

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240321003

# 周围结构约束对规则RC框架抗连续倒塌易损性影响研究\*

林楷奇<sup>1</sup>, 朱亚琼<sup>1</sup>, 何敏<sup>2</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福建省新广厦工程设计研究院有限公司, 福建 福州 350014)

**摘要:** RC框架发生连续倒塌时, 失效区域边界约束条件会影响结构的抗力机制。为探讨周围结构约束对规则RC框架抗连续倒塌易损性的影响, 采用易损性分析方法, 对典型规则RC框架进行抗连续倒塌性能评估, 系统分析了不同内柱、边柱失效工况下, 规则RC框架抗连续倒塌易损性曲线及鲁棒性指标。研究表明: (1) 结构顶层的不同内柱、边柱移除时, 周围结构约束对结构抗连续倒塌易损性影响显著。在其他楼层, 由于上部结构的备用传递路径较多, 不同内柱、边柱移除的连续倒塌易损性曲线较为接近; (2) 相比边柱移除工况, 周围结构约束对内柱移除工况下的结构抗连续倒塌易损性影响更为显著; (3) 在结构顶层, 周围结构约束越强, 该工况下结构抗连续倒塌鲁棒性越强, 当移除柱周围结构跨数大于2时, 不同约束导致的抗连续倒塌易损性差异较小; (4) 构件截面一致时, 结构总楼层数对周围结构的约束效应影响较小。

**关键词:** 钢筋混凝土框架; 周围结构约束; 连续倒塌; 易损性分析; 柱移除

**中图分类号:** TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1187-13

## Study on Influence of Peripheral Structural Constraints on Progressive Collapse Fragility of Regular RC Frames

LIN Kaiqi<sup>1</sup>, ZHU Yaqiong<sup>1</sup>, HE Min<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Xinguangsha Engineering Design & Consultant Institute Co., Ltd, Fuzhou 350014, China)

**Abstract:** When reinforced concrete (RC) frames undergo progressive collapse, the boundary constraint conditions of the failed region can affect the structural resistance mechanism. To investigate the influence of peripheral structural constraints on the progressive collapse fragility of regular RC frames, a fragility analysis method was employed to assess the progressive collapse resistance of typical regular RC frames. The fragility curves and robustness indicators of regular RC frames under different failure scenarios of internal and edge columns were systematically analyzed. The results showed that: (1) when different internal columns or edge columns on the top floor of the structure were removed, the peripheral structural constraints had significant effects on the progressive collapse fragility of the RC frames. On other stories, due to the presence of multiple alternative load paths in the upper structure, the progressive collapse fragility curves under the removal of different internal and edge columns

\* 收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(52278491, 51908133)、福建省自然科学基金项目(2022J05119)资助

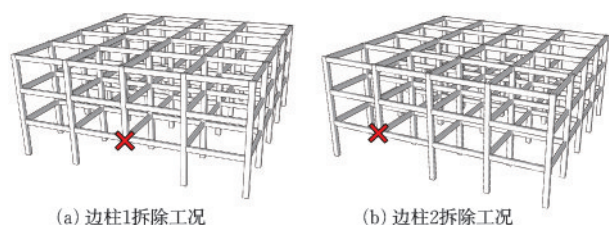
作者简介: 林楷奇(1990—), 男, 研究员, 博士。主要从事结构工程方面的研究。E-mail: linkq@fzu.edu.cn

were relatively similar. (2) Compared to edge column removal scenarios, the peripheral structural constraints had a more significant impact on the progressive collapse fragility under internal column removal scenarios. (3) On the top floor of the structure, the stronger the peripheral structural constraints were, the stronger the robustness of the RC frames against progressive collapse under the column removal scenario became. When the peripheral structure around the removed column encompassed more than two spans, the differences in progressive collapse fragility caused by different constraints became relatively small. (4) When member cross-sections were consistent, the total number of stories in the structure had little effect on the constraining effects of peripheral structure.

**Keywords:** reinforced concrete frame; peripheral structural constraints; progressive collapse; fragility analysis; column removal

## 0 引言

建筑结构的连续倒塌是指偶然荷载造成小范围初始破坏后,破坏在结构系统内传播导致整体结构或者与初始破坏不相称的大范围倒塌<sup>[1]</sup>,容易造成严重的人员伤亡和经济损失。在开展抗连续倒塌分析时,一般采用拆除构件法<sup>[2-3]</sup>,即假设偶然荷载造成结构中的局部竖向构件移除,通过分析剩余结构的承载力以量化结构的抗连续倒塌性能。多层RC框架是工程实践中应用最广泛的结构体系之一,研究表明,发生连续倒塌时,RC框架结构的受力过程主要可以分为压拱作用阶段和悬链线作用阶段<sup>[4]</sup>,同时,压拱作用和悬链线作用的发挥与RC框架失效跨的周围约束密切相关<sup>[5]</sup>,如图1所示。虽然一层边柱1和边柱2同样为边柱拆除工况,但在边柱1失效时,其左右两侧各有2跨,而边柱2失效时,左右两侧的跨数分别为1跨和3跨,因此,边柱1、2失效后,周围结构对失效跨的约束是不同的,导致两种工况下,结构的抗连续倒塌承载力有所区别。



(a) 边柱1拆除工况 (b) 边柱2拆除工况  
图1 不同内柱拆除工况

Fig.1 Different internal column removal scenarios

近年来,许多学者研究了边界约束对框架结构抗连续倒塌性能的影响。P. Forquin等<sup>[6]</sup>开展了10个1:3缩尺试件的连续倒塌试验,研究了边界条件

(滑动支座和铰接)对RC框架梁-柱子结构试件抗连续倒塌承载力的影响,结果表明:边界条件的不同会影响子结构塑性铰的形成顺序,铰接边界的子结构连续倒塌抗力强于滑动支座边界。N. S. Lim等<sup>[7]</sup>基于2:5缩尺试件研究了5个RC框架梁-柱子结构的静力抗连续倒塌性能,结果表明:水平约束充分时,试件的悬链线机制承载力可以达到其抗弯能力为2.89倍。J. Yu等<sup>[8]</sup>基于试验和理论分析讨论了边界条件的影响,并指出强水平约束有利于压拱作用的发展。W. H. Zhong等<sup>[9]</sup>选取内柱和次边柱移除工况,开展了梁-柱子结构静力连续倒塌试验,结果表明:在梁机制阶段,边界条件的加强并没有显著提高子结构的承载力;但在悬链线机制阶段,加强边界条件可以显著提高结构承载力。钟炜辉等<sup>[10]</sup>建立钢框架组合梁-柱子结构的精细有限元模型,分析了侧向约束刚度对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,边界约束对子结构抗连续倒塌性能影响显著,增大侧向约束刚度可有效提高子结构的承载力;当弹簧约束系数 $n > 1$ 时,增大侧向约束刚度影响较小,边界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力。周云等<sup>[5]</sup>基于ABAQUS建立了RC框架梁-柱子结构的连续倒塌试验有限元模型,改变失效跨两侧约束的情况,分析了边跨约束对梁-柱子结构抗连续倒塌承载力的影响,结果表明:两侧均有边跨约束的子结构承载力最高,其悬链线阶段承载力增长明显;两侧均无边跨约束的子结构悬链线阶段承载力略高于一侧有边跨约束的子结构,但只有两侧均有边跨约束子结构承载力的68%。

上述研究表明,多层RC框架发生连续倒塌时,失效跨内剩余构件的压拱作用和悬链线作用与周围结构约束密切相关。然而,已有研究多基于RC

框架梁—柱子结构或平面框架结构,对3维多层RC框架结构中,不同楼层、不同周围结构约束对RC框架在柱移除工况下的抗连续倒塌性能影响缺乏系统的讨论。为此,本研究设计了不同跨数和楼层数的RC框架,对不同位置的内柱和边柱移除工况开展连续倒塌易损性分析,系统分析了周围结构约束对规则RC框架结构抗连续倒塌易损性的影响。

## 1 连续倒塌易损性分析方法

许多研究表明,结构的抗连续倒塌性能可以通过易损性曲线来表征<sup>[11-14]</sup>。在结构抗震研究领域,常采用增量动力分析(IDA)方法<sup>[15]</sup>分析结构的地震易损性<sup>[16-18]</sup>,表征结构在不同地震动强度作用下的破坏概率。随着连续倒塌研究的发展,也有许多学者借鉴易损性分析的思路,分析不同重力荷载下结构发生连续倒塌的概率,计算结构的连续倒塌易损性曲线以量化结构的抗连续倒塌性能。例如,E. Brunesi等<sup>[11]</sup>根据欧洲规范,分别按非抗震设计和抗震设计设计了两个RC框架结构,考虑结构的几何、材料特性和荷载不确定性,使用蒙特卡罗方法随机生成大量结构有限元模型,开展了不同抗震设防框架的连续倒塌易损性分析。X. H. Yu等<sup>[12]</sup>选择了两个跨度不同的RC框架为研究对象,将静力Pushdown分析与拉丁超立方抽样方法相结合,计算获得结构的抗连续倒塌易损性曲线,在此基础上,开展了相关的参数不确定性分析和敏感性分析,结果表明:楼板恒载、钢筋屈服强度和极限强度以及梁的配筋面积等参数对结构连续倒塌抗力有明显影响。Z. F. Chen等<sup>[13, 19]</sup>在构件和结构层面考虑了包括结构荷载、构件尺寸、材料性能等设计参数的不确定性,提出了RC框架梁—柱子结构及整体结构的连续倒塌易损性简化分析方法,以一个3层RC框架为例,评估了其抗连续倒塌性能。

本研究采用Z. F. Chen等<sup>[13]</sup>提出的方法分析规则RC框架在拆除构件工况下的抗连续倒塌易损性,该易损性研究方法基于B. A. Izzuddin等<sup>[20]</sup>提出的基于能量原理的简化动力分析方法,通过将结构的静力下推曲线转换为拟静力曲线,估算在不同重力荷载下,结构失效跨在动力拆除构件工况下的竖向位移,该方法的分析流程如图2所示。

分析时,首先建立RC框架有限元模型,考虑材料、荷载、几何参数等的不确定性,通过拉丁超立方

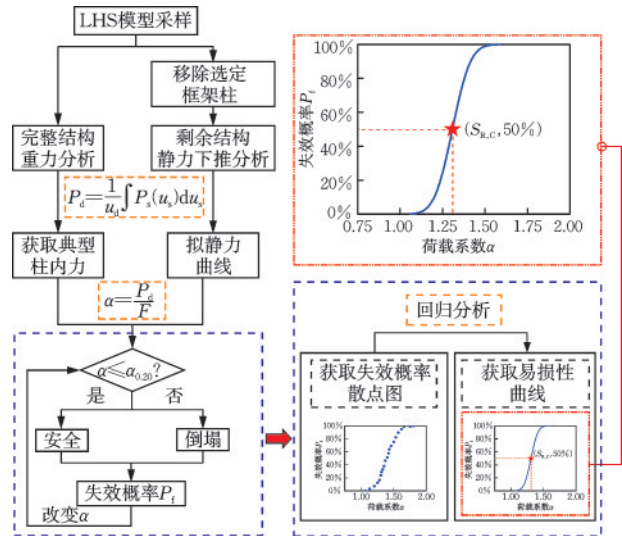


图2 框架结构简化易损性简化方法流程<sup>[13]</sup>

Fig.2 Flowchart of simplified fragility assessment method for frame structures<sup>[13]</sup>

抽样生成样本模型。随后,选择移除柱工况,基于B. A. Izzuddin等<sup>[20]</sup>的方法对不同样本模型开展简化动力分析,获得样本模型在不同竖向荷载下的结构连续倒塌峰值位移,与倒塌判别准则进行对比,确定结构是否会发生倒塌。参考DoD 2016<sup>[2]</sup>,将失效跨的梁端弦转角达到0.20 rad作为结构连续倒塌的失效判别准则。在此基础上,统计不同竖向荷载下,结构在拆除构件分析时的倒塌概率,以荷载系数 $\alpha$ ( $\alpha$ 为竖向荷载 $P_d$ 与完整结构中失效柱的轴力 $F$ 之比,图2)为横轴,倒塌概率为纵轴,绘制散点,拟合获得结构的抗连续倒塌易损性曲线。基于拟合获得的易损性曲线,以累积分布函数达到50%时对应的荷载系数作为该构件拆除工况的结构鲁棒性指标 $S_{R,C}$ ,见式1:

$$S_{R,C} = \alpha | \{ P_f = 50\% \} \quad (1)$$

其中, $P_f$ 为结构的累计失效概率,如图2所示。K. Q. Lin等<sup>[21]</sup>和Z. F. Chen等<sup>[13]</sup>基于上述易损性方法,以我国典型RC框架子结构<sup>[21]</sup>和整体结构<sup>[13]</sup>为例,对比了该方法与基于动力拆除构件分析的易损性方法获取的结构在不同构件移除工况下的抗连续倒塌易损性曲线,验证了上述方法的准确性和计算精度。该分析方法的具体计算流程可以参考Z. F. Chen等<sup>[13]</sup>的研究。

## 2 案例设计

为了量化周围结构约束对结构在拆除构件后

抗连续倒塌易损性的影响,本研究设计了3种跨数不同的规则RC框架平面布置,如图3所示。

实际结构发生连续倒塌时,其初始破坏位置的可能为任意柱,参考DoD 2016规范<sup>[2]</sup>,考虑了所有楼层的内柱、边柱和角柱的拆除工况。在此基础上,依据图1示意,按照不同位置框架柱失效时周围跨数的多少,可以进一步将结构的柱划分为不同工况。如图3(a)中的4×4跨框架,其内柱(Internal column,简称IC)失效工况可以进一步划分IC1、

IC2、IC3工况,而边柱(Edge column,简称EC)失效工况可以划分为EC1和EC2工况,由于角柱位于结构角部,对于本文所研究的规则对称RC框架,四个角柱的位置是对称的,约束条件相同,因此,与内柱、边柱拆除工况不同,同一楼层的角柱拆除工况无需细分为不同类型的角柱。此外,许多研究表明,拆除构件工况下,需要在结构两侧具有约束,受约束区结构才能发挥显著的压拱机制和悬链线机制,在角柱失效情况下,周边结构对角柱约束微弱,仅存在梁机制提供抗力,因此研究中并未讨论周围结构约束对角柱拆除工况的影响。同理,可以获得5跨和6跨框架的不同内柱和边柱拆除工况,如图3(b)和3(c)所示。

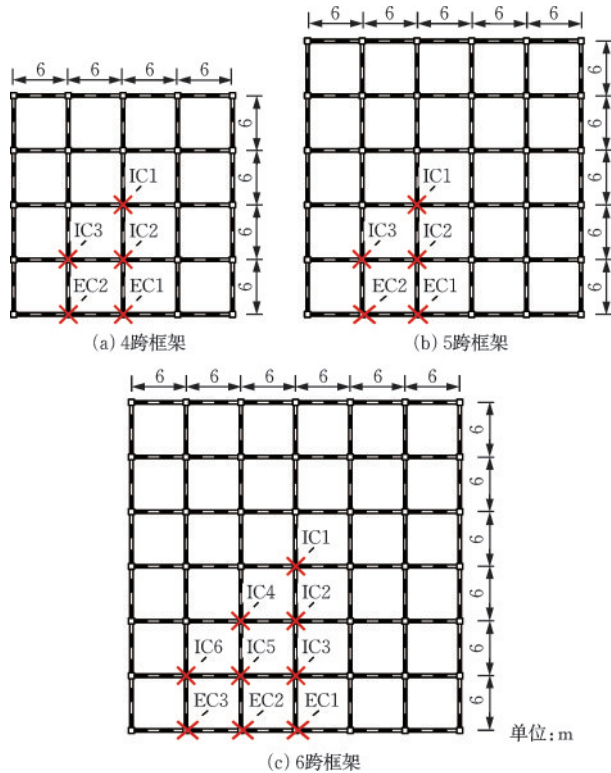


图3 各框架移除柱工况

Fig.3 Column removal scenarios of different frames

## 2.1 设计参数

在图3所示的平面布置基础上,依据《混凝土结构设计标准》<sup>[22]</sup>和《建筑抗震设计标准》<sup>[23]</sup>设计了4座不同的规则RC框架,包括6层的4×4跨、5×5跨和6×6跨框架各一座,用于分析结构跨数对周围结构约束的影响,以及一座3层的4×4跨框架,用于分析结构楼层数对周围结构约束的影响。设计时,所有结构抗震设防烈度均为7度,场地类别为Ⅱ类,结构首层高4.2 m,其余层高3.5 m,楼层恒载(DL)和活载(LL)分别为6 kN/m<sup>2</sup>和3 kN/m<sup>2</sup>,混凝土采用C40,钢筋屈服强度为400 MPa。不同框架的结构布置及构件截面尺寸见表1,不同的框架分别依据其楼层数及平面跨数进行命名,如F6K4表示为6层的4×4跨框架。其中,为了避免构件尺寸对分析结果的影响,3层框架F3K4的梁柱尺寸与6层框架F6K4保持一致。

表1 RC框架设计参数

Table 1 Design parameters of RC frames

框架编号	平面布置	楼层数	梁尺寸(宽×高)/mm		柱尺寸(长×宽)/mm	
F6K4	4×4跨	6	1-3层:250×500	4-6层:200×400	1-3层:500×500	4-6层:400×400
F6K5	5×5跨	6	1-3层:250×500	4-6层:200×400	1-3层:500×500	4-6层:400×400
F6K6	6×6跨	6	1-3层:250×500	4-6层:200×400	1-3层:500×500	4-6层:400×400
F3K4	4×4跨	3	1-3层:200×400		1-3层:400×400	

开展上述结构的连续倒塌分析时,根据DoD 2016<sup>[2]</sup>规定,荷载组合取为 $1.2 \times DL + 0.5 \times LL$ <sup>[2]</sup>。基于OpenSees建立这些框架的三维纤维梁柱单元模型,建模时,参考既有研究<sup>[13]</sup>,混凝土使用Concrete01材料,即受压采用Kent-Park模型且忽略混

凝土受拉性能,为了考虑柱箍筋对核心混凝土的约束效应,采用了J. B. Mander等<sup>[24]</sup>提出的模型,钢筋使用滞回材料UniaxialMaterial Hysteretic模拟大变形下框架梁内的钢筋断裂行为,材料的本构模型如图4(a)和4(b)所示,上述建模策略的可行性和准确

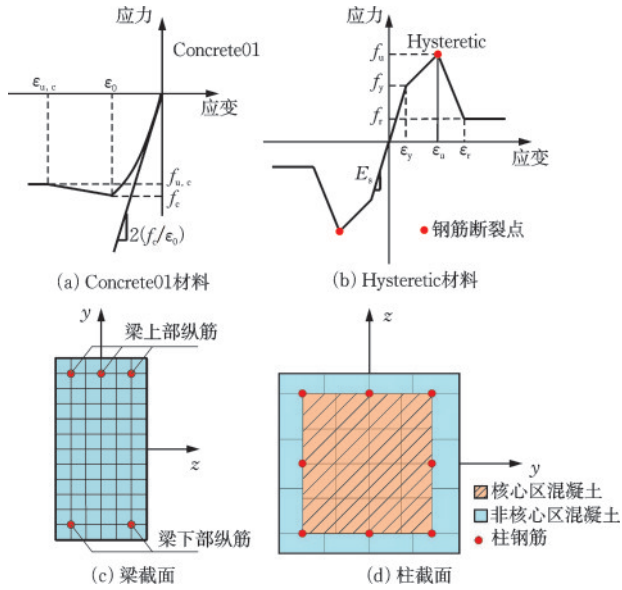


图4 建模方案

Fig.4 Modeling schemes

性已在以往的许多研究中得到充分验证<sup>[21, 25-28]</sup>, 基于网格敏感性分析, 梁、柱单元的纤维截面划分如图4(c)和4(d)所示。

在此基础上, 以易伟建等<sup>[4]</sup>的3层4跨框架在中柱失效下的静力试验为例, 依据上述方法建立对应有限元模型并与试验对比(图5)。结果表明, 数值模拟在各受力阶段与试验结果具有较好的一致性, 验证了上述建模方法的有效性。

此外, 虽然许多研究表明楼板和填充墙等可以有效提高RC框架结构连续倒塌抗力<sup>[29-32]</sup>, 但是, 已

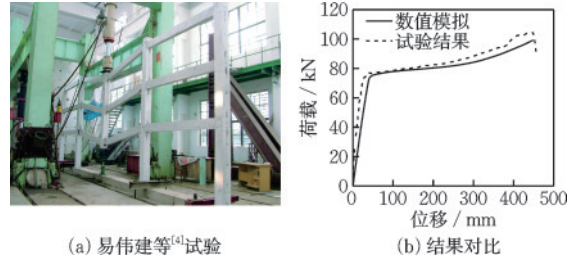


图5 数值模拟与试验对比

Fig.5 Comparison between numerical simulation and experimental results

有RC框架整体结构连续倒塌的数值模拟研究中, 考虑梁板耦合作用及填充墙建模的研究较为有限<sup>[33]</sup>, 在考虑楼板和填充墙后, 周围结构约束的影响机理也更加复杂。同时, 对于一些采用预制楼板的RC框架而言, 楼板主要作用是将荷载传递在框架梁上, 此时楼板与框架梁的耦合作用相对较弱。因此, 本文首先以纤维梁柱模型分析周围结构约束对RC框架抗连续倒塌性能的影响。

## 2.2 模型抽样

开展不同RC框架在拆除构件下的连续倒塌易损性分析时, 选取了13个结构的材料、几何和荷载等参数作为随机变量, 假设各参数间相互独立<sup>[34]</sup>, 各参数均值、对应的变异系数及服从的分布函数参考了已有的研究<sup>[35-39]</sup>, 对应的取值见表2。在此基础上, 开展拉丁超立方抽样(LHS), 获取用于易损性分析的模型样本, 参考Z. F. Chen等<sup>[13]</sup>的研究, 抽样时的样本容量取为100。

表2 RC框架随机变量  
Table 2 Random variables of RC frames

类别	随机变量	均值	变异系数/%	分布函数
材料参数	混凝土抗压强度( $f_c$ )/MPa	37.85	18.00	对数正态分布
	钢筋屈服强度( $f_y$ )/MPa	400	9.30	$\beta$ 分布 <sup>a</sup>
	钢筋极限强度( $f_u$ )/MPa	540	8.00	$\beta$ 分布 <sup>a</sup>
	钢筋弹性模量( $E_s$ )/GPa	200	3.30	正态分布
	钢筋极限应变( $\epsilon_u$ )	0.20	15.00	正态分布
结构荷载	恒载( $DL$ )/(kN·m <sup>-2</sup> )	6.0	10.00	正态分布
	活载( $LL$ )/(kN·m <sup>-2</sup> )	3.0	40.00	$\gamma$ 分布
几何参数	跨度( $L$ )/mm	6 000	0.23	正态分布
	梁高( $h$ )/mm	500/400	0.54	正态分布
	梁宽( $b$ )/mm	250/200	0.75	正态分布
	混凝土保护层厚度( $t$ )/mm	20	5.00	正态分布
	梁截面配筋面积( $A_{sb}$ ) <sup>b</sup> /cm <sup>2</sup>	$A_{sb}^b$	4.00	修正的正态分布
	柱截面配筋面积( $A_{sc}$ ) <sup>b</sup> /cm <sup>2</sup>	$A_{sc}^b$	4.00	修正的正态分布

注: 参考既有研究<sup>[39]</sup>,  $\beta$ 分布的形状系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为3.2和4.28; 各构件 $A_{sb}$ 和 $A_{sc}$ 的均值均取为设计值

### 3 抗连续倒塌易损性分析结果

为了研究周围结构约束对规则RC框架抗连续倒塌易损性的影响,首先,以4跨6层框架(F6K4)为例,分析不同内柱和边柱拆除位置对应的易损性分析结果;在此基础上,进一步对比了4跨、5跨、6跨框架的分析结果,用于分析规则RC框架跨数布置对周围结构约束作用的影响;随后,对比了4跨6层框架及4跨3层框架的分析结果,用于分析RC框架楼层数对周围结构约束作用的影响。

#### 3.1 典型案例分析

##### 3.1.1 内柱

首先,采用图2所示的易损性分析方法计算了4跨6层框架(F6K4)中,各楼层的不同内柱移除工况对应的易损性曲线及鲁棒性指标 $S_{R,C}$ ,如图6和图7所示。结果表明:同一楼层,由于不同类型内柱移除时,移除柱周围的剩余跨数不同,导致周围结构

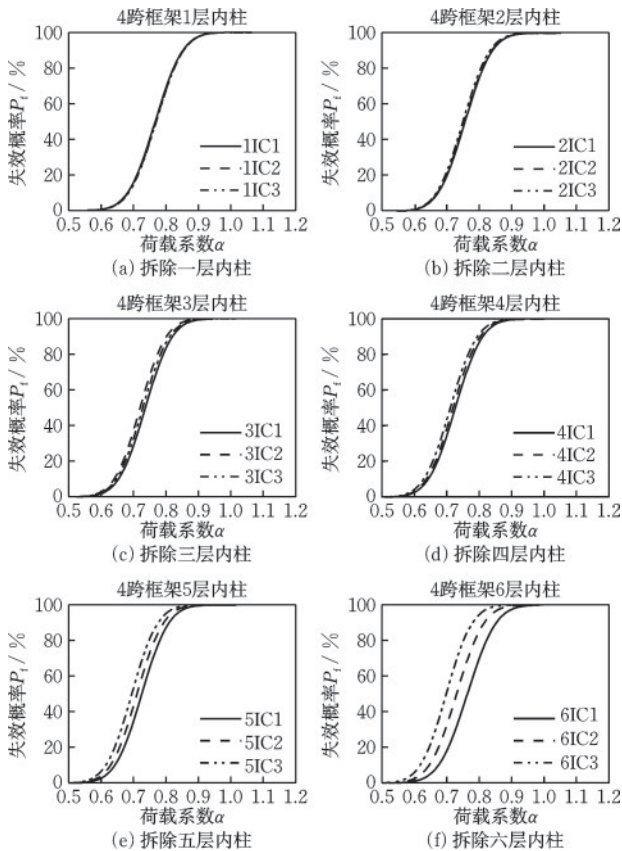


图6 各内柱拆除工况易损性曲线(F6K4)

Fig.6 Fragility curves of different internal column removal scenarios (F6K4)

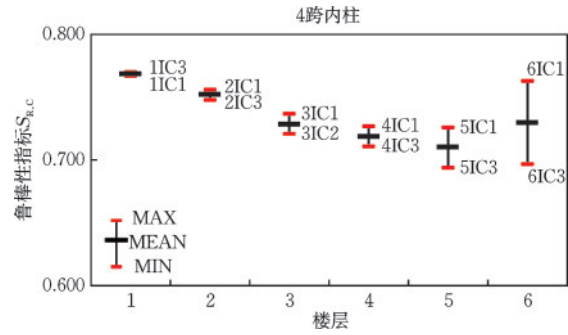


图7 各内柱拆除工况鲁棒性指标(F6K4)

Fig.7 Robustness indicators of different internal column removal scenarios (F6K4)

对失效跨的约束效应有所差别,进一步引起抗连续倒塌能力的差异,因此,虽然同样是内柱,失效位置不同时,例如F6K4的IC1、IC2和IC3,计算得到的抗连续倒塌鲁棒性指标是不同的。

为了量化周围结构约束的影响,选取第*i*层的内柱移除工况中 $S_{R,C}$ 的最大值与最小值,计算二者的差值百分比,作为第*i*层框架的周围结构约束影响评价指标 $E_{i,IC}$ , $E_{i,IC}$ 的计算方式见式2:

$$E_{i,IC} = \frac{[(S_{i,IC})_{\max} - (S_{i,IC})_{\min}]}{(S_{i,IC})_{\min}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $(S_{i,IC})_{\max}$ 和 $(S_{i,IC})_{\min}$ 分别为第*i*层不同内柱移除工况中,易损性分析计算的 $S_{R,C}$ 最大值及最小值。

上述评价指标通过对比不同内柱工况鲁棒性的偏差,可以量化同一楼层,不同类型内柱移除时,周围结构约束的强弱。当然,根据式2定义,该指标主要用于同一楼层,同一类型内柱移除工况的比较,对不同楼层是不适用的。这是由于:楼层数不同时,由于失效柱上部楼层导致的连续倒塌抗力是不一样的,一般而言,上部楼层越多,结构的备用失效路径越多,抗连续倒塌鲁棒性越高<sup>[40]</sup>。

结果表明:(1)结构中最不利拆除内柱工况为5IC3工况, $S_{R,C}$ 为0.694;(2)不同的内柱移除工况中, $E_{i,IC}$ 随着楼层增加呈现上升趋势,顶层的 $E_{6,IC}$ 最大,为9.47%,其中 $(S_{6,IC})_{\max}$ 和 $(S_{6,IC})_{\min}$ 分别对应顶层的IC1和IC3工况(图7),因此,在结构顶层,有必要考虑不同内柱拆除位置的影响;(3)除了顶部楼层外,次顶层的 $E_{5,IC}$ 次之,为4.61%,其余各层的 $E_{i,IC}$ 指标基本很小,即其余各层在开展拆除构件设计或评估时,可以近似将不同内柱近似为同一工况分析。

其中,下部楼层的 $E_{i,IC}$ 指标逐层减小的主要原因是:柱失效后,移除柱相邻的结构构件承担了结构系统的内力重分布。初始破坏所在楼层越低,失效区域上部用于内力重分布的梁柱构件和备用传力路径越多,叠加上底层柱上方剩余结构的空腹桁架抗力机制的影响,导致虽然底层柱的轴压比较大,但拆除时,周围结构约束变化造成的影响反而较小,即底部楼层的 $E_{i,IC}$ 较小;而顶层的柱移除工况由于备用传力路径较少,因而对周围结构约束的变化敏感性更强(即 $E_{i,IC}$ 越大)。

根据上述分析结果,建议对于上述4跨框架,开展内柱移除工况的连续倒塌评估和设计时,在结构顶层需考虑不同位置内柱(即IC1/IC2/IC3工况)的影响,其余楼层可选择相对不利的IC3工况开展分析,并以此作为该楼层的典型内柱移除工况。

### 3.1.2 边柱

同样,通过易损性分析获得框架F6K4中,各楼层边柱移除工况的易损性曲线及鲁棒性指标如图8和图9所示。

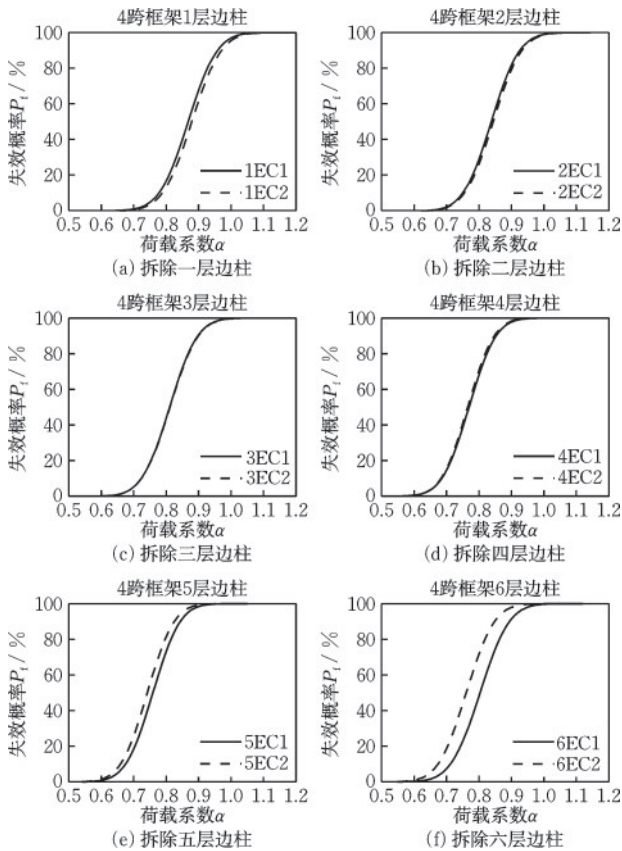


图8 各边柱拆除移除工况易损性曲线(F6K4)

Fig.8 Fragility curves of different edge column removal scenarios (F6K4)

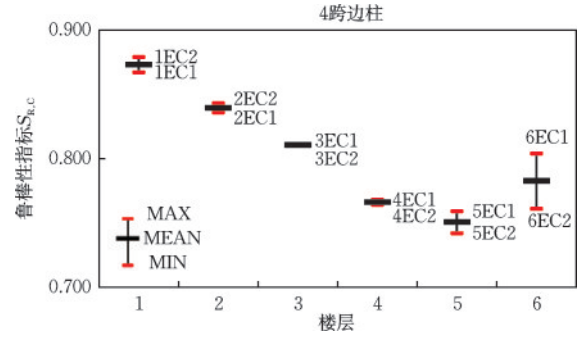


图9 各边柱拆除工况鲁棒性指标(F6K4)

Fig.9 Robustness indicators of different edge column removal scenarios (F6K4)

由于对比内柱和边柱,二者在拆除构件工况下的抗力机制是不一样的:边柱拆除时,沿两个平面方向的边界约束条件不同,垂直于边跨方向的框架梁受力接近悬臂梁,而靠近失效柱的梁端缺少足够的水平约束作用,在竖向荷载作用下无法有效发展出压拱和悬链线抗力机制,剩余结构在该方向上依靠梁机制抵抗竖向连续倒塌<sup>[41]</sup>,因此,边柱拆除工况下,仅有一个方向能发展出压拱及悬链线抗力机制;而内柱失效时,剩余结构沿两个方向的框架梁均能发挥这些作用,因此,不能采用同一指标来统一反应上述差异性。为此,参考 $E_{i,IC}$ 的定义(式2),定义边柱移除工况的周围结构约束影响评价指标( $E_{i,EC}$ ),见式3:

$$E_{i,EC} = \frac{[(S_{i,EC})_{\max} - (S_{i,EC})_{\min}]}{(S_{i,EC})_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, $(S_{i,EC})_{\max}$ 和 $(S_{i,EC})_{\min}$ 分别对应第*i*层的边柱移除工况中,通过易损性分析计算的 $S_{R,C}$ 最大值及最小值。

结果表明:(1)结构中最不利拆除边柱工况为5EC2工况,即次顶层的次边柱移除工况, $S_{R,C}$ 为0.742;(2)不同的边柱移除工况中, $E_{i,EC}$ 同样几乎随楼层增加呈现上升趋势(图9),顶层的 $E_{6,EC}$ 最大,为5.7%,次顶层的 $E_{5,EC}$ 次之,为2.3%;(3)其余各层的 $E_{i,EC}$ 指标基本很小,同样说明在这些楼层,可以选择一个边柱工况作为典型边柱拆除工况分析即可。造成上述结果的原因与内柱移除工况相似,即顶层边柱拆除时的备用传力路径更少,故受周围结构约束的影响更显著;(4)此外,对比发现,各楼层 $E_{i,EC}$ 的数值通常小于对应楼层的 $E_{i,IC}$ ,即相比内柱移除工况,周围结构约束对边柱移除工况的影响较小。根据上述分析结果,建议对于上述4跨框架,顶层分

别分析EC1和EC2工况,其余楼层可选择EC2作为典型边柱拆除工况,开展相应的连续倒塌评估与设计。

此外,根据图9所示,在4跨框架的底层,EC2工况对应的 $S_{R,C}$ 略大于EC1工况。其主要原因是,在底部楼层的柱失效后,由于失效区域上部用于内力重分布的梁柱构件和备用传力路径较多,叠加空腹桁架效应的影响,因此,柱失效位置的影响减弱,结构的抗连续倒塌性能受与失效柱直接相连的梁的抗力影响更为显著。而与柱EC2相连的外侧框架梁另一端与角柱相连,受抗震设计影响,与角柱相连的框架梁的配筋大于同侧其他边梁(图10),根据K. Q. Lin等<sup>[21]</sup>及X. H. Yu等<sup>[12]</sup>开展的敏感性分析结果表明,除荷载外,框架梁配筋对RC框架的抗连续倒塌性能影响最为显著,由于各楼层荷载一致,因此,与角柱相连的框架梁的配筋增加使结构在EC2失效工况下的抗连续倒塌承载力提升, $S_{R,C}$ 也相应提高。

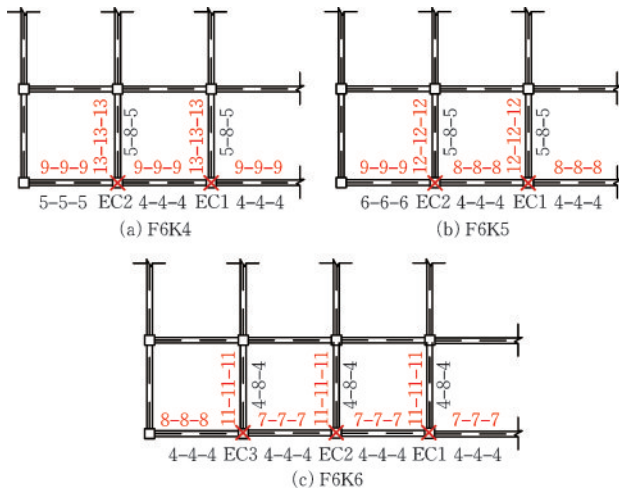


图10 底层框架梁配筋

Fig.10 Reinforcement of ground-story beams

注:图中梁的左/上数值代表梁顶配筋,右/下数值代表梁底配筋

### 3.2 不同跨数RC框架对比

在4跨6层框架(F6K4)分析的基础上,进一步开展框架F6K5和F6K6的连续倒塌易损性分析,研究跨数分布对周围结构约束作用的影响。同样将结果依照内柱和边柱拆除工况进行讨论。

#### 3.2.1 内柱

5跨、6跨框架的各内柱移除工况对应的 $S_{R,C}$ 如图11所示,部分楼层内柱移除工况易损性曲线如图

12和图13所示。5跨、6跨框架最不利拆除内柱工况分别为5IC3、4IC6工况,对应的 $S_{R,C}$ 分别为0.694、0.691,最不利工况位置的 $S_{R,C}$ 数值与4跨框架基本一致,可以得出:构件尺寸布置、跨长及结构楼层数一定时,跨数对结构中最不利内柱移除工况的对应抗连续倒塌鲁棒性影响较小。在此基础上,进一步分析结构跨数对周围结构约束的影响。

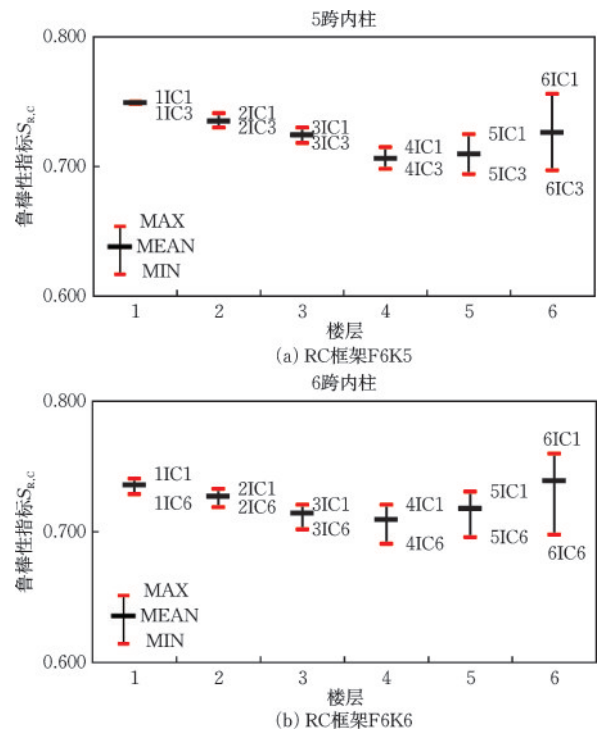


图11 各内柱拆除工况鲁棒性指标

Fig.11 Robustness indicators of different internal column removal scenarios

#### 3.2.1.1 楼层分布规律

在结构顶层,4、5、6跨框架的 $E_{6,ic}$ 均远大于其他楼层,分别为9.47%、8.46%、8.88%,如图11所示。因此,开展RC框架连续倒塌性能评估时,不同框架的顶层内柱拆除工况均需充分考虑周围结构约束的影响。相较而言,各框架在1—5层的 $E_{i,ic}$ 较小,4跨框架1—5层中 $E_{i,ic}$ 的最大值为4.61%,5跨框架1—5层中 $E_{i,ic}$ 的最大值为4.47%,6跨框架1—5层中 $E_{i,ic}$ 的最大值5.00%,即除结构顶层外的下部楼层中,不同内柱移除工况的易损性曲线基本一致,如图12及13所示。

#### 3.2.1.2 移除柱位置

为了方便区分失效内柱周围结构约束的强度,定义 $N_{ic}$ 为移除内柱时,失效柱周围两个方向上的最小框架跨数,见式4:

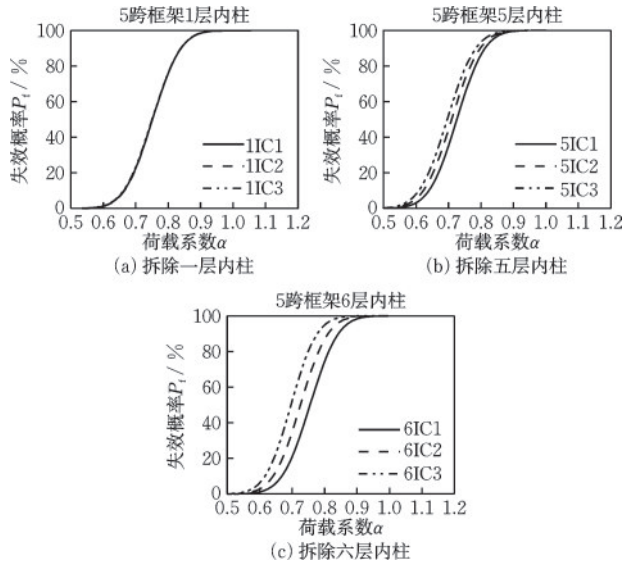


图12 各内柱拆除工况易损性曲线(F6K5)

Fig.12 Fragility curves of different internal column removal scenarios (F6K5)

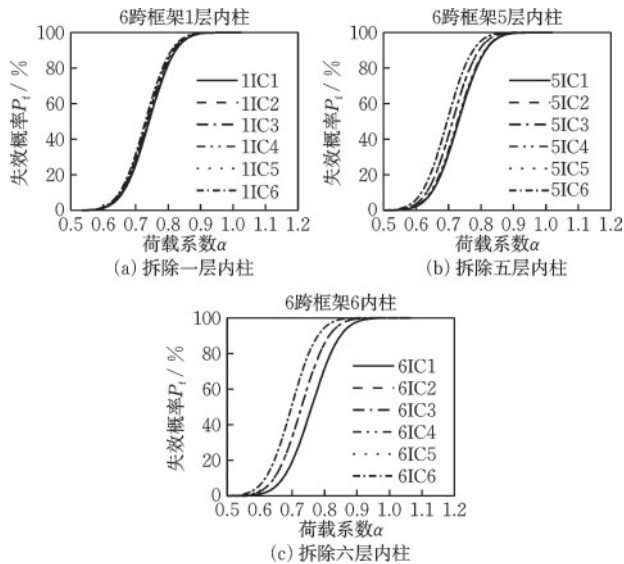


图13 各内柱拆除工况易损性曲线(F6K6)

Fig.13 Fragility curves of different internal column removal scenarios (F6K6)

$$N_{IC} = \min(N_1, N_2, N_3, N_4) \quad (4)$$

其中,  $N_1 \sim N_4$  分别为失效内柱周围的框架跨数, 如图14(a)所示。对比6跨框架F6K6的顶层各内柱的易损性曲线, 结果表明, 当  $N_{IC} \geq 2$  时, 例如6跨RC框架的6IC1、6IC2、6IC4(图3), 各内柱移除工况的易损性曲线几乎重合; 当  $N_{IC} = 1$  时, 柱移除工况的  $S_{R,C}$  均小于  $N_{IC} \geq 2$  时柱移除工况的  $S_{R,C}$ , 即周围结构约束强度不足, 此时需要考虑周围结构约束对内柱移除工况  $S_{R,C}$  的影响。同时, 在  $N_{IC} = 1$  的情况下, 对于移除柱四周仅有一个方向最小框架跨数为

1的工况(如6跨RC框架的6IC3、6IC5), 相应的易损性曲线也几乎重合, 其  $S_{R,C}$  值大于两个方向最小框架跨数均为1的工况(6跨RC框架的6IC6)的  $S_{R,C}$  值, 可见后者的周围结构约束强度相较于前者进一步削弱, 本文中研究的4跨、5跨的框架也符合上述规律。

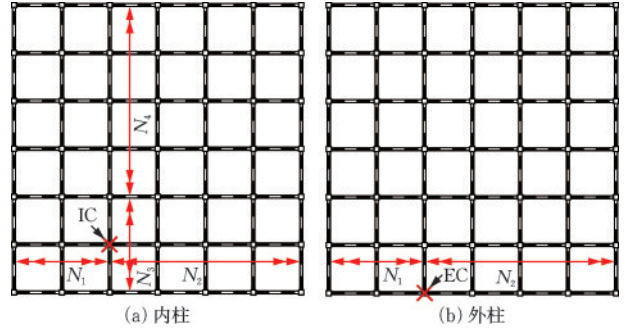


图14 跨数计算方式示意图

Fig.14 Schematic diagram of span number calculation method

### 3.2.2 边柱

对于边柱移除工况, 5跨、6跨框架的边柱移除工况的  $S_{R,C}$  如图15所示, 部分楼层边柱移除工况易损性曲线分别如图16和17所示。5跨、6跨框架最不利拆除边柱工况分别为6EC2、4EC3工况, 对应

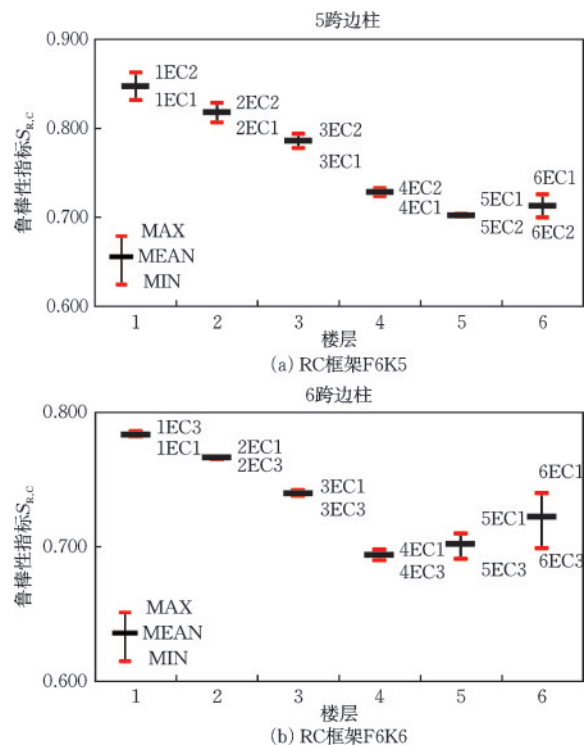


图15 各边柱拆除工况鲁棒性指标

Fig.15 Robustness indicators of different edge column removal scenarios

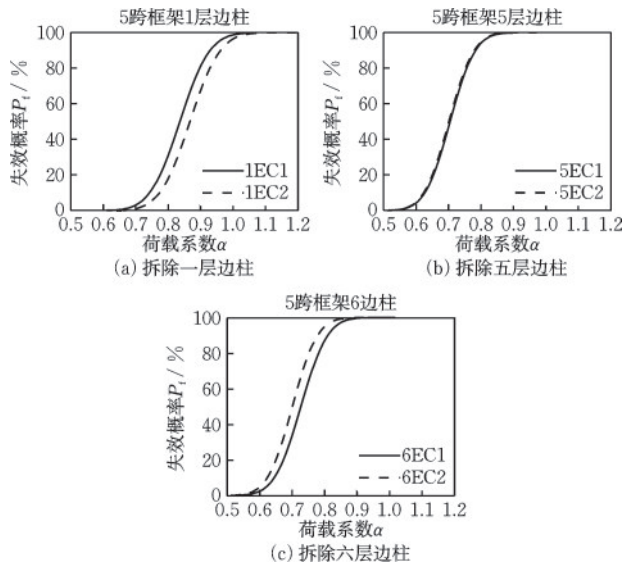


图16 各边柱拆除工况易损性曲线(F6K5)

Fig.16 Fragility curves of different edge column removal scenarios (F6K5)

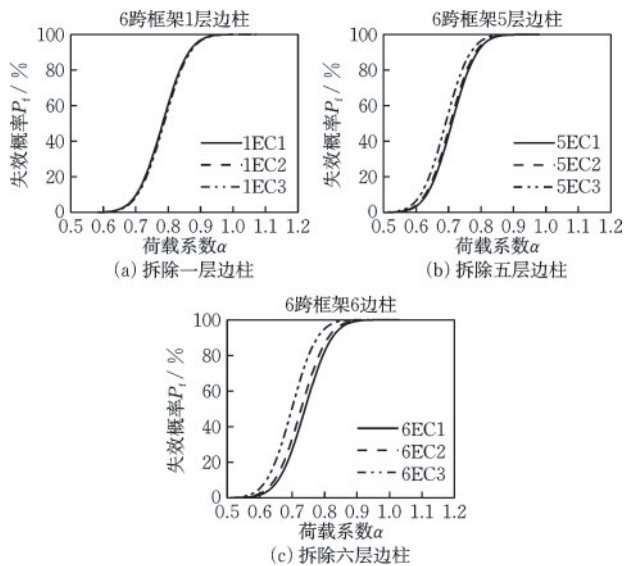


图17 各边柱拆除工况易损性曲线(F6K6)

Fig.17 Fragility curves of different edge column removal scenarios (F6K6)

的  $S_{R,C}$  分别为 0.701、0.690，而由前文可知，4跨框架的边柱最不利工况为 5EC2 工况，其对应的  $S_{R,C}$  为 0.742，由此表明，随着跨数增加，框架中最不利边柱拆除工况对应的抗连续倒塌鲁棒性有所降低。

### 3.2.2.1 楼层分布规律

在结构顶层，4、5、6跨框架的  $E_{6,EC}$  分别为 5.65%、3.71%、5.87%，相较而言，均小于对应框架的内柱拆除工况，再次说明相比内柱拆除工况，周围结构约束对边柱拆除工况的影响较小；除此之外，在结构的其他楼层，不同边柱拆除工况的易损

性曲线则比较接近，如图 16 和 17 所示。故对于多层框架，建议开展结构抗连续倒塌性能评估时，同样考虑顶层周围结构约束对边柱拆除工况的影响即可。

### 3.2.2.2 移除柱位置

在结构顶层，同样定义  $N_{EC}$  为移除边柱时，失效柱两侧的最小框架跨数，如式 5 所示：

$$N_{EC} = \min(N_1, N_2) \quad (5)$$

其中， $N_1$ 、 $N_2$  分别为失效边柱两侧的框架跨数，如图 14(b) 所示。结果表明，当  $N_{EC} \geq 2$  时，例如 6 跨 RC 框架的 6EC1 和 6EC2 (图 3)，柱拆除工况的易损性曲线较为接近，当  $N_{EC} = 1$  时，周围结构约束的影响较为显著，6EC3 拆除工况的  $S_{R,C}$  显著小于 6EC1 和 6EC2 工况，本文中研究的 4 跨、5 跨的框架也符合上述规律。

此外，观察 5 跨、6 跨框架的底层边柱拆除工况易损性曲线 (图 16(a)、17(a))，可以发现：在结构的下部楼层，由于上部结构在下部边柱拆除后提供了充足的备用传递路径，移除柱位置对边柱工况的连续倒塌易损性影响减弱，此时，结构的鲁棒性受与失效柱直接相连的梁的抗力影响更为显著，与 4 跨框架相同，由于结构抗震配筋需要，连接角柱的边梁配筋大于其他边梁 (图 10(b)、10(c))，因此，出现了同一楼层 EC2/EC3 拆除工况对应的  $S_{R,C}$  略大于 EC1 工况的情形 (图 16—17)。

## 3.3 不同楼层数 RC 框架对比

为了进一步研究结构楼层数对周围结构约束的影响，本研究设计了 4 跨 3 层框架 F3K4，保持该框架的构件截面尺寸与 6 层框架顶部三层一致 (表 1)，并对其进行易损性分析，图 18 为框架 F3K4 与 F6K4 不同内柱、边柱拆除工况下的  $S_{R,C}$  对比图。

对比框架 F3K4 和 F6K4 的分析结果，可以看出：(1) 在内柱拆除工况中，两种框架结构顶层的  $E_{i,IC}$  均较大，且值较接近，与 6 层框架对比，3 层框架的顶层  $E_{3,IC}$  为 9.80%，而 6 层框架顶层的  $E_{6,IC}$  为 9.47%，由此表明，结构楼层数对  $E_{i,IC}$  的影响较小；(2) 在边柱工况中，3 层框架顶层的  $E_{3,EC}$  和 6 层框架顶层的  $E_{6,EC}$  分别为 3.50%、5.65%，二者的差异略微大于内柱拆除工况，其主要原因是：相比于 F3K4，F6K4 顶层 6EC1 柱两侧梁配筋有所增加，导致 F6K4 的顶层的  $E_{6,EC}$  数值大于 F3K4 的  $E_{3,EC}$ 。总体而言，在 RC 框架的连续倒塌分析中，周围结构约束

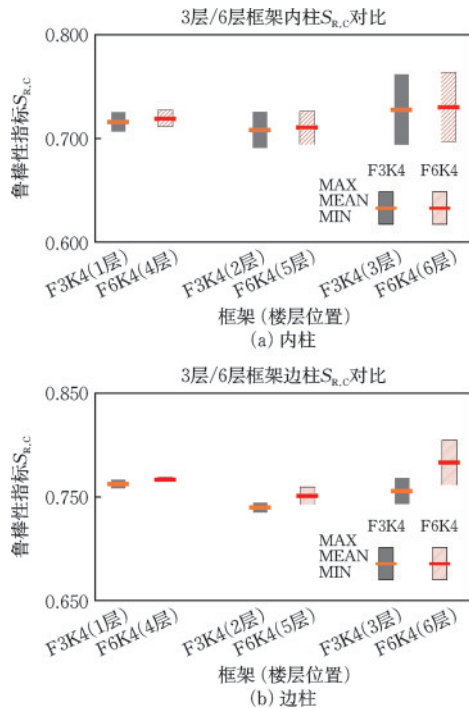


图 18 各柱拆除工况鲁棒性指标(F3K4/F3K6)

Fig.18 Robustness indicators of different column removal scenarios (F3K4/F3K6)

的作用主要取决于被拆除构件的平面位置、上部结构的备用传递路径数量和与构件直接相连的框架梁配筋,基本不受结构总楼层数的影响。

## 4 结 论

RC 框架结构在局部竖向构件破坏后,受损构件周围结构约束的强度会影响整体结构的抗连续倒塌性能。为此,本研究设计了 4 座平面布置和楼层数不同的规则 RC 框架,在内柱和边柱拆除构件研究的基础上,考虑不同构件周围结构约束的差异,根据拆除构件所处的平面位置进一步划分内柱及边柱的拆除构件工况,开展了不同工况下的结构抗连续倒塌易损性分析,以此量化周围结构约束对规则 RC 框架抗连续倒塌易损性的影响。研究的主要结论如下:

(1) RC 框架中,无论是边柱还是内柱拆除工况,周围结构约束对拆除顶层构件后的结构抗连续倒塌性能的影响最为显著,不同内柱和边柱的鲁棒性指标差异可分别达到 10% 和 6%;在其他楼层,由于上部结构的备用传递路径较多,不同内柱、边柱移除的连续倒塌易损性曲线较为接近。

(2) 在所研究的规则 RC 框架中,各楼层中边柱

所对应的周围结构约束强度指标  $E_{i,EC}$  的数值通常小于对应楼层内柱所对应的指标  $E_{i,IC}$ ,说明相比边柱移除工况,周围结构约束对结构在内柱移除工况下的抗连续倒塌鲁棒性影响更为显著。

(3) 在结构的顶层,周围约束越强,该工况下结构抗连续倒塌鲁棒性越强,当移除柱周围结构跨数大于 2 时,不同约束导致的结构抗连续倒塌易损性差异较小;当移除柱周围结构跨数为 1 时,由于周围结构约束不足,不同约束导致的结构抗连续倒塌易损性差异较为明显。在结构的下部楼层,结构的鲁棒性受与失效柱直接相连的梁的抗力影响更为显著,例如,由于结构抗震配筋需要,连接角柱的边梁配筋一般大于其他边梁,因此,与该梁相连的边柱移除时,结构抗连续倒塌鲁棒性一般强于其他边柱移除工况。

(4) 对比不同楼层数的 RC 框架(3 层和 6 层)的结构抗连续倒塌易损性曲线,结果表明周围结构约束的作用主要取决于被拆除构件的平面位置、上部结构的备用传递路径数量和与构件直接相连的框架梁配筋,基本不受结构总楼层数的影响。

当然,实际结构中,影响 RC 框架抗连续倒塌性能的因素众多,未来研究有必要进一步深入探讨更多类型、不同跨度及不等跨布置等因素对周围结构约束发挥抗连续倒塌作用的影响。

## 参考文献:

- [1] ASCE/SEI 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [2] Department of Defense (DoD), Design of structures to resist progressive collapse [S]. Washington D. C.: Department of Defense, 2016.
- [3] General Services Administration (GSA), Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington, DC: United States General Services Administration, 2016.
- [4] 易伟建,何庆锋,肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 104-109, 117.  
Yi W J, He Q F, Xiao Y. Collapse performance of RC frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104-109, 117. (in Chinese)
- [5] 周云,陈太平,胡翔,等. 考虑周边结构约束影响的 RC

- 框架结构防连续倒塌性能研究[J].工程力学,2019,36(1):216-226,237.
- Zhou Y, Chen T P, Hu X, et al. Progressive collapse resistance of RC frame structures considering surrounding structural constraints [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 216-226, 237. (in Chinese)
- [6] Forquin P, Chen W. An experimental investigation of the progressive collapse resistance of beam-column RC sub-assemblages [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 1068-1084.
- [7] Lim N S, Tan K H, Lee C K. Effects of rotational capacity and horizontal restraint on development of catenary action in 2-D RC frames [J]. Engineering Structures, 2017, 153: 613-627.
- [8] Yu J, Tan K H. Structural behavior of reinforced concrete frames subjected to progressive collapse [J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(1): 63-74.
- [9] 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.
- [10] 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 W H, Duan S C, Gao D, 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. (in Chinese)
- [11] Brunesi E, Nascimbene R, Parisi F, et al. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis [J]. Engineering Structures, 2015, 104: 65-79.
- [12] Yu X H, Lu D G, Qian K, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of reinforced concrete frame structures subjected to column loss [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(1): 04016069.
- [13] Chen Z F, Zhu Y Q, Lu X Z, et al. A simplified method for quantifying the progressive collapse fragility of multi-story RC frames in China [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143: 106924.
- [14] Li Y, Lu X Z, Guan H, et al. Probability-based progressive collapse-resistant assessment for reinforced concrete frame structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(11): 1723-1735.
- [15] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [16] 吕大刚,于晓辉,陈志恒.钢筋混凝土框架结构侧向倒塌地震易损性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):1-5.
- Lyu D G, Yu X H, Chen Z H. Lateral seismic collapse fragility analysis of RC frame structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(6): 1-5. (in Chinese)
- [17] 郭宏超,张思嘉,雷天奇,等.基于IDA的西安站改东配楼结构地震易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):721-731.
- Guo H C, Zhang S J, Lei T Q, et al. IDA-based seismic vulnerability analysis of the structure of the modified east side building of Xi'an railway station [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 721-731. (in Chinese)
- [18] 林天成,陈灯红,刘云龙,等.主余震作用下典型六层RC框架结构易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(5):1046-1056.
- Lin T C, Chen D H, Liu Y L, et al. Vulnerability analysis of typical six-story RC frame structure under main-shock-aftershock ground motions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1046-1056. (in Chinese)
- [19] 陈泽帆,林楷奇,陆新征,等.RC框架梁柱子结构抗连续倒塌性能不确定性分析[J].工程力学,2021,38(6):72-80,90.
- Chen Z F, Lin K Q, Lu X Z, et al. Uncertainty analysis on progressive collapse resistance of RC beam-column substructures [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 72-80, 90. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] Lin K Q, Chen Z F, Li Y, et al. Uncertainty analysis on progressive collapse of RC frame structures under dynamic column removal scenarios [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46: 103811.
- [22] 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [23] 建筑抗震设计标准:GB/T 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [24] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [25] 蒋碧聪,何政,朱胜.基于OpenSees的混凝土结构连续

- 倒塌分析中的从属节点建模技术[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 632-636.
- Jiang B C, He Z, Zhu S. OpenSees-based master-slave modeling technique in progressive collapse analysis of concrete structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34 (5) : 632-636. (in Chinese)
- [26] Lu X Z, Lin K Q, Li C F, et al. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures [J]. Engineering Structures, 2018, 168: 721-735.
- [27] 易伟建, 邓茜. 基于 OpenSees 的钢筋混凝土平面框架抗连续倒塌能力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 1-10.
- Yi W J, Deng Q. Analysis of progressive collapse resistance capability of reinforced concrete plane frames based on OpenSees [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(5): 1-10. (in Chinese)
- [28] Weng J, Tan K H, Lee C K. Modeling progressive collapse of 2D reinforced concrete frames subject to column removal scenario [J]. Engineering Structures, 2017, 141: 126-143.
- [29] Qian K, Li B. Quantification of slab influences on the dynamic performance of RC frames against progressive collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(1): 04014029.
- [30] 钟炜辉, 谭政, 宋晓燕, 等. 基于楼板组合效应的梁柱子结构抗倒塌性能研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 261-270.
- Zhong W H, Tan Z, Song X Y, et al. Anti-collapse performance of beam-column substructures based on the composite effect of floor slabs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10): 261-270. (in Chinese)
- [31] Shan S D, Li S, Xu S Y, et al. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 80-92.
- [32] Li S, Shan S D, Zhai C H, et al. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 57-68.
- [33] Feng D C, Zhang M X, Brunesi E, et al. Investigation of 3D effects on dynamic progressive collapse resistance of RC structures considering slabs and infill walls [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104421.
- [34] Feng D C, Xie S C, Xu J, et al. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse *via* the probability density evolution method [J]. Engineering Structures, 2020, 202: 109877.
- [35] Ali Mirza S, MacGregor J G. Variations in dimensions of reinforced concrete members [J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(4): 751-766.
- [36] Ali Mirza S, MacGregor J G. Variability of mechanical properties of reinforcing bars [J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(5): 921-937.
- [37] Ali Mirza S, MacGregor J G. Slenderness and strength reliability of reinforced concrete columns [J]. Structural Journal, 1989, 86(4): 428-438.
- [38] Ellingwood B. Development of a probability based load criterion for American National Standard A58: Building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures [M]. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980.
- [39] Barbato M, Gu Q, Conte J P. Probabilistic push-over analysis of structural and soil-structure systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136 (11) : 1330-1341.
- [40] 黄咏政, 梁子哈, 王森钠, 等. 主要设计参数对规则 RC 框架结构抗连续倒塌性能的影响[J]. 工程力学, 2023, 40(增 1): 184-190.
- Huang Y Z, Liang Z H, Wang S N, et al. Influences of primary design parameters on progressive collapse resistance of regular RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(Sup 1): 184-190. (in Chinese)
- [41] Lu X Z, Lin K Q, Li Y, et al. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario [J]. Engineering Structures, 2017, 149: 91-103.

(本文编辑: 周小潭)