架组合结构由于其众多优点被广泛应用

收稿日期: 2022-06-12 修改稿日期: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178162); 陕西省教育厅重点科学研究计划重点项目(20JY033); 陕西省教育厅专项科研计划项目(20JK0713)

第一作者: 钟炜辉(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构抗倒塌和稳定性研究. E-mail: zhongweihui1980@163.com

于高层建筑结构。目前,国内外研究学者对于钢框架组合结构抗倒塌问题的研究已取得众多成果<sup>[3-4]</sup>。钟炜辉<sup>[5]</sup>、杨波<sup>[6]</sup>、王伟<sup>[7]</sup>等通过对子结构的试验研究表明梁跨高比、失效柱位置、楼板作用均会影响结构的抗倒塌性能。但是,由于试验研究的成本较高,研究人员通常利用数值模拟方法分析相关参数的影响。例如,陈俊岭等<sup>[8]</sup>不同连接节点的框架结构进行了数值模拟分析,结果表明盖板式节点的抗连续倒塌性能最为优越。孟宝等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析了梁跨高比、端板厚度等关键参数对平齐端板连接钢框架梁柱子结构抗倒塌性能的影响。乔惠云等<sup>[10]</sup>通过数值模拟研究了两种拆柱方法对结构破坏模式的影响,并分析了结构在不同情况下的撞击块撞击后的动态响应。

随着人们对建筑物功能的需求不断提高,使得建筑结构需要足够的空间布置各种管线,腹板开孔梁因可提高空间利用率、经济美观、通用性强、降低自重等特点被应用于钢结构建筑物中<sup>[11]</sup>。但是,当前对抗倒塌性能的研究对象主要是实腹式梁柱子结构,而对于腹板开孔梁柱子结构的研究却很少,腹板开孔后会导致截面的削弱,必然会影响结构的受力性能。因此,对腹板开孔梁的抗倒塌性能进行研究具有重大意义,且有必要对腹板开孔梁柱子结构的关键参数进行分析。

本文利用 ABAQUS 软件建立腹板开孔组合梁柱子结构的精细化有限元模型,以实腹式组合梁柱子结构的静力加载试验结果作为校验,验证了有限元建模方法的正确性。在此基础上,通过对比不同参数下的模型的计算结果探究了开孔端距、开孔直径等关键参数与腹板开孔梁柱子结构抗倒塌性能的相关性,并给出了相关设计建议,为同类结构的抗倒塌分析和设计提供参考。

## 1 数值模型建立

### 1.1 模型概述

根据我国相关设计规范<sup>[12]</sup>设计了如图1所示的一栋位于西安的跨度6 300 mm×6 300 mm×3 300 mm的6层腹板开孔组合框架原型结构办公楼,楼面和屋面恒荷载为5.0 kN/m<sup>2</sup>,活荷载为2.0 kN/m<sup>2</sup>,基本雪压为0.25 kN/m<sup>2</sup>,基本风压为0.35 kN/m<sup>2</sup>,设计基本地震加速度为0.2 g,场地类别为Ⅱ类场地,抗震设防烈度为8度,第三组设计地震分组。选取原型结构在中柱失效工况下的两跨三柱型组合梁柱子结构为研究对象,考虑

结构的反弯点位置,取上下柱中点、两侧梁外伸1/4跨度处为子结构边界模拟周边区域对结构的拉结影响<sup>[13]</sup>,近似为有侧移结构如图2所示。

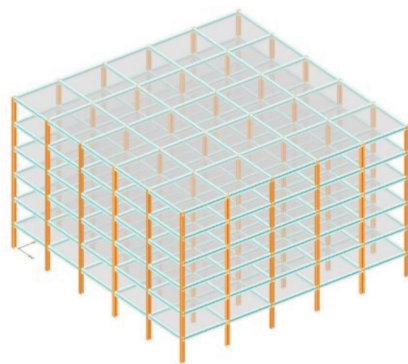


图1 原型结构

Fig. 1 The prototype structure

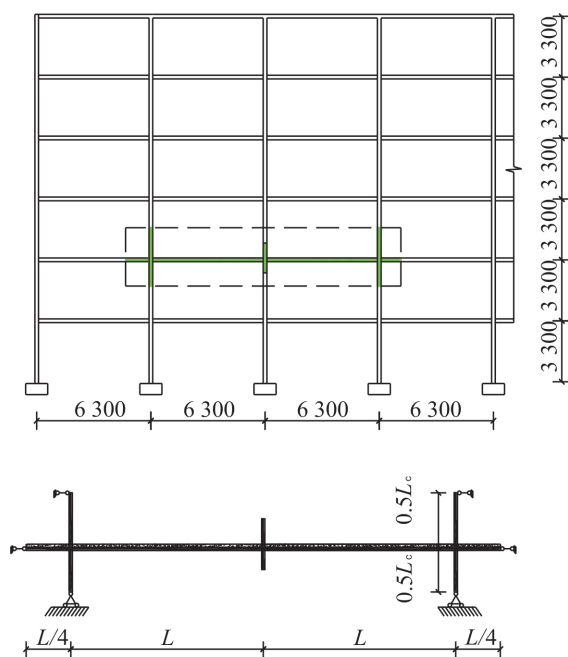


图2 子结构选取(单位: mm)

Fig. 2 Selection of substructure (Unit: mm)

所建立的足尺模型梁截面尺寸为 HN450 mm×200 mm×9 mm×14 mm,柱截面选用 HW400 mm×400 mm×13 mm×21 mm。选取 Q235B 钢材、C25 混凝土为结构材料,楼板宽度为1 460 mm,厚度取120 mm,保护层厚度为20 mm。所梁柱节点采用加盖板栓焊节点,柱翼缘与梁腹板通过剪切板与10.9级 M22 的高强螺栓进行连接,剪切板尺寸为320 mm×110 mm×12 mm(长×宽×厚)。钢筋型号为 HPB300,混凝土楼板中受力钢筋为Φ14@125,分布钢筋为Φ10@180,钢筋网双向双层布置。栓钉直径为19 mm,双排布置,间距80 mm,排距150 mm。在梁端靠近节点处对梁腹板进行开孔,孔直径为270 mm,开

孔端距为 450 mm, 节点详细尺寸与楼板配筋如图 3 所示。

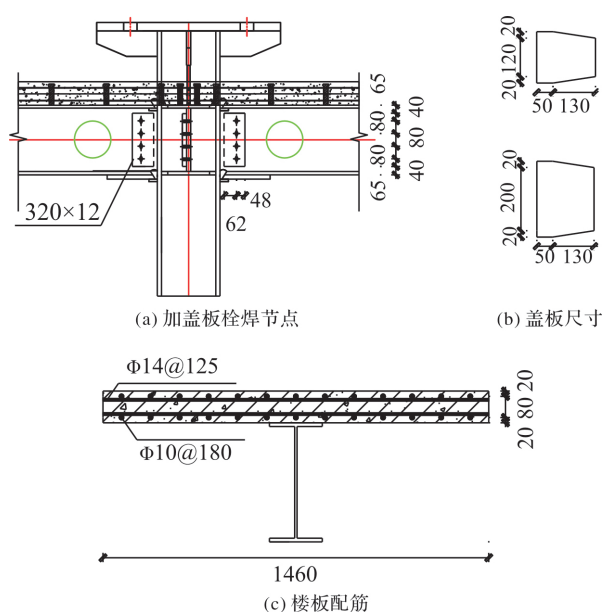


图 3 节点尺寸及配筋分布图(单位: mm)

Fig. 3 Size of connections and distribution of reinforcement (Unit: mm)

## 1.2 材料本构关系<sup>[13]</sup>

钢材本构关系采用如图 4(a)所示的二次流塑四阶段模型本构, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 235 MPa, 抗拉强度为 370 MPa; 钢筋本构采用如图 4b 所示的双折线强化模型本构, 钢筋的强化段模量取弹性模量 0.01 倍; 螺栓屈服强度为 900 MPa, 抗拉强度为 1 000 MPa. 混凝土本构关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[14]</sup>附录 C 中混凝土本构关系, 并通过混凝土的塑性损伤模型模拟混凝土的受力性能. 钢材的断裂采用延性金属失效准则模拟, 在软件中通过定义断裂应变、三轴应力、应变率等参数实现钢材的断裂<sup>[15]</sup>.

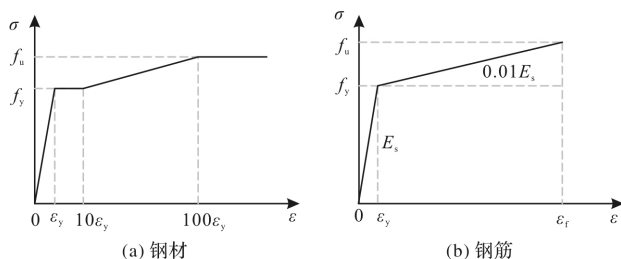


图 4 材料的本构关系

Fig. 4 Constitutive relationships of materials

## 1.3 边界条件定义

将失效柱柱顶耦合至一点并设置为加载点, 并施加竖向位移模拟失效柱的失效过程; 在两侧边柱上方施加 0.3 倍轴压比对应的轴压力模拟上部

结构对子结构的荷载作用; 为防止边柱发生平面外失稳, 在柱顶端外侧约束 X、Z 方向位移; 边柱底部为铰接约束; 在梁端设置轴向连接器模拟周边结构对子结构的拉结作用. 输入刚度值  $K_E$  按公式(1)~(3)<sup>[16]</sup>进行计算.

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{K_C} + \frac{1}{K_{CB}} \quad (1)$$

$$K_C = 48EI_C/L_C^3 \quad (2)$$

$$K_{CB} = K_B + K_R, K_B = EA_B/L, K_R = EA_R/L \quad (3)$$

式中:  $K_C$  是边柱为组合梁提供的轴向刚度;  $K_B$ 、 $K_R$  分别为钢梁和钢筋的轴向刚度;  $K_{CB}$  为组合梁的轴向刚度;  $E$  为钢材的弹性模量;  $A_B$ 、 $A_R$  分别为钢梁和钢筋的截面面积;  $L_C$  为边柱的长度;  $L$  为组合梁的长度.

## 1.4 接触关系、单元类型与网格定义

剪切板与盖板和梁柱间的焊接连接通过绑定约束模拟; 混凝土板中的接触采用嵌入命令模拟; 而在节点处剪切板、盖板、梁、螺栓等连接通过通用接触模拟, 切向接触属性定义为 0.3 摩擦系数的库伦摩擦, 法向接触属性设置为硬接触. 螺栓处的预紧力施加在螺帽上, 模拟过程中不考虑材料的初始缺陷和焊接残余应力.

压型钢板选用 S4R 壳单元, 钢筋选用 T3D2 桁架单元, 其他部件选用 C3D8R 实体单元进行建模. 且在节点应力集中部位对网格进行加密处理.

## 2 模型验证

### 2.1 试验概况

为验证有限元模型建模方法的正确性, 通过 ABAQUS 软件对文献[5]中 1:3 比例梁柱子结构试件的静力试验进行模拟. 试件梁柱截面为 HM150 mm×150 mm×6 mm×9 mm、HW150 mm×150 mm×8 mm×10 mm, 梁跨长 1.5 m, 柱高 1.1 m. 试件材性及相关尺寸参考文献[5], 根据试件尺寸建立实腹有限元模型, 如图 5 所示, 并将计算结果与试验结果进行对比.

### 2.2 模拟结果对比

图 6(a)为荷载-位移曲线及内力发展对比结果, 两曲线的发展趋势一致, 表明有限元可以很好地模拟出试件的整个试验过程. 由于有限元模拟中未考虑材料的初试缺陷以及焊接残余应力等因素, 导致计算结果与试验结果有一定的差异性. 图 6(b)、(c)为试验与有限元的破坏模式及轴力发展对比, 两者破坏模式相似且内力发展吻合较好, 表明此有限元建模方法可以很好地模拟出试件的破

坏及内力发展. 综上所述, 此有限元建模方法能够较精确模拟结构的抗倒塌过程, 并应用于对腹板开孔组合结构的开孔端距、开孔直径等关键参数分析.

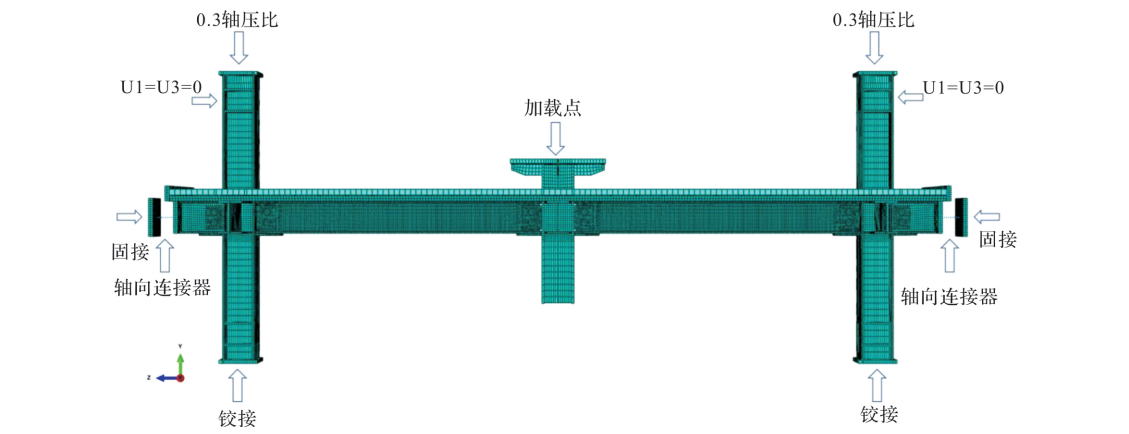


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

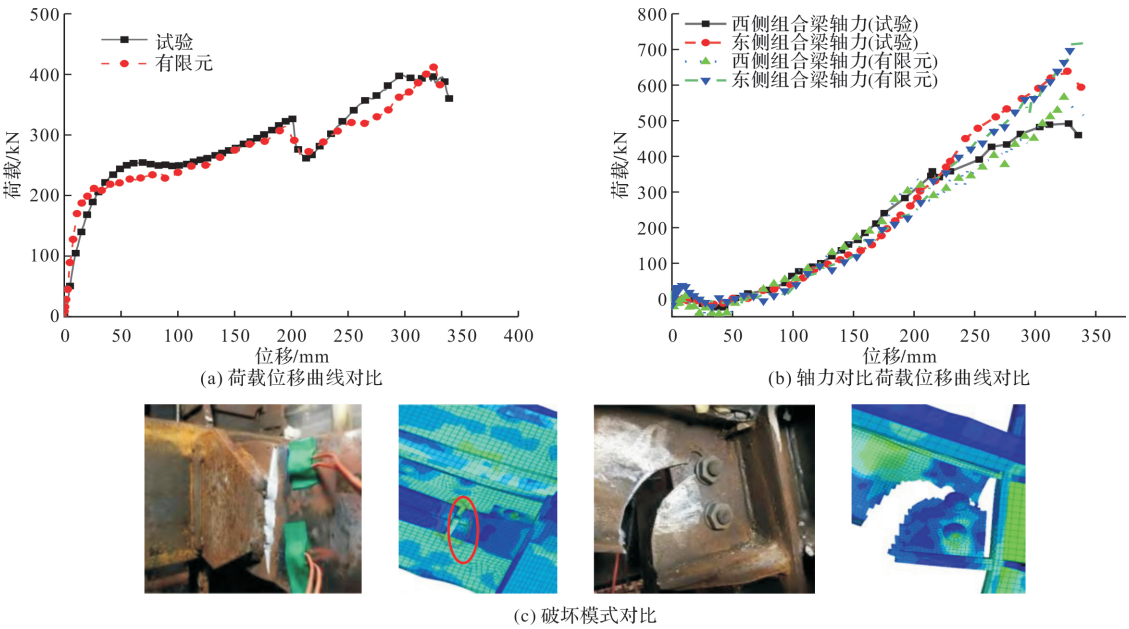


图 6 有限元模型验证

Fig. 6 Validation of the FE model

3 参数分析

基于上述有限元建模方法, 建立 1.1 节所述的足尺腹板开孔模型, 分析了开孔端距、开孔直径等关键参数对腹板开孔梁柱子结构抗倒塌性能的影响.

3.1 开孔端距

为了研究不同端距  $D$  (开孔圆心到柱翼缘外表面距离) 对腹板开孔组合梁柱子结构抗倒塌性能的影响, 本文控制单一不变量, 开孔直径为 270 mm ( $0.6H$ ), 设计了不同端距从 340 mm ( $0.75H$ ) 到 610 mm ( $1.35H$ ) 共 10 个模型, 其中,  $H$  为子结构的梁高. 模型编号如表 1 所示.

表 1 不同开孔端距模型设计

Tab. 1 Design of models with different opening end distances

模型编号	开孔端距/mm	孔直径/mm
D340	340( $0.75H$ )	270( $0.60H$ )
D360	360( $0.80H$ )	
D380	380( $0.84H$ )	
D405	405( $0.90H$ )	
D430	430( $0.96H$ )	
D450	450( $1.00H$ )	
D470	470( $1.04H$ )	
D500	500( $1.11H$ )	
D550	550( $1.22H$ )	
D610	610( $1.36H$ )	



### 3.1.1 荷载-位移曲线及破坏模式分析

图7为不同开孔端距下的荷载-位移曲线对比,在弹性阶段,开孔端距对子结构的抗倒塌性能影响很小,但随着位移的增大,子结构的承载能力与开孔端距呈正相关.当端距越大时,开孔位置离刚性节点越远,两次断裂点的荷载和位移的降低幅度越小.这是由于栓焊节点在加盖板后会显著增加节点的抗弯刚度,而当开孔位置离盖板末端越近时,截面突变会导致此位置的抗弯刚度降低,进而降低模型的承载能力.此外,当开孔端距小于梁高时,首次断裂点的承载能力及位移会显著降低.

不同开孔端距下的子结构的破坏模式相似,表现为:失效柱位置两侧孔下部腹板发生第一次断裂,且断裂点位置不在孔对称轴处;随着开孔端距的增大,断裂点位置逐渐接近对称轴,随后裂缝迅速向下发展,导致受拉翼缘断裂;此后,孔上侧发生第二次断裂,直至构件被彻底拉断,同时伴随着边柱孔上部腹板的破坏,最终破坏模式如图8所示.

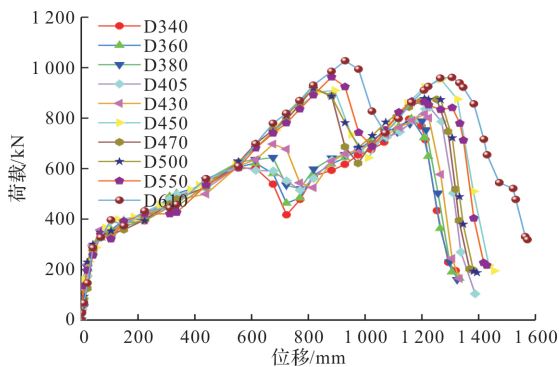


图7 不同开孔端距下的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of different opening end distances



图8 破坏模式

Fig. 8 Failure mode

但是,不同开孔端距会导致边柱孔的破坏情况略有差异.当开孔端距较小时(D340~D405),孔两侧抗弯刚度差别较大,在受力状态较大时下更容易导致孔的受拉腹板撕裂;而开孔端距较大时(D430~D610),孔只会由圆形变成椭圆形,同时下翼缘的局部屈曲,上部受拉腹板并不会撕裂.

### 3.1.2 抗力机制分析

腹板开孔组合梁柱子结构简化模型如图9所示,假设在同一根梁上延梁跨长方向上各截面轴力近似相等,组合梁柱子结构的总抗力 $P$ ,由悬链线作用下的抗力即轴力的竖向分量 $P_C$ ,和梁机制作用下的抗力即剪力的竖向分量 $P_E$ 组成,则两种抗力机制的抗力可按公式(5)和(6)计算<sup>[16]</sup>.

$$N_1 = N_2 = N_L, N_3 = N_4 = N_R \quad (4)$$

$$P_C = N_L \sin \theta + N_R \sin \theta \quad (5)$$

$$P_F = P - P_C \quad (6)$$

式中: $N_L$ 、 $N_R$ 分别为左跨和右跨组合梁的轴力; $P_C$ 为悬链线机制作用下的抗力, $P_F$ 为梁机制作用下的抗力; $\theta$ 为组合梁的梁端转角.

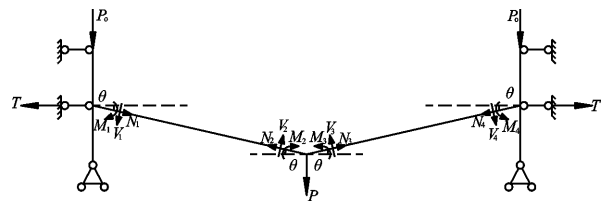


图9 子结构力学分析模型

Fig. 9 Structural mechanics analysis model

相对于悬链线机制抗力,开孔端距对子结构的梁机制抗力影响较小,如图10(a)所示.但当开孔圆心在盖板末端附近时,结构会提前发生第一次断裂.失效柱两侧孔下部受拉腹板开始撕裂导致下部受拉翼缘彻底断裂,而翼缘主要提供抗弯承载力,所以承载力会提前下降,从而导致不同端距下第一次断裂时抗弯承载力断裂的位移会有所不同.

不同端距对子结构悬链线机制抗力影响较大,如图10(b)所示.当端距在 $1.0H$ 以内时,第一次断裂点处悬链线机制抗力约为端距大于 $1.0H$ 时第一次断裂点处悬链线机制抗力的50%,悬链线机制抗力从D430(403 kN)到D450(715 kN)增长了77.4%.这是由于当开孔圆心在节点盖板末端附近时,无盖板的局部加强作用与腹板开孔后局部削弱的双重影响导致孔两侧抗弯刚度改变,又因为子结构局部抗剪的不足使结构在承载过程中就会提前在此处断裂,降低梁柱节点的转动能力,轴力无法充分发展,使得悬链线机制抗力的发展程度不同.端距越大,开孔圆心离盖板末端越远,盖板末端梁截面的变化越平缓,对节点的影响越小,悬链线机制抗力越大.

综上所述,不同开孔端距模型的破坏模式相似,但是,会影响边柱孔的破坏情况和圆孔处断裂点位置;开孔端距主要通过影响子结构悬链线机

制的抗力,进而影响模型的承载能力;腹板开孔型组合梁柱子结构的抗力机制可分为弹性阶段、梁机制阶段和梁机制与悬链线机制混合阶段;建议此类节点组合梁柱子结构的开孔端距不宜小于梁高。

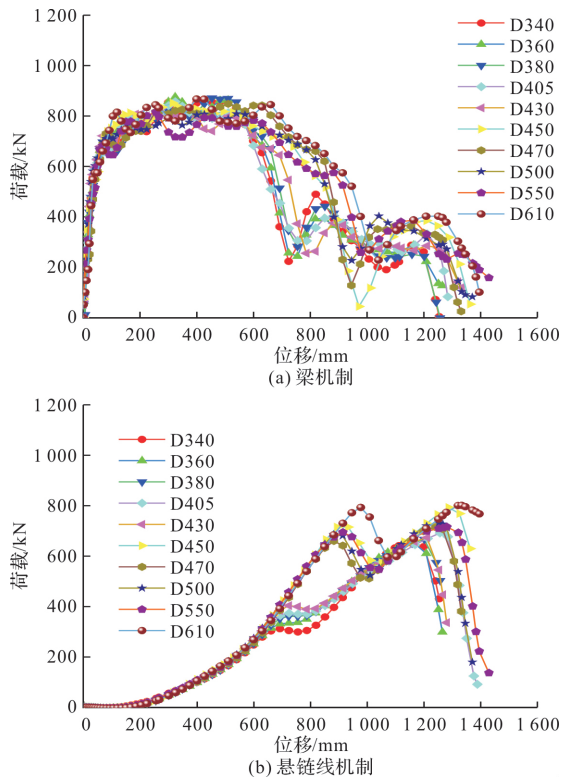


图 10 机制抗力分析

Fig. 10 Analysis of mechanism resistances

### 3.2 开孔直径

为研究开孔直径对腹板开孔组合梁柱子结构的影响,通过控制单一变量,即保证开孔端距为 $1.00H$ 等参数不变的情况下,设计开孔直径分别为 $230\text{ mm}(0.5H)$ 到 $370\text{ mm}(0.82H)$ 共8个模型,如表2所示。

表 2 不同开孔直径模型设计

Tab. 2 Design of models with different hole diameters

模型编号	开孔直径/mm	开孔端距/mm
d230	230(0.50H)	450(1.00H)
d250	250(0.56H)	
d270	270(0.60H)	
d290	290(0.64H)	
d310	310(0.69H)	
d330	330(0.73H)	
d350	350(0.78H)	
d370	370(0.82H)	

#### 3.2.1 荷载位移曲线及破坏模式分析

图 11 为不同开孔直径下荷载位移曲线对比,

在弹性阶段,开孔直径对子结构的抗倒塌性能影响很小。随着位移的增大,开孔直径与模型的承载能力呈负相关,且主要影响子结构第一次断裂点的承载能力及位移,而对第二次断裂点影响较小。与 d230(1 030 kN)的首次断裂荷载相比, d290(905 kN)降低了 12.1%, d370(765 kN)降低了 25.73%。这是由于腹板作为主要的抗剪构件,孔径越大,腹板的削弱越大,腹板的抗剪能力越差,最不利截面越明显,当直径大到一定程度后,腹板几乎完全失去抗剪能力,进而影响结构的承载能力。

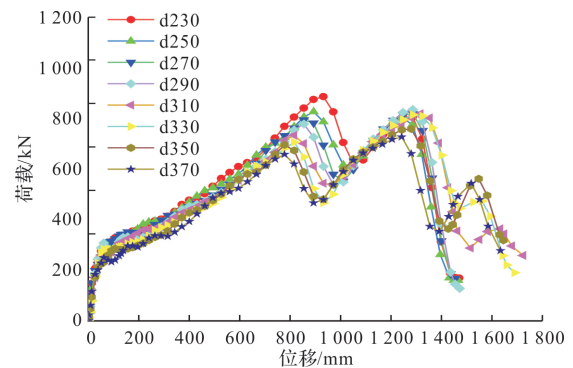
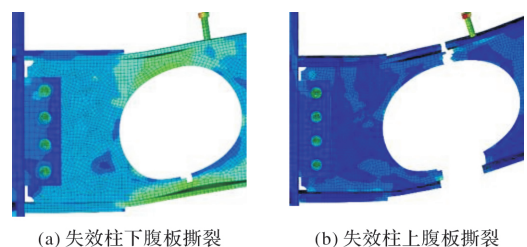


图 11 不同开孔直径模型的荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of models with different hole diameters

不同开孔直径的子结构首次断裂破坏模式相似,均表现为:随着位移增长,孔洞变为椭圆形,失效柱两侧孔洞下侧受拉腹板开始出现裂缝(图 12(a)),并传递至翼缘使翼缘发生断裂;此后, d230~d290 第二次破坏为失效柱两侧孔洞上侧腹板出现裂缝并传递至翼缘(图 12(b)),此时模型被彻底拉断。 d310~d370 第二次破坏为边柱节点处孔洞上部受拉腹板发生断裂,(图 12(c));之后失效柱节点两侧孔洞上侧腹板发生断裂且传递至翼缘导致翼缘发生断裂,同时,边柱孔洞下部腹板也出现裂缝(图 12(d))。这是由于开孔直径过大导致对腹板削弱程度过大,承受荷载能力降低,因此,边柱孔洞先于失效柱两侧孔洞破坏。此外,当开孔直径过大时,腹板几乎完全失去抗剪能力,此时容易发生脆性断裂,不利于结构安全。



(a) 失效柱下腹板撕裂

(b) 失效柱上腹板撕裂

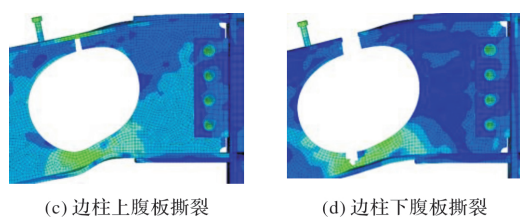


图 12 失效过程

Fig. 12 Failure process

### 3.2.2 抗力分析

图 13(a)是不同开孔直径的子结构梁机制抗力发展曲线,曲线的整体规律基本一致.首次断裂前,随开孔直径的增大,对腹板的削弱越严重,梁机制作用下的抗力越小.孔径的不同会导致结构发生的断裂次数不同,但所有模型第一次和第二断裂均由悬链线机制抗力和梁机制抗力共同作用抵抗外部荷载,第三次断裂则由悬链线机制抗力抵抗外荷载.在后期,梁机制作用下的抗力会出现负值,这是因为中柱节点发生破坏后,形心轴偏移产生偏心距所导致.

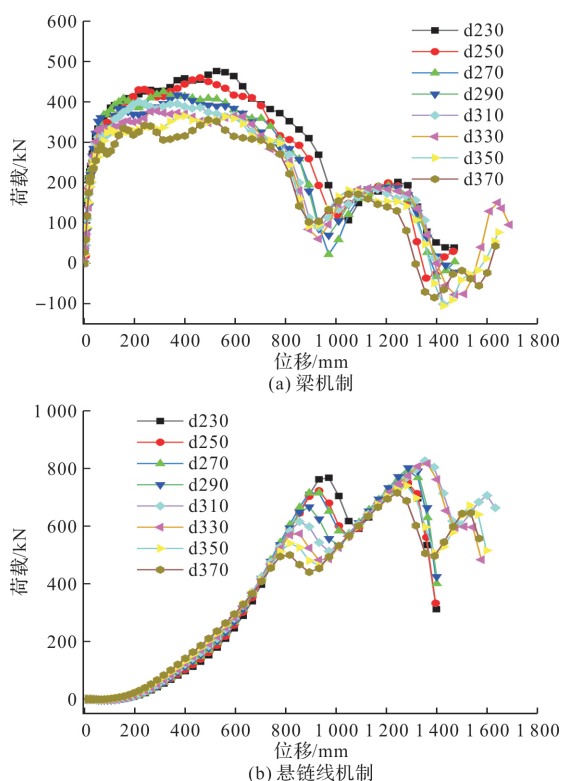


图 13 机制抗力分析

Fig. 13 Analysis of mechanism resistances

图 13(b)为模型在不同开孔直径下的悬链线机制抗力发展曲线,首次断裂时,悬链线机制抗力随着孔径的增大而减小.这是由于孔径的增大减小了组合梁最不利截面的面积,限制了钢梁的轴力发展,从而影响悬链线效应的发挥,降低了悬链线作用下的抗力.首次断裂发生后,悬链线作

用下抗力下降幅度随直径的增加而减小,这是由于孔径的增大使其悬链线作用下抗力发展不充分.

综上所述,开孔直径会影响模型的破坏模式及承载能力,子结构开孔直径越大,对腹板局部的削弱程度越大,在加载过程中此处腹板发挥的作用越小,当直径过大时,基本上只有翼缘发挥作用,孔附近会很快形成塑性铰并断裂,不利于悬链线阶段抗力的发展.为保证结构具有良好的抗倒塌性能,建议此类节点开孔直径不应大于  $0.64H$ .

## 4 结论

通过对实腹式组合梁柱子结构的抗倒塌试验进行数值模拟,基于已验证的有限元建模方法建立了腹板开孔型组合梁柱子结构的足尺模型,分析了开孔端距、开孔直径对子结构抗倒塌性能的影响,并给出关于腹板开孔组合框架结构的相关设计建议.结论如下:

(1)腹板开孔型组合梁柱子结构的破坏模式主要表现为:腹板圆孔变为椭圆形,圆孔下翼缘发生局部屈曲;中柱孔下部腹板发生断裂,随后传递至翼缘导致翼缘断裂;中柱孔上腹板开始断裂及边柱孔上部腹板的破坏,直至构件被彻底拉断.不同开孔端距会影响结构边柱孔的破坏情况,而不同开孔直径会影响结构的断裂位置;

(2)模型的承载能力与开孔端距呈正相关,与开孔直径呈负相关,腹板开孔组合梁柱子结构的抗力机制可分为弹性阶段、梁机制阶段和梁机制与悬链线机制混合阶段,且开孔端距与开孔直径对子结构的抗力发展影响较大;

(3)为保证腹板开孔型组合梁柱子结构具有良好的抗倒塌性能,建议此类结构的开孔端距不宜小于梁高;开孔直径应不大于  $0.64H$ .

## 参考文献 References

- [1] ELLINGWOOD B. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.
- [2] LU X Z, GUAN H, SUN H, et al. A preliminary analysis and discussion of the condominium building collapse in surfside1[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(5): 1097-1110.
- [3] ADAM J M, PATRISI F, SAGASETA J, et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century[J]. Engineering Structures, 2018, 173: 122-149.

- [4] 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, LV Dagang, LU Xinzhen, et al. Research progress and development trends on progressive collapse resistance of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 1-28.
- [5] ZHONG W H, TAN Z, TIAN L M, et al. Collapse resistance of composite beam-column assemblies with unequal spans under an internal column-removal scenario [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110143.
- [6] 任鲁明,杨波,孔德阳. 不同边界条件下采用半刚性节点三维组合楼板子结构连续倒塌行为试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 34-42.  
REN Ruming, YANG Bo, KONG Deyang. Experimental study on progressive collapse behaviour of 3D steel-concrete floor substructures with semi-rigid connections under different boundary conditions[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 34-42.
- [7] WANG W, WANG J J, SUN X, et al. Slab effect of composite subassemblies under a column removal scenario[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 141-155.
- [8] 陈俊岭,舒文雅,李金威. 框架结构典型梁柱节点的抗连续倒塌性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 53-58,135.  
CHEN Junling, SHU Wenya, LI Jinwei. Performance of various steel moment connections under progressive collapse scenario [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(1): 53-58,135.
- [9] 孟宝,钟炜辉,郝际平,等. 平齐端板连接钢框架梁柱子结构的抗倒塌性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 376-382.  
MENG Bao, ZHONG Weihui, HAO Jiping, et al. Analysis of collapse resistance of beam-column substructure with flush end plate of steel frame[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(3): 376-382.
- [10] 乔惠云,郭壮壮,陈誉,等. 平面钢框架在撞击荷载作用下的抗连续倒塌分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(4): 176-184.  
QIAO Huiyun, GUO Zhuangzhuang, CHEN Yu, et al. Anti-progressive collapse analysis for plane steel frame under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(4): 176-184.
- [11] 李波,杨庆山,茹继平,等. 梁腹板开圆孔的钢框架抗震性能研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 64-73.  
LI Bo, YANG Qingshan, RU Jiping, et al. Investigation on aseismic behaviors of steel moment resisting frame including opening in beam web[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 64-73.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,钢结构设计标准: GB50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Standard for Design of Steel Structures: GB50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [13] 谭政,钟炜辉,段仕超,等. 不同梁线刚度情形下组合梁柱子结构抗倒塌性能研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 57-66.  
TAN Zheng, ZHONG Weihui, DUAN Shichao, et al. Research on anti-collapse performance of composite beam-column substructures with different beam line stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10): 57-66.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,混凝土结构设计规范:GB50010—2010. [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, Code for Design of Concrete Structures: GB50010—2010. [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [15] YU H L, JEONG D Y. Application of a stress triaxiality dependent fracture criterion in the finite element analysis of unnotched charpy specimens[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010, 54(1): 54-62.
- [16] MENG B, ZHONG W H, HAO J P, et al. Anti-progressive Collapse Performance Analysis of Composite Frame with Openings on Beam Web[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173(6): 1-14.

(编辑 沈波)