

引用本文:钟炜辉,段仕超,高迪,等.部分约束下组合梁柱子结构抗连续倒塌机理[J].建筑科学与工程学报,2022,39(3):45-54.  
ZHONG Wei-hui, DUAN Shi-chao, GAO Di, et al. Anti-progressive Collapse Mechanism of Composite Beam-column Substructure with Partial Boundary Constraints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 45-54.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09111

## 部分约束下组合梁柱子结构抗连续倒塌机理

钟炜辉<sup>1,2</sup>, 段仕超<sup>1</sup>, 高迪<sup>1</sup>, 谭政<sup>1</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:**为研究部分约束钢框架组合梁柱子结构的抗连续倒塌机理,对其进行数值模拟研究。利用ABAQUS软件建立了1:3缩尺的部分边界约束组合梁柱子结构的精细化数值模型,模型计算结果与试验结果吻合较好,验证了有限元建模方法的正确性。在此基础上建立足尺模型,分析边界约束侧向刚度、边柱尺寸、边柱轴压比对部分边界约束下组合梁柱子结构的抗连续倒塌性能的影响。结果表明:当弹簧约束系数 $n < 1$ 时,边界约束侧向刚度对组合梁柱子结构的抗连续倒塌性能影响显著,增大侧向约束刚度可有效提高组合梁柱子结构的抗连续倒塌性能;当弹簧约束系数 $n > 1$ 时,增大侧向约束刚度对组合梁柱子结构的抗连续倒塌性能影响较小;边柱尺寸过大或过小均不利于组合梁柱子结构抗连续倒塌性能的发,当梁柱线刚度比处于0.6~1.1区间时,边柱尺寸越大,悬链线机制发挥越充分,组合梁柱子结构的抗连续倒塌性能越好;边柱轴压比对不同机制抗力的占比影响不大,但会影响组合梁柱子结构的承载能力,当边柱轴压比取0.3时,组合梁柱子结构的抗连续倒塌性能发挥最佳。

**关键词:**连续倒塌;数值模拟;梁柱子结构;侧向刚度;边柱尺寸

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)03-0045-10

### Anti-progressive Collapse Mechanism of Composite Beam-column Substructure with Partial Boundary Constraints

ZHONG Wei-hui<sup>1,2</sup>, DUAN Shi-chao<sup>1</sup>, GAO Di<sup>1</sup>, TAN Zheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

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

**Abstract:** In order to investigate the anti-progressive collapse mechanism of composite beam-column substructure with partial boundary constraints, numerical simulation was carried out. The refined numerical model of a 1:3 scaled partial boundary constrained composite beam-column substructure specimen was established based on the ABAQUS software. The model calculation results were in good agreement with the test results, which verified the correctness of the finite element modeling method. On the basis, a full-scale model was established to analyze the influence of the lateral stiffness of the boundary constraint, the size of the side column, and

收稿日期:2021-09-08

基金项目:陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JY033);陕西省教育厅专项科研计划项目(20JK0713)

作者简介:钟炜辉(1980-),男,广东佛山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhongweihui1980@163.com。

the axial compression ratio of the side column on the anti-progressive collapse performance of the composite beam-column substructure with partial peripheral constraints. The results show that the lateral stiffness of the boundary restraint has a significant influence on the anti-progressive collapse performance of the composite beam-column substructure when the spring restraint coefficient  $n < 1$  and the anti-progressive collapse performance of the substructure is effectively improved when increasing the lateral restraint stiffness of the beam-column substructure. The increase in the lateral restraint stiffness has little influence on the anti-progressive collapse performance of the composite beam-column substructure when the spring restraint coefficient  $n > 1$ . Too large or too small side column size is not conducive to the performance of the anti-progressive collapse performance of the composite beam-column substructure. The larger the side column size, the better the anti-progressive collapse performance of the substructure and the catenary mechanism when the beam-column stiffness ratio is between 0.6-1.1. The side column axial compression ratio has little effect on the proportion of different mechanism resistance, but it can affect the bearing capacity of the composite beam-column substructure. The composite beam-column substructure exerts the best anti-progressive collapse performance when the side column axial compression ratio is 0.3.

**Key words:** progressive collapse; numerical simulation; beam-column substructure; lateral stiffness; size of side column

## 0 引言

建筑结构的连续性倒塌是结构在经过初始的局部破坏后,扩展到与破坏构件相连的其他构件,最终造成了与初始破坏不成比例的破坏<sup>[1]</sup>。这种破坏对人们的生命财产有着巨大的威胁。因此,结构抗连续性倒塌性能研究成为土木工程行业的研究热点。

近年来,国内外众多学者对结构的抗连续倒塌性能进行了一系列研究<sup>[2-5]</sup>。梁柱子结构具有受力明确、结构形式简单、便于试验等优点,是目前最为常见的研究对象,当前研究主要集中在节点类型<sup>[6-8]</sup>、高跨比<sup>[9-10]</sup>、压型钢板<sup>[11]</sup>、楼板组合作用<sup>[12-13]</sup>、动态响应<sup>[14-15]</sup>等对子结构抗倒塌性能的影响。由于建筑结构中发生倒塌破坏的构件具有不确定性,在实际情况下,失效柱的位置是随机的,而不同的边界约束(失效柱位置)会影响结构的抗力机制。因此,探究不同边界约束的子结构抗倒塌性能是十分必要的。黄华等<sup>[16]</sup>认为柱失效位置和柱距是影响钢筋混凝土(RC)框架结构连续倒塌能力最重要的参数。Lew等<sup>[17]</sup>基于钢筋混凝土梁柱子结构,重点探究侧向约束对子结构抗倒塌能力的影响。Yu等<sup>[18]</sup>基于试验和理论分析方法讨论了边界条件对钢筋混凝土梁柱子结构的抗倒塌性能影响。Kang<sup>[19]</sup>通过试验研究了钢筋混凝土梁柱子结构在倒塌过程中的破坏模式,对比分析了各机制的抗力

发展情况。上述研究对象大多是混凝土梁柱子结构,而对于组合梁柱子结构的边界条件研究较少。此外,由于试验成本较大,无法对所有关键参数进行试验研究,当前研究人员主要通过数值模拟的方式对相关参数进行分析<sup>[20-22]</sup>。

基于上述情况,课题组进行了不同边界条件下组合梁柱子结构的抗连续倒塌试验<sup>[23]</sup>。当结构的次边柱发生破坏时,两跨三柱的子结构一侧有梁端约束,另一侧无梁端拉结,称为部分约束子结构。次边柱失效的部分约束组合梁柱子结构(WUFG-S)的抗倒塌性能影响因素众多,本文以WUFG-S试件为研究对象,利用ABAQUS有限元软件分析边界约束侧向刚度、边柱尺寸、边柱轴压比等参数对组合梁柱子结构抗连续倒塌性能的影响。

## 1 数值模型建立

### 1.1 模型概述

根据钢结构设计标准<sup>[24]</sup>设计了一个尺寸为4 500 mm×7 500 mm×3 300 mm的6层钢框架组合结构。在结构的倒塌分析中,直接影响区域被认为是在失效柱的上方楼层和与失效柱相连的两跨区域,此区域是结构连续倒塌分析和设计的重点;其他区域称为间接影响区域,此区域主要为直接影响区域提供侧向约束<sup>[25]</sup>。本文的主要研究对象是直接影响区域,为便于分析可将其简化为图1所示的两

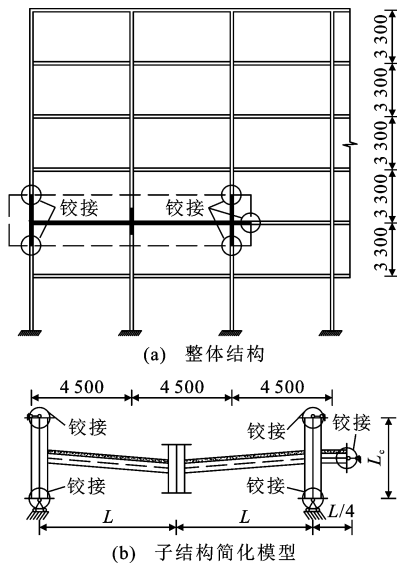


图 1 部分边界约束的组合梁柱子结构模型(单位:mm)  
Fig. 1 Model of Composite Beam-column Substructure with Partial Boundary Constraints (Unit:mm)

跨三柱型子结构,其中  $L$  为组合梁的跨长,  $L_c$  为边柱长度。边柱上下层的反弯点近似位于层高中部,有梁端约束侧伸出边柱  $L/4$  长度以模拟间接影响区域的水平拉结作用<sup>[26]</sup>。

本文所建立的足尺模型梁柱截面尺寸分别为 HM450×300×11×18、HW400×400×13×21,梁跨长 4 500 mm,边柱长 3 300 mm。钢材型号为 Q235B,混凝土强度等级为 C25,楼板有效宽度为 1 500 mm,厚度为 100 mm,保护层厚度为 20 mm。

钢筋型号为 HPB300,纵向受力钢筋采用  $\phi 14@150$ ,水平分布钢筋为  $\phi 10@200$ ,钢筋网双层双向布置。钢梁和楼板间通过双排布置的直径为 19 mm 的栓钉连接,排距为 150 mm,间距为 210 mm。梁柱节点采用加梯形盖板栓焊连接节点(CPS),剪切板尺寸为 340 mm×110 mm×14 mm,上下盖板厚 10 mm。螺栓采用 10.9 级 M22 高强摩擦型螺栓。相关节点细部构造及构件详细尺寸如图 2 所示。

## 1.2 材料本构关系

通过 ABAQUS 软件进行有限元建模,钢筋采用双折线强化本构;钢材屈服强度为 235 MPa,极限抗拉强度为 370 MPa,采用二次流塑四阶段模型本构<sup>[26]</sup>。钢材的断裂采用延性金属失效准则,参考文献<sup>[27]</sup>、<sup>[28]</sup>,确定断裂应变、三轴应力、应变率等参数,使钢材达到对应的断裂应变值时发生断裂;螺栓采用 10.9 级 M22 高强摩擦型螺栓,螺栓预紧力为 190 kN,屈服强度为 900 MPa,极限抗拉强度为

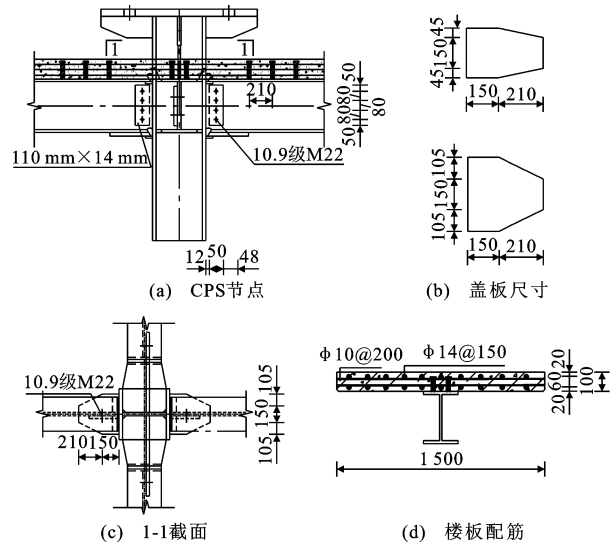


图 2 节点构造及楼板配筋(单位:mm)  
Fig. 2 Connection Structure and Slab Reinforcement (Unit:mm)

1 000 MPa;混凝土材料采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附录 C<sup>[29]</sup>中的混凝土单轴受拉及受压本构关系,利用塑性损伤模型模拟混凝土的受力性能。

## 1.3 边界条件、单元类型与网格划分定义

通过在中柱柱顶施加竖向位移模拟中柱失效过程,采用平滑分析步幅值,约束平面外侧移和扭转。两边柱顶端施加轴压比为 0.3 的竖向荷载,模拟上部结构对边柱的荷载作用,边柱底部设置为铰接。右侧梁端通过建立轴向连接单元与固定板件连接以模拟周边约束的拉结作用,轴向连接单元另一侧设为固定边界,周边构件为子结构提供的侧向刚度(简化为轴向弹簧刚度) $K$ 输入值可通过组合梁为子结构提供的侧向刚度  $K_{ab}$  与边柱为子结构提供的侧向刚度  $K_{ac}$  按式(1)~(4)计算<sup>[30]</sup>。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{ab}} + \frac{1}{K_{ac}} \quad (1)$$

$$K_{ab} = K_b + K_p + K_r \quad (2)$$

$$K_b = EA_b/L, K_p = EA_p/L, K_r = EA_r/L \quad (3)$$

$$K_{ac} = 48EI_c/L^3 \quad (4)$$

式中: $K_b$ 、 $K_p$ 、 $K_r$  分别为钢梁、压型钢板、楼板内纵向钢筋提供的侧向刚度; $E$  为材料的弹性模量; $A_b$ 、 $A_p$  分别为钢梁、压型钢板的截面面积; $A_r$  为纵向钢筋的截面面积之和; $I_c$  为边柱的截面惯性矩。

钢筋选用 T3D2 三维桁架单元,压型钢板选用 S4R 壳单元,其余部件选用 C3D8R 实体单元进行建模。进行网格灵敏度分析,经过多次计算确定最适合的网格尺寸,相关部件网格布种尺寸为:钢柱近似

40 mm 布种;钢梁近似 40 mm 布种;混凝土板近似 30 mm 布种;钢筋近似 20 mm 布种;盖板、剪切板和螺栓等部件均以 5 mm 布种。在节点断裂位置等应力集中部位进行了密集的网格划分,近似 5 mm 布种,并与非加密区设置了网格过渡,这既保证了计算的效率,也可以尽可能反映组合梁柱子结构关键区域的受力特性。

#### 1.4 接触关系定义

剪切板和盖板与梁柱截面通过绑定约束模拟焊接连接;钢筋、栓钉与上盖板采用嵌入命令模拟与混凝土板的接触;梁柱节点处剪切板、梁和螺栓等连接部位选用通用接触的方法进行模拟,切向方向接触为库仑摩擦,摩擦因数取 0.3,法向接触属性选择硬接触。在螺栓的两侧表面施加均布荷载来模拟螺栓预紧力。在数值模拟过程中,不考虑材料的初始缺陷和焊接残余应力的影响。

## 2 模型验证

### 2.1 试验概况

为验证有限元模型及建模方法的正确性,选取文献[23]中的 WUFG-S 试件进行对比分析。WUFG-S 试件为 1:3 的缩尺模型,其梁截面的尺寸为 HM150×100×6×9,柱截面尺寸为 HW150×150×8×10,梁跨长 1 500 mm,两边柱长 1 100 mm。试件相关材性、各部件及节点详细尺寸参考文献[23],根据试件尺寸通过 ABAQUS 软件建立了对应的精细化有限元模型,如图 3 所示。

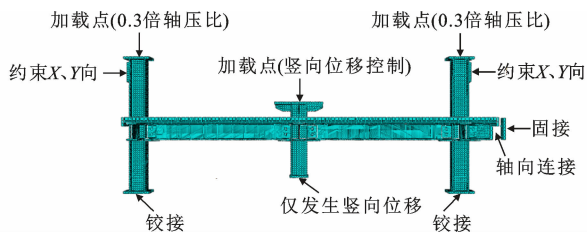


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model

### 2.2 模拟结果对比

图 4 为试验与有限元分析的荷载-位移曲线对比。由图 4 可知,曲线整体发展趋势相同,试件首次断裂点荷载( $A_1 = 302$  kN、 $A_2 = 293$  kN)相差 3%,钢梁完全断裂点荷载( $B_1 = 367$  kN、 $B_2 = 360$  kN)相差 2%,表明有限元模拟的荷载-位移曲线与试验曲线吻合较好。图 5 为试验与有限元分析的破坏模式对比。由图 5 可知,数值分析结果与试验的破坏模式相似,表明所建立的有限元模型可准确地模拟出

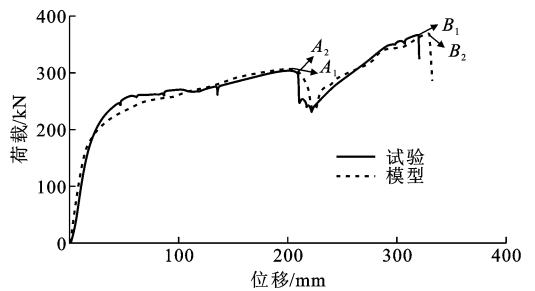
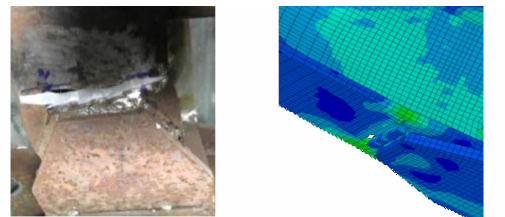
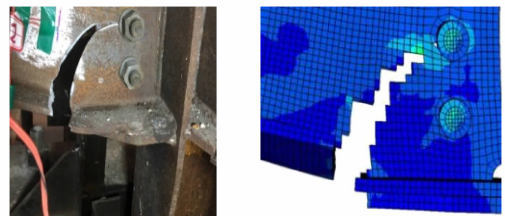


图 4 荷载-位移曲线对比

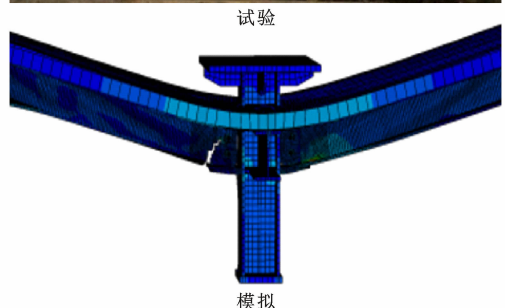
Fig. 4 Comparison of Load-displacement Curves



试验  
模拟  
(a) 无约束侧梁下翼缘母材断裂



试验  
模拟  
(b) 无约束侧钢梁腹板完全断裂



试验  
模拟  
(c) 梁柱子结构整体破坏形态

图 5 破坏模式对比

Fig. 5 Comparison of Failure Modes

梁柱子结构的破坏过程。综上所述,本文所建立的精细化有限元模型计算结果与试验结果吻合较好,可在此基础上进行后续参数分析。

### 3 参数分析

基于第1节数值模型的建模方法,建立了足尺模型,研究周边约束、边柱尺寸、边柱轴压比对梁柱子结构抗倒塌能力的影响,分析梁柱子结构的抗倒塌性能。

#### 3.1 边界约束

梁内悬链线机制的抗力主要取决于梁端的有效拉结力和梁端转角,边界约束决定子结构梁端拉结力和梁端转角,故子结构边界约束对其悬链线机制的发展影响显著。梁柱子结构的轴向约束刚度由  $K_{ab}$ 、 $K_{ac}$  和  $K_{as}$  构成,其子结构的简化模型如图6所示。

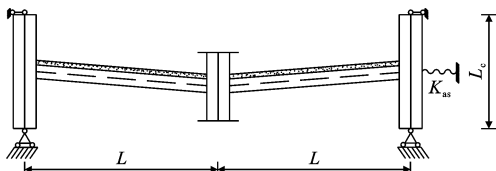


图6 部分边界约束梁柱子结构简化模型

Fig. 6 Simplified Model of Beam-column Substructure with Partial Boundary Constraints

引入弹簧约束系数  $n$ ,  $n$  为子结构周边约束构件弹簧的侧向刚度  $K_{as}$  与子结构自身为梁端提供的侧向刚度  $K$  (组合梁与边柱提供的侧向刚度) 的比值<sup>[30]</sup>, 计算公式见式(5)。梁柱线刚度比  $k$  的计算公式见(6)。

$$n = \frac{K_{as}}{K} = \frac{K_{as}(K_{ab} + K_{ac})}{K_{ab}K_{ac}} \quad (5)$$

$$k = \frac{EI_B/L}{EI_C/L_c} \quad (6)$$

式中:  $I_B$  为组合梁的截面惯性矩。

以部分约束子结构为研究对象,按照表1改变子结构有约束侧梁端的侧向刚度,探究有约束侧的拉结强度对子结构抗倒塌性能的影响。

表1 不同侧向刚度的梁柱子结构设计参数

Table 1 Design Parameters of Beam-column Substructure with Different Lateral Stiffnesses

模型编号	$n$	$K_{as}$	$K$	$K_{ab}$	$K_{ac}$	$k$
WUFG-S1	0.00	0	110 000	878 000	126 000	0.75
WUFG-S2	0.25	27 500				
WUFG-S3	0.50	55 000				
WUFG-S4	0.75	82 500				
WUFG-S5	1.00	110 000				
WUFG-S6	1.50	165 000				
WUFG-S7	$\infty$	$\infty$				

#### 3.1.1 不同侧向刚度下荷载-位移曲线分析

图7(a)为不同侧向约束刚度下梁柱子结构模型荷载-位移曲线对比情况。由图7(a)可知,在不同侧向约束刚度情况下曲线中均有2个显著峰值点,这是由于无约束侧钢梁翼缘受拉发生断裂后,荷载发生突降,随着加载位移的不断增大,裂缝沿弧形向上发展,两侧组合梁发生内力重分布,子结构会达到新的峰值点。在位移加载初期(小变形阶段),曲线无明显差距。

当  $n=0$  时,子结构两侧未得到有效拉结,在钢梁受拉翼缘首次断裂后,由于组合梁的悬链线机制未得到发挥,所以子结构后期承载力几乎稳定不变。当有侧向约束刚度影响时,子结构发生首次断裂后,随着位移的增大,梁柱子结构的悬链线机制得到了充分的发挥,组合梁的承载力得到明显提升。随着子结构侧向约束刚度的增大,子结构的首次断裂点荷载增加了36%,位移增加了16%;完全断裂点荷载增加了67%,位移增加了5%。说明子结构边界条件的加强可以提高梁柱子结构的承载力与极限变形能力。当  $n>1$  时,侧向约束刚度增强,梁柱子结构的承载力与中柱加载位移增大不明显,说明周边约束的加强只能在一定范围内提高子结构的极限变形和承载能力,但并不能无限提高。

#### 3.1.2 不同侧向刚度下抗力机制曲线对比

图7(b)、(c)为各模型的抗力发展曲线对比。由图7(b)、(c)可知,不同侧向刚度下的子结构抗力机制发展趋势相同,均经历了梁机制、梁机制向悬链线机制转化及悬链线机制阶段。在各子结构第1次发生断裂之前,主要由梁机制提供抗力抵抗外界荷载,悬链线机制发挥的作用有限。子结构首次发生断裂时,梁机制抗力发生突降,悬链线机制提供的抗力逐渐增大。在各子结构第2次断裂后,梁机制提供的抗力再次减小,在子结构整体抗力机制中占比较小,悬链线机制成为主要的抗力机制。

为具体分析倒塌过程中子结构各抗力机制占比,可利用梁机制贡献系数  $\alpha$  与悬链线机制贡献系数  $\beta$  来反映子结构各抗力机制的作用占比,  $\alpha$  与  $\beta$  可根据式(7)进行计算。

$$\alpha = P_F/P, \beta = P_C/P \quad (7)$$

式中:  $P_F$  为梁机制抗力;  $P_C$  为悬链线机制抗力;  $P$  为总抗力。

图7(d)、(e)为各模型子结构的梁机制贡献系数与悬链线机制贡献系数的发展变化情况,在整个梁柱子结构大变形过程中,由初期梁机制阶段向后

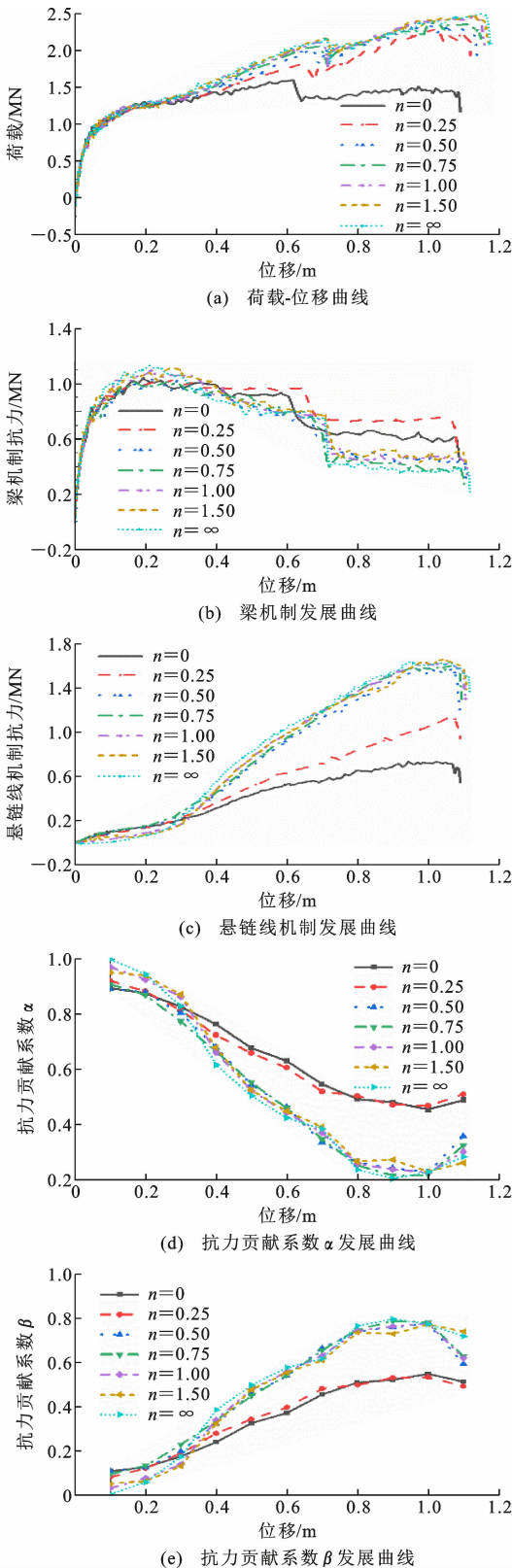


图7 不同侧向刚度下的梁柱子结构模型对比

Fig. 7 Comparison of Beam-column Substructures with Different Lateral Stiffesses

期的悬链线机制转化,悬链线机制最大可占总抗力的80%。随着周边约束提供的侧向刚度逐渐增大,

子结构的悬链线抗力机制贡献系数也相应变大。当 $n$ 增大时,梁机制抗力最大值增长10%,悬链线机制抗力最大值增长29%,这说明子结构边界条件的加强对梁机制抗力提升较小,但可显著提升子结构的悬链线机制抗力,从而提升子结构的后期承载力。

### 3.2 边柱尺寸

边柱为梁柱子结构端部提供轴向和转动的约束,故边柱截面尺寸变化会显著影响子结构的边界条件。在子结构承受外界荷载作用时,若边柱提供的刚度不足,则会引发结构水平方向上的连续性倒塌现象,若边柱的尺寸过大,不仅会造成材料的浪费,而且会影响整个结构的安全。为了进一步探究边柱尺寸对子结构抗连续倒塌性能的影响,以梁柱子结构左侧梁端的侧向约束刚度为0与右侧梁端的侧向刚度0.5K为前提,针对次边柱失效情形下的组合梁柱子结构的无约束侧边柱尺寸进行变参分析。

参数设计如表2所示,其中模型只改变边柱尺寸,其他构件尺寸不作变动。

表2 不同边柱尺寸的梁柱子结构参数

Table 2 Parameters of Beam-column Substructure with Different Side Column Sizes

模型编号	截面尺寸	截面惯性矩 $I_c/10^4 \text{ cm}^4$	$k$
WUFG-Sa	350 mm×350 mm× 12 mm×20 mm	4.11	1.38
WUFG-Sb	375 mm×375 mm× 12.5 mm×20 mm	5.12	1.11
WUFG-Sc	400 mm×400 mm× 13 mm×21 mm	6.54	0.87
WUFG-Sd	425 mm×425 mm× 13.5 mm×21 mm	7.92	0.72
WUFG-Se	450 mm×450 mm× 14 mm×22 mm	9.86	0.58
WUFG-Sf	475 mm×475 mm× 14.5 mm×22.5 mm	11.91	0.48
WUFG-Sg	500 mm×500 mm× 15 mm×24 mm	14.76	0.39

#### 3.2.1 不同边柱尺寸荷载-位移曲线分析

图8(a)为不同边柱截面尺寸情况下各模型的荷载-位移曲线对比。由图8(a)可知,各模型荷载-位移曲线发展趋势相似,且均具有2个荷载峰值点。在位移加载初期,各模型子结构的荷载-位移曲线相差不大,随着加载位移的逐渐增大,子结构的首次峰值点和二次峰值点差异显著。当梁柱线刚度比在一

定范围内减小时,结构的首次断裂点和完全断裂点荷载分别增加了 14% 和 34%,说明边柱尺寸的增大可以提高子结构整体的承载能力,但是当子结构梁柱线刚度比过于小时,子结构的承载能力不再增加。这是因为边柱尺寸过大时,边柱的节点域几乎不再发生转动,梁的变形主要体现在弯曲变形上,而子结构后期的承载力主要由梁内轴拉力提供,通过梁受弯而形成的抗力不再增大,故此时边柱尺寸的影响不大。如果子结构边柱尺寸过大,对其结构整体抗倒塌的承载力提升不明显。梁柱线刚度比值在 0.6~1.1 时,梁柱构件可协同作用使子结构具有较大的承载能力和变形能力。当模型子结构梁柱线刚度较为接近时,各模型子结构可最大限度地发挥整体的抗倒塌能力。

### 3.2.2 不同边柱尺寸抗力机制曲线对比

图 8(b)、(c)为各模型子结构抗力发展曲线对比,从图 8(b)、(c)可以看出,不同边柱截面尺寸的子结构均经历了梁机制、梁机制向悬链线机制转化及悬链线机制 3 个阶段。在子结构首次断裂后,悬链线机制抗力逐渐成为总抗力的主要部分,而对于梁柱线刚度比处于 0.6~1.1 的子结构,随着线刚度比的减小,梁机制抗力最大值增长约 10%,悬链线机制抗力最大值增长约 35%,说明边柱可为梁端提供有效的轴向与转动约束,有利于梁内悬链线机制的发挥。

图 8(d)、(e)为各模型子结构抗力贡献分配情况。随着边柱的截面尺寸逐渐增大,子结构的悬链线抗力机制贡献系数也相应变大,说明子结构边柱有效的拉结作用可显著提升子结构的悬链线机制抗力,进而提升整体的极限承载能力。模型 WUFG-Sa 的悬链线抗力机制贡献系数滞后其他子结构许多,说明边柱刚度过弱,边柱会先于组合梁发生破坏,限制悬链线机制的发挥,进而降低结构的整体抗倒塌能力。

### 3.3 边柱轴压比

在选取内部的子结构进行抗倒塌能力的研究时,通常会通过对边柱施加一定的轴压比模拟上部结构的荷载作用。为分析轴压比对子结构抗倒塌性能的影响,基于子结构试验的边界条件,以部分约束组合梁柱子结构为研究对象,探究不同轴压比对梁柱子结构抗倒塌能力的影响程度。梁柱子结构的轴压比参数如表 3 所示。

#### 3.3.1 不同边柱轴压比荷载-位移曲线对比

图 9(a)为不同边柱轴压比下梁柱子结构模型

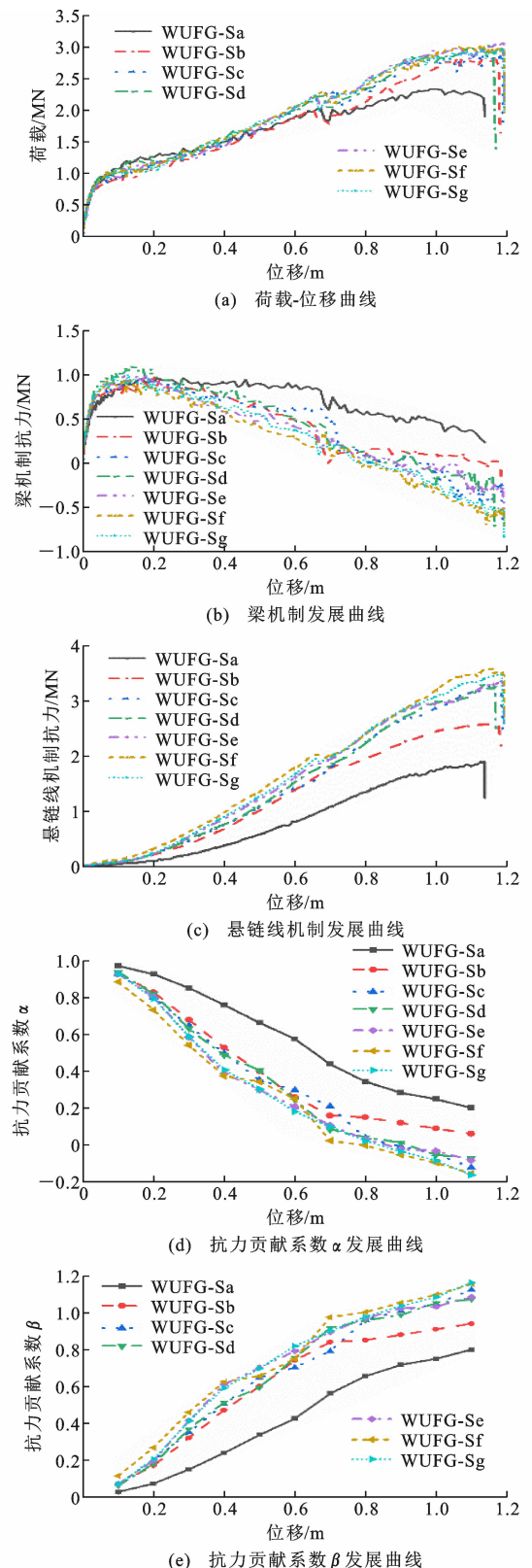


图 8 不同边柱尺寸的梁柱子结构模型对比

Fig. 8 Comparison of Beam-column Substructures with Different Side Column Sizes

的荷载-位移曲线对比,由图 9(a)可知,模型 WS-3 的二次完全断裂处峰值荷载与模型 WS-1、WS-2 相

表3 轴压比设计参数

Table 3 Design Parameters of Axial Compression Ratio

模型编号	WS-1	WS-2	WS-3	WS-4	WS-5	WS-6
轴压比	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6

合梁内竖向抗力的发挥,降低整体的承载力,与模型WS-3相比,WS-4、WS-5、WS-6的二次峰值荷载分别降低了8.5%、13%、22%。次边柱失效后的剩余子结构有一侧无水平的侧向拉结,当边柱上施加荷载过大时,会降低边柱的刚度,影响子结构的抗倒塌承载能力。

### 3.3.2 不同边柱轴压比抗力机制曲线对比

图9(b)、(c)为各子结构抗力发展曲线对比,在悬链线机制发展曲线中,轴压比为0.3的子结构提供的悬链线机制抗力最大,此时子结构周边的边界条件最大程度地保证悬链线机制抗力的充分发展。对于轴压比小于0.3的模型WS-1和WS-2,由于边柱轴向荷载施加有限,发生破坏时过小的轴压比会使无拉结端边柱无法提供合适的侧向约束刚度,限制了梁内竖向抗力的发展,导致提供的悬链线机制抗力有限。对于轴压比大于0.3的模型WS-4、WS-5和WS-6,由于边柱轴向荷载过大,在轴向荷载和梁端的水平拉结作用下会降低边柱的刚度,限制了梁内悬链线机制抗力的发展。

图9(d)、(e)为各模型子结构的梁机制贡献系数与悬链线机制贡献系数的发展变化情况。可以看出,不同轴压比情况下子结构的梁机制贡献系数和悬链线贡献系数差别不大,轴压比对于子结构抗力机制的占比情况影响较小。

## 4 结语

(1)随着梁端侧向刚度的逐渐增大,不同侧向刚度下的子结构破坏模式类似,均是在无侧向约束端钢梁下翼缘首先发生受拉断裂,而有侧向约束端钢梁下翼缘未发生任何断裂。当 $n < 1$ 时,提高梁柱子结构的侧向约束刚度可以提高子结构的悬链线机制抗力,进而提高子结构的后期承载力。

(2)边柱尺寸过小容易引发柱的弯曲破坏,限制后期悬链线机制抗力的发展,进而降低子结构后期极限承载力。边柱尺寸过大时,增大边柱尺寸对提升结构的承载力影响有限,不仅会造成材料的浪费,而且会影响整个结构的安全。对于梁柱线刚度比处于0.6~1.1的子结构,边柱可为梁端提供有效的轴向与转动约束,此时梁柱线刚度比减小有利于梁内悬链线机制的发挥,进而提升子结构整体的抗倒塌

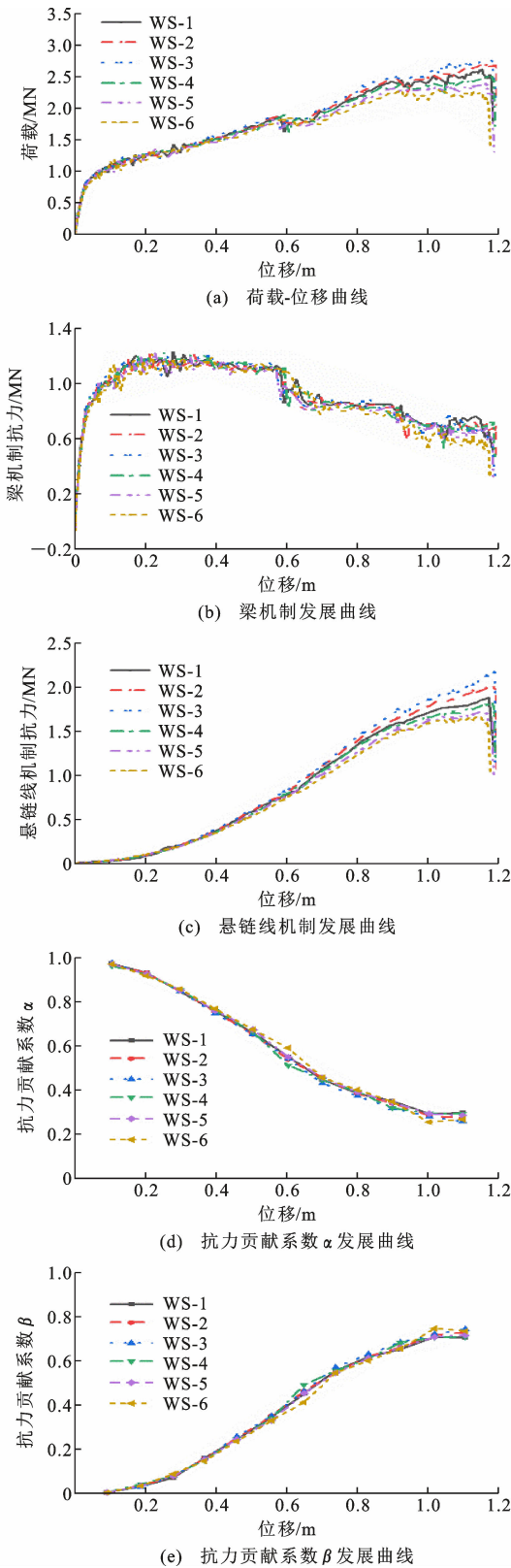


图9 不同轴压比的梁柱子结构模型对比

Fig. 9 Comparison of Beam-column Substructures with Different Axial Compression Ratios

比分别升高约8.5%和3%。轴压比过小时,边柱的节点域随着两侧梁的变形而发生转动,从而限制组

性能。

(3)轴压比对结构后期抗倒塌承载能力具有一定的影响。当轴压比小于0.3时,随着轴压比的增大,结构后期承载能力不断增大;轴压比大于0.3时,边柱顶部所承受的竖向荷载较大,在边柱中部水平拉结和柱顶竖向荷载共同作用下导致边柱刚度降低,不利于梁内悬链线机制抗力的发展,进而降低子结构的后期承载力。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] ELLINGWOOD B R. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.
- [2] ADAM J M, PARISI 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.
- [3] 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, LÜ Da-gang, LU Xin-zheng, et al. Research Progress and Development Trends on Progressive Collapse Resistance of Building Structures [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 1-28.
- [4] 张望喜,曹亚栋. 装配式混凝土框架结构防连续倒塌研究中的几个问题[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 101-112.  
ZHANG Wang-xi, CAO Ya-dong. Several Problems in Research on Progressive Collapse of Precast Concrete Frame Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 101-112.
- [5] 姚宇飞,师燕超,李忠献. 爆炸荷载下钢筋混凝土框架结构连续倒塌分析方法比较[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 64-72.  
YAO Yu-fei, SHI Yan-chao, LI Zhong-xian. Comparison of Progressive Collapse Analysis Methods for RC Frame Structures Under Blast Loads [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(1): 64-72.
- [6] YANG B, TAN K H. Experimental Tests of Different Types of Bolted Steel Beam-column Joints Under a Central-column-removal Scenario [J]. Engineering Structures, 2013, 54: 112-130.
- [7] 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.
- [8] ALRUBAIDI M, ELSANADEDY H, ABBAS H, et al. Investigation of Different Steel Intermediate Moment Frame Connections Under Column-loss Scenario [J]. Thin-walled Structures, 2020, 154: 106875.
- [9] 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.
- [10] ZHONG W H, TAN Z, SONG X Y, et al. Anti-collapse Analysis of Unequal Span Steel Beam-column Substructure Considering the Composite Effect of Floor Slabs [J]. Advanced Steel Construction, 2019, 15: 377-385.
- [11] 王俊杰,王伟,孙昕. 压型钢板组合梁中柱子结构的抗连续倒塌试验[J]. 工程力学, 2017, 34(增1): 149-153, 178.  
WANG Jun-jie, WANG Wei, SUN Xin. Experimental Behavior of Composite Beam-column Joints with Steel Profiled Decking in a Middle-column-removal Scenario [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S1): 149-153, 178.
- [12] 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.
- [13] 杜轲,滕楠,燕登,等. 楼板对RC空间框架结构抗连续倒塌性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(6): 14-23.  
DU Ke, TENG Nan, YAN Deng, et al. Experimental Study on the Effect of Floor Slab on the Progressive Collapse Resistance of RC Spatial Frame Structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 14-23.
- [14] 易伟建,黄义谋. RC框架子结构连续倒塌动力响应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 1-9.  
YI Wei-jian, HUANG Yi-mou. Analysis of Dynamic Response of Progressive Collapse for RC Frame Substructure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 1-9.
- [15] 罗维刚,黑晓丹,刘纪斌,等. 考虑楼板影响的RC框架结构连续性倒塌动力响应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(4): 113-119.  
LUO Wei-gang, HEI Xiao-dan, LIU Ji-bin, et al. Dynamic Response Analysis on Progressive Collapse of RC Frame Considering Contribution of Slab [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018,

- 35(4):113-119.
- [16] 黄 华,黄 敏,郭洁娜,等. RC 框架结构连续倒塌影响因素与破坏机制的研究现状[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(6):29-40.  
HUANG Hua, HUANG Min, GUO Jie-na, et al. Research Status on Influencing Factors and Failure Mechanism for RC Frame Structural Progressive Collapse[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(6):29-40.
- [17] LEW H S, BAO Y H, SADEK F, et al. An Experimental and Computational Study of Reinforced Concrete Assemblies Under a Column Removal Scenario [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2011.
- [18] YU J, TAN K H. Structural Behavior of Reinforced Concrete Frames Subjected to Progressive Collapse [J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(1):63-74.
- [19] KANG S B. Structural Behaviour of Precast Concrete Frames Subject to Column Removal Scenarios [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2015.
- [20] 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 Hui-yun, GUO Zhuang-zhuang, 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.
- [21] QIAN K, LAN X, LI Z, et al. Progressive Collapse Resistance of Two-storey Seismic Configured Steel Sub-frames Using Welded Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170:106117.
- [22] 张惊宙,李国强,冯 然,等. 考虑边柱失效位置和根数影响的钢框架结构抗倒塌性能研究[J]. 土木工程学报,2021,54(8):67-74.  
ZHANG Jing-zhou, LI Guo-qiang, FENG Ran, et al. Collapse Resistance of Steel framed-structure Considering the Effects of Failure Location and Number of Edge Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(8):67-74.
- [23] ZHONG W H, GAO D, TAN Z. Experimental Study on Anti-collapse Performance of Beam-column Assembly Considering Surrounding Constraints[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 643(1):012163.
- [24] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Standard for Design of Steel Structures:GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [25] IZZUDDIN B A, VLASSIS A G, ELGHAZOULI A Y, et al. Progressive Collapse of Multi-storey Buildings Due to Sudden Column Loss — Part I: Simplified Assessment Framework[J]. Engineering Structures, 2008, 30(5):1308-1318.
- [26] 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 Wei-hui, DUAN Shi-chao, 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.
- [27] 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.
- [28] TAN Z, ZHONG W H, TIAN L M, et al. Quantitative Assessment of Resistant Contributions of Two-bay Beams with Unequal Spans [J]. Engineering Structures, 2021, 242:112445.
- [29] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Code for Design of Concrete Structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [30] 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, 173:106251.