

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230530001

多层RC框架底层中柱失效连续倒塌计算模型*

林楷奇^{1,2}, 李道远^{1,3}, 蔡亮^{1,3}

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 可持续与创新桥梁福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108; 3. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350116)

摘要: 多层RC框架结构在底层中柱失效后, 不平衡荷载由失效柱上方各楼层共同承担, 其承载力相比单层框架会大幅提升。然而, 由于缺乏系统的多层RC框架连续倒塌试验和数值模拟研究, 失效柱上部各楼层的连续倒塌抗力机制尚不明确, 既有研究中关于多层RC框架结构的抗连续倒塌承载力理论分析模型也十分有限。为此, 首先依照中国规范设计了9座典型的RC框架结构, 采用OpenSees开展了各框架在底层中柱失效时的连续倒塌分析, 系统研究了各楼层梁的内力及应变分布, 讨论了不同楼层的梁内连续倒塌抗力发展机制。在此基础上, 结合单层RC框架梁柱子结构的连续倒塌承载力计算模型, 依据各层梁的抗力贡献, 建立了多层RC框架底层中柱失效的连续倒塌抗力计算模型, 并与试验及数值模拟结果进行了对比验证。研究表明: ①底层中柱失效后, 多层RC框架首层梁存在显著的压拱机制和悬链线机制; ②多层RC框架结构沿楼层高度方向布置不同尺寸构件时, 截面尺寸变化的下部楼层梁会存在压拱受力机制; ③除上述楼层外, 其他楼层梁主要通过受弯机制提供连续倒塌抗力; ④所提计算模型能较准确计算多层RC框架底层中柱失效时的抗连续倒塌承载力。

关键词: 多层RC框架; 连续倒塌; 数值模拟; 受力机制; 计算模型

中图分类号: TU398⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1299-12

Analytical Model for Progressive Collapse of Multi-story RC Frame after a Ground-story Middle Column Removal

LIN Kaiqi^{1,2}, LI Daoyuan^{1,3}, CAI Liang^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Sustainable and Innovative Bridge Engineering Research Center of Fujian Province University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In a multi-story RC frame, when the ground-story middle column fails, the unbalanced load is borne by the stories above the failed columns, and the load-carrying capacity is significantly increased compared to a single-story frame. However, due to the lack of systematic experimental and numerical investigations on the progressive collapse resistance of spatial multi-story RC frames, the force mechanisms of the stories above the failed column for resisting progressive collapse are still unclear. Moreover, there are few analytical models for quantifying the progressive collapse resistance of multi-story RC frame structures among existing studies. Therefore, 9 typical multi-story RC frames are designed following the Chinese design codes and their progressive collapse behaviors under the

* 收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-08-19

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

通信作者: 林楷奇(1990—), 男, 研究员, 博士。主要从事结构工程研究。E-mail: linkq@fzu.edu.cn

ground-story middle column removal scenario are analyzed. The internal forces and strain developments of the beams on each story are systematically analyzed. And the progressive collapse-resisting mechanisms of various stories in an RC frame are discussed. On this basis, the calculation model of single-story RC beam-column substructures is combined to establish the analytical model for quantifying the progressive collapse resistance of a multi-story RC frame after the ground-story middle column removal, by calculating the resistance contributions of different stories. The experimental tests and numerical simulations are compared with the calculated results to verify the accuracy of the proposed model. The results show that: (1) Following the removal of the column, significant compressive arch action and catenary action are observed in the ground story beams. (2) When components of varying dimensions are arranged vertically within the RC frame, compressive arch action is observed in the lower floor beams that experience a change in component size. (3) Apart from the aforementioned floors, beams on other floors generally exhibit progressive collapse resistance through flexural actions. (4) The proposed analytical model can provide a satisfying estimation of the progressive collapse resistance of a multi-story RC frame under the ground-story column removal scenario.

Keywords: multi-story RC frames; progressive collapse; numerical simulations; stress mechanism; calculation model

0 引言

连续倒塌是指结构在发生局部破坏后,由初始的局部破坏,从构件到构件扩展,最终导致结构大部分或整体倒塌的现象。既有研究表明^[1-3],单层RC框架梁柱子结构在连续倒塌时,框架梁受力可以显著地分为梁机制和悬链线机制受力阶段(图1)。而在整体结构中^[4-6],由于楼层间的相互作用,RC框架在失效柱上方各层会表现出不同的抗倒塌机制,不能简单地将不同楼层视为子结构计算他们的承载力之和,需要系统分析整体结构中各楼层的相互作用,计算各层的承载力贡献,以提出整体结构的抗连续倒塌计算模型。例如,W.J. Yi等^[4]开展了3层4跨平面RC框架在首层中柱失效时的连续倒塌试验,结果表明:结构在悬链线受力阶段,部分

楼层不能充分发挥悬链线作用,仅首层梁钢筋会发生断裂,并建议将各层悬链线作用极限承载力乘以0.85以预测结构的实际承载力。程建军等^[5]基于有限元软件SAP 2000建立了若干个3层平面框架,分析了首层中柱失效时的抗连续倒塌性能,结果表明各楼层间荷载传递机制差异较大,仅首层框架梁在梁机制受力阶段存在显著的压拱作用,其他楼层梁主要通过弯曲作用提供承载力。K. Qian等^[6]采用LS-DYNA建模,变换不同柱移除位置和楼层总数等建立了一系列平面框架模型,分析了各层的抗连续倒塌机制。

虽然上述研究讨论了多层RC框架的连续倒塌抗力机制,但目前的研究多集中于平面框架,而空间三维框架的荷载传递机制和楼层间的相互作用更为复杂,相关的试验研究和数值模拟也较为有限。此外,数值模拟技术虽然可以较好地分析结构

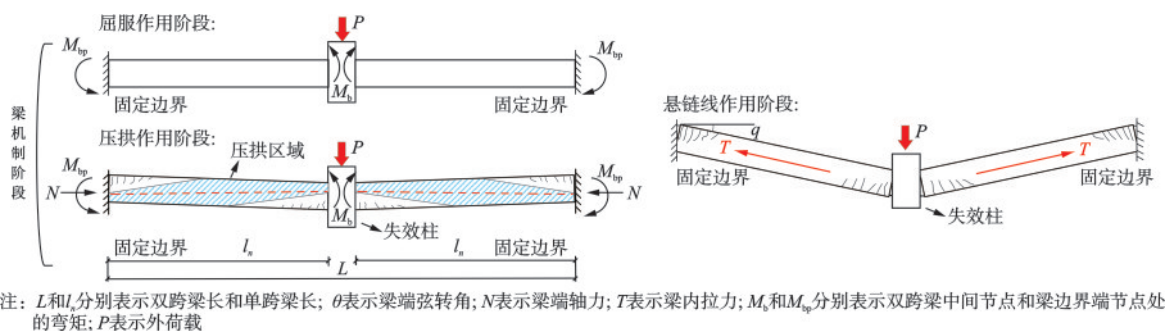


图1 RC框架梁连续倒塌受力过程

Fig.1 Force progression during the progressive collapse of an RC frame beam

的连续倒塌机制,但对建模知识和能力要求较高,不适用于工程设计阶段的快速分析等。既有研究中尚缺乏空间三维RC框架的整体结构连续倒塌抗力计算方法。因此,参考既有研究^[4,7-9],本文考虑底层中柱失效情况,依照我国规范设计了不同抗震设防烈度和楼层数的典型RC框架,系统讨论了多层RC框架在底层内柱失效后,各楼层梁的连续倒塌抗力发展机制,提出了多层RC框架底层中柱失效后的连续倒塌承载力计算模型。

1 案例设计

1.1 RC框架的结构布置与设计

本研究选取3层、6层和8层RC框架为研究对

象,分别依据抗震设防烈度Ⅵ(0.05g)、Ⅶ(0.10g)、Ⅷ(0.20g)度进行设计,场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第二组,抗震设防类别为丙类。设计时,所有框架均采用如图2所示的平面布置形式,在x轴方向为4跨,在y方向为3跨,跨度均为6.0m,首层高度均为4.2m,其余楼层高度为3.5m,各楼层的恒载(DL)和活载荷(LL)分别取6.0kN/m²和3.0kN/m²。框架的每个楼层内各梁、柱截面尺寸均相同,梁、柱混凝土强度均采用C40,梁、柱配筋采用HRB400,构件的混凝土保护层厚度为20mm,不同框架中各楼层梁、柱的详细尺寸信息见表1。在此基础上,遵照我国《混凝土结构设计标准》^[10](GB50010—2010)与《建筑抗震设计标准》^[11](GB/T50011—2010)开展结构设计。

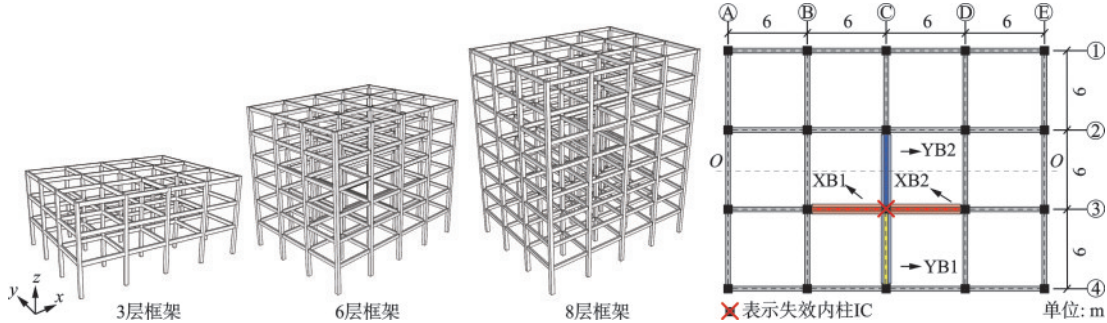


图2 RC框架示意

Fig.2 Schematic of the RC frames

表1 构件截面尺寸信息

Table 1 Cross-sectional dimensions of the frame components

编号	楼层	柱尺寸/m	梁尺寸/m
3-Ⅵ	1-3层	0.40×0.40	0.50×0.25
3-Ⅶ	1-3层	0.40×0.40	0.50×0.25
3-Ⅷ	1-3层	0.40×0.40	0.50×0.25
6-Ⅵ	1-3层	0.45×0.45	0.50×0.25
	4-6层	0.40×0.40	0.40×0.20
6-Ⅶ	1-3层	0.45×0.45	0.50×0.25
	4-6层	0.40×0.40	0.40×0.20
6-Ⅷ	1-3层	0.45×0.45	0.50×0.25
	4-6层	0.40×0.40	0.40×0.20
8-Ⅵ	1-4层	0.55×0.55	0.50×0.30
	5-8层	0.40×0.40	0.40×0.25
8-Ⅶ	1-4层	0.55×0.55	0.50×0.30
	5-8层	0.40×0.40	0.40×0.25
8-Ⅷ	1-4层	0.55×0.55	0.50×0.30
	5-8层	0.40×0.40	0.40×0.25

注:后续研究中,按照“楼层数-抗震设防烈度-框架梁所在楼层-框架梁编号(XB1、XB2、YB1、YB2)”的命名规则为不同梁编号,例如:3-Ⅶ-1-XB1表示3层Ⅶ度框架中的1层XB1梁

1.2 结构分析模型

根据上述设计信息,采用开源有限元软件OpenSees建立RC框架结构的数值模型,参考程建军等^[5]、K. Qian等^[6]、E. Brunesi等^[7]、刘传卿等^[12]和K.Q. Lin等^[13]的研究,模型中未考虑楼板的影响。参考K.Q. Lin等^[9]的研究,使用基于位移的纤维梁柱单元模拟RC梁柱构件,混凝土材料采用基于Kent-Scott-Park单轴混凝土本构模型的Concrete 01材料,不考虑混凝土受拉作用,即混凝土受拉时不提供承载力;受压区可以分为上升段、下降段以及平台段,以考虑混凝土的受压破坏,基于J.B. Mander等^[14]的模型考虑了箍筋对混凝土的约束效应,C40混凝土的圆柱体抗压强度取为37.85MPa。钢筋使用滞回材料模拟,通过设置滞回材料各特征点参数模拟大变形下钢筋的断裂行为,HRB400的屈服强度和抗拉强度分别设置为400MPa和540MPa。

已有许多学者验证了上述纤维梁柱单元模型

分析RC框架抗连续倒塌时的准确性^[15-16],为了具体验证上述建模方法的有效性,本研究分别以W.J. Yi等^[4]和S. Li等^[17]的3层4跨和2层4跨框架在中柱失效下的静力试验为例,建立对应有限元模型并与试验对比(图3),结果表明,数值模拟在各受力阶段与试验结果的吻合度较高。

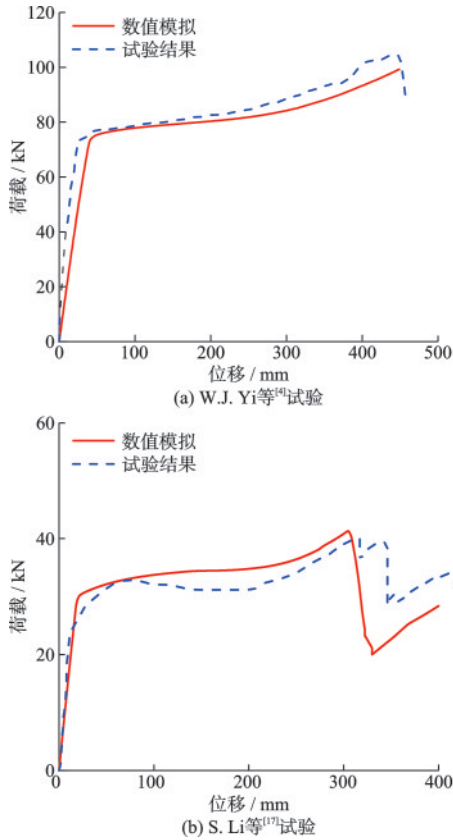


图3 数值模拟与试验对比

Fig.3 Comparison of numerical simulations and experimental results

2 数值模拟结果分析

基于上述建模方法,分别建立不同RC框架的OpenSees模型,开展结构在底层中柱失效后的连续倒塌分析。分析时,楼面的荷载组合取为 $1.2 \times DL + 0.5 \times LL$ ^[18]。

为明确各楼层的抗连续倒塌机制,本研究分别以7度设防的3层和8层框架结构(框架3-VII和8-VII)为例,假设底层C3柱失效(图2),在柱对应的结构顶部施加轴力,开展静力Push-down分析,讨论各层框架梁在连续倒塌过程中的轴力发展和截面应变分布规律。分析过程中,根据DoD 2016^[18]建

议,采用失效柱相连的梁端弦转角达到0.20 rad作为结构连续倒塌的失效判别准则,由于本文中各框架的梁跨为6.0 m,所以节点竖向位移阈值为1 200 mm,如图4所示。

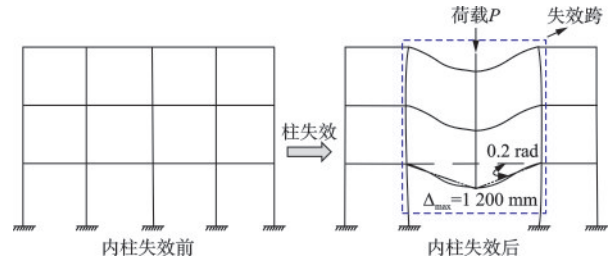


图4 RC框架底层中柱失效变形示意

Fig.4 Deformation of the RC frame with the failure of the ground-story middle column

2.1 三层RC框架

提取框架3-VII底层C3柱失效后的各层梁内轴力-失效柱位移关系,如图5所示。由于沿梁长方向各截面轴力相等,因此梁内任一单元的轴向力可代表该梁轴力。为此,本文提取了每层失效柱头相邻的梁单元轴力开展分析,3-VII-1至3-VII-3分别代表3-VII框架的1至3层框架梁,由于结构的楼层平面布置关于C轴对称(图2),因此梁XB1/XB2轴力发展一致,图5中仅提供XB1梁的计算结果。

结果表明:(1)底层C3柱失效后,首层梁内轴力存在明显的受压至受拉转换过程,即由压拱受力阶段转换为悬链线受力阶段的过程。初始受力阶段,梁XB1/XB2轴压力不断增大,直至位移达到408 mm时达到最大值56.88 kN,随后轴压力逐渐减小,当位移达到815 mm时,轴力由压力转为拉力,在位移达到1 200 mm时,轴向拉力达到174.57 kN。相比而言,梁YB1和YB2起初处于微弱的受拉状态,当位移分别达到126 mm和88 mm时轴力转为压力,两者分别在425 mm和430 mm达到最大压力24.50 kN和18.54 kN,后转为受拉状态。(2)顶层框架梁在整个受力过程中处于受压状态,梁YB1、YB2和XB1/XB2的轴压力均为增加后下降,分别在497、501、466 mm时达到压力峰值59.65、54.99、44.73 kN,随后梁内轴压力逐渐减小。(3)相比底层和顶层框架梁,2层框架梁的内力较小,其中,梁YB2和XB1/XB2基本处于受压状态,而梁YB1处于轻微受拉状态。

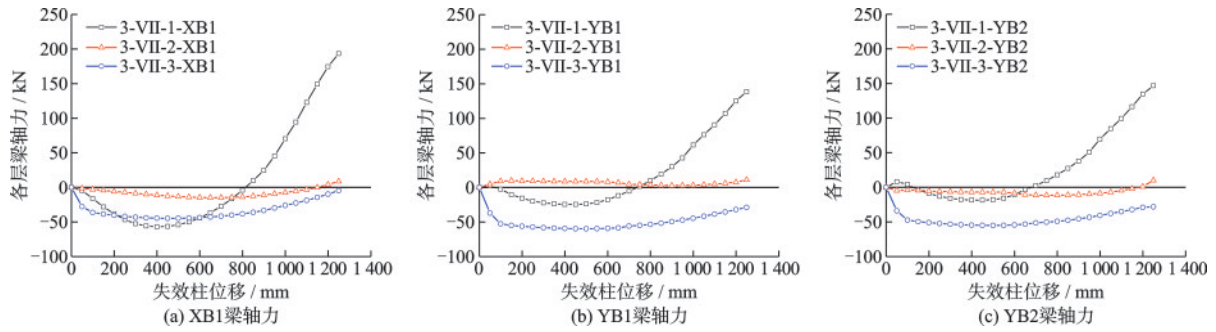


图5 框架3-VII各层梁轴力

Fig.5 Axial forces in the beams on each story of frame 3-VII

为进一步揭示各层梁的内力发展规律,分别提取有限元模型中梁单元内的截面纤维应变分布,结合响应的构件变形计算结果,绘制不同楼层框架梁的截面应变分布,如图6所示。其中,本文中的结构模型采用OpenSees中基于位移的纤维梁柱单元,模型分析时,每个单元包含5个积分点,积分点间的应变是通过插值得到。因此,应变分布是通过提取每个单元积分点处的梁截面轴向应变数值,再将不同

点间的数值通过插值绘制而成,因此,图中的应变是连续的。此外,加载过程中,失效柱两侧的各层梁柱节点的X/Y方向水平位移如图7所示,由于结构沿C轴对称,因此,X方向仅提供B轴线上各梁柱节点位移,Y方向则提供了②/④轴线上的各节点位移。由于篇幅限制,仅给出失效柱位移为50 mm(初始加载)、400 mm(压拱阶段)和1 200 mm(悬链线阶段)的计算结果。

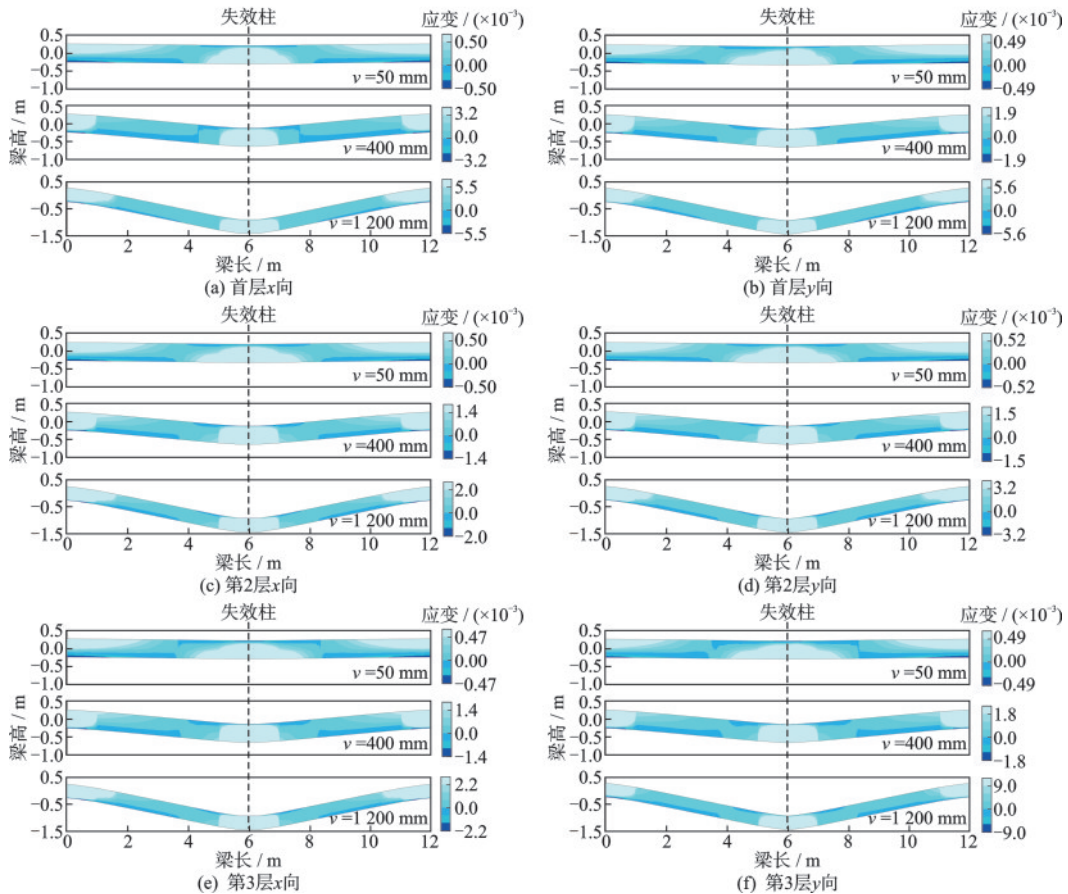


图6 框架3-VII各层梁截面应变分布

Fig.6 Sectional strain distribution of the beams on each story of frame 3-VII

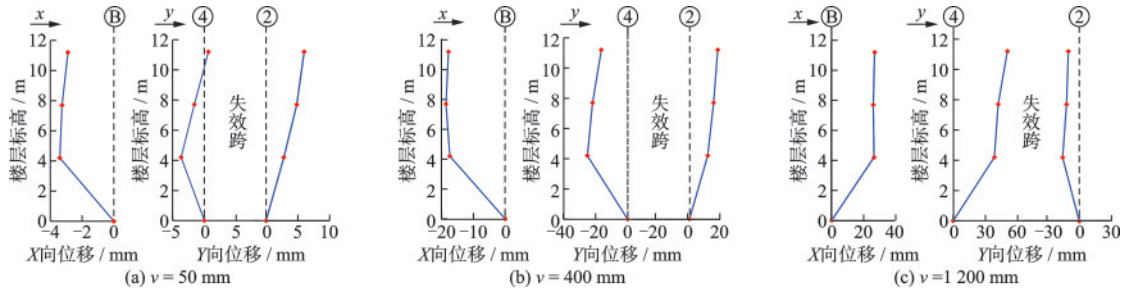


图7 框架3-VII各层横向变形

Fig.7 Lateral deformation of each story of frame 3-VII

上述分析表明:(1)在底层中柱失效后,梁机制受力阶段,仅首层框架梁内存在显著的压拱作用,即梁内存在明显的压拱传力区域(图6),部分截面进入全截面受压状态(图5),同时,首层失效跨梁端节点受压拱推力发生向外侧变形(图7(a))。而2层和3层框架梁并未出现显著的压拱受力特征,层间相对变形也小于首层,沿梁长方向主要呈现受弯状态(图6,位移400 mm),即靠近失效柱处为梁顶受压,梁底受拉,靠近梁端边界处为梁顶受拉,梁底受压。(2)进入悬链线阶段后,RC框架3-VII中,仅首层梁内有显著的悬链线作用,失效跨梁端节点受悬链线拉力发生向内侧变形(图7(c)),沿梁长方向处于全截面受拉状态,根据楼层变形(图7(c))及内力计算结果(图5),其他楼层框架梁内的悬链线作用相对较弱或处于受弯状态。

2.2 八层RC框架

同样地,提取底层C3柱失效后8层RC框架8-VII的各层梁轴力-失效柱位移关系,如图8所示。结果表明,除了构件截面发生改变的4~5层,其他楼层的梁内轴力发展规律与框架3-VII基本一致:(1)首层梁在加载过程经历了明显的受压至受拉的状态转换,其中,梁XB1/XB2、YB1和YB2分别在

位移387、400、380 mm时达到最大压力212.05、130.78、117.49 kN,位移为845、804、783 mm时,框架梁由受压转换为受拉状态,位移达到1 200 mm时,梁内拉力分别为457.50、384.77、376.12 kN。(2)顶层梁全过程受压,且压力随着位移先增大后减小,梁XB1/XB2、YB1和YB2分别在位移324、343、353 mm时达到峰值压力48.53、65.30、66.22 kN,梁内压力显著小于底层。(3)除了第4~5层,其他楼层的轴力相对较小。

在构件截面发生变化的第4~5层,由于截面变化导致的结构内力重分布,使得这两层梁的轴力与其余中间层有明显不同的发展。其中,结构的第4层框架梁处于全程受压状态,且梁内轴力大于其他中间楼层,梁XB1/XB2、YB1和YB2分别在位移达到699、703、705 mm处达到最大压力114.72、90.68、108.75 kN;第5层框架梁在C3柱失效后一直受拉,拉力随位移的增加不断增大,XB1/XB2、YB1和YB2在位移达到1 200 mm时,梁的轴拉力分别为205.24、96.94、136.02 kN,但该梁内拉力值远小于首层梁。同样地,在各层梁内力分析的基础上,分别提取框架8-VII有限元模型中典型楼层(首层、4~5层、顶层)梁单元内的截面纤维应变分布,结合各失效梁

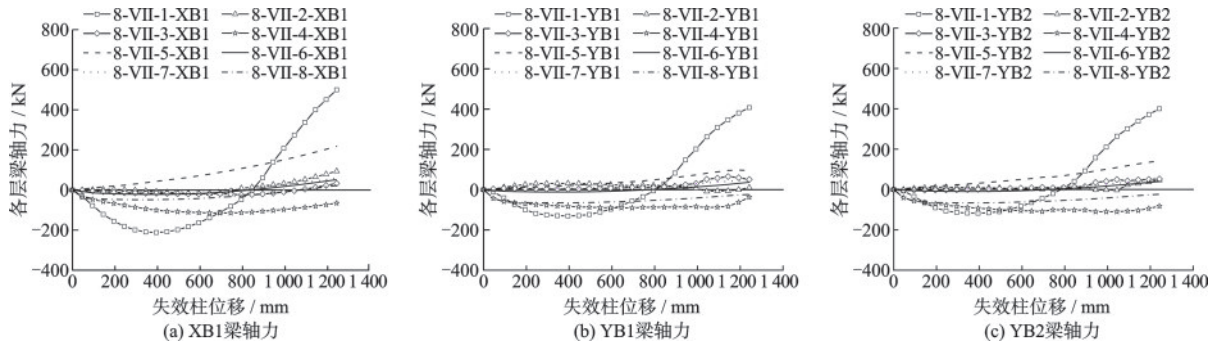


图8 框架8-VII各失效跨的轴力

Fig.8 Axial force in the failed spans of frame 8-VII

柱节点位移,绘制不同楼层框架梁的截面应变分布,如图9所示。此外,提取框架8-VII在失效柱位移达

到50、400、1 200 mm时,不同楼层的梁端位移如图10所示。

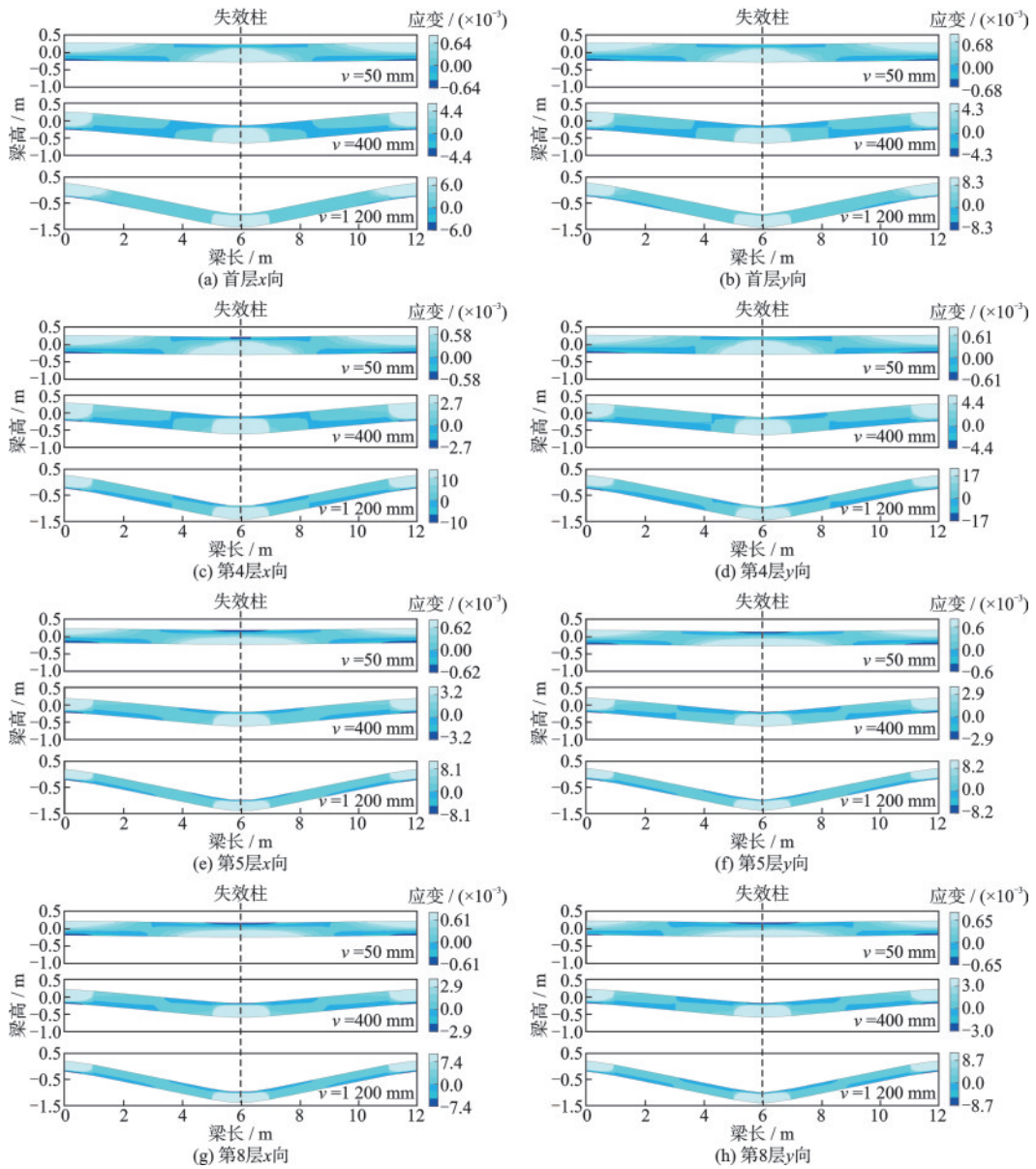


图9 框架8-VII部分楼层梁截面应变分布

Fig.9 Sectional strain distribution of the beams on selected stories of frame 8-VII

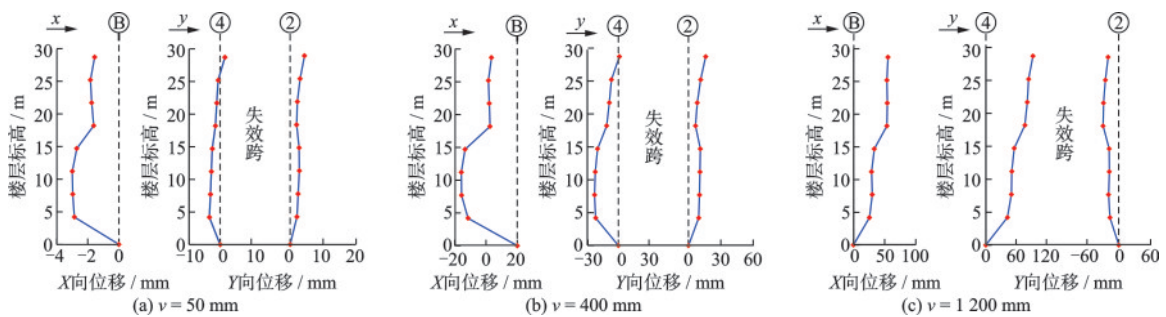


图10 框架8-VII楼层变形

Fig.10 Deformation of each story of frame 8-VII

结果表明:(1)内柱失效后,框架8-Ⅶ在首层梁及变截面的下部楼层梁(第4层)内可以形成显著的压拱受力机制(图9,位移400 mm);在悬链线阶段,仅首层梁进入了显著的全截面受拉状态(图8);(2)截面应变分析结果表明(图9),其他楼层梁主要通过受弯提供连续倒塌抗力。(3)根据图10所示的失效柱上部各层梁端水平位移可以看出,由于结构在第4至5层框架截面尺寸改变,各层梁柱变形不同,在失效柱处的竖向荷载作用下,5层失效跨梁端节点相对4层发生了明显的向内侧变形,进而导致了第5层框架梁受拉和第4层框架梁的压拱效应。

为了进一步分析截面改变对RC框架抗连续倒塌机制的影响,在框架8-Ⅶ的基础上,进一步设计了框架8-Ⅶ-B和8-Ⅶ-C。其中,8-Ⅶ-B各楼层梁截面尺寸相同(0.50 m×0.30 m),柱截面尺寸布置与8-Ⅶ一致;8-Ⅶ-C各楼层柱截面尺寸相同(0.55 m×0.55 m),梁截面尺寸布置与8-Ⅶ一致。结果对比表明,梁截面尺寸发生改变的8-Ⅶ-C在第4~5层变形规律与框架8-Ⅶ基本一致,而柱截面尺寸发生改变的8-Ⅶ-B在第4~5层并未呈现楼层变形的显著改变。由此可以得出,8-Ⅶ框架在第4层梁内形成的压拱受力机制,主要是由于楼层间框架梁截面变化引起的。受限于论文篇幅,相关结构变形及应变分布结果未在此提供。

2.3 多层RC框架抗连续倒塌受力机制

综上所述,在多层RC框架的空间抗连续倒塌受力机制可以归纳为以下几点:(1)结构首层梁存在显著的压拱和悬链线受力机制;(2)当结构楼层较多而沿楼高采用不同截面梁时,变截面的下部楼层(如框架8-Ⅶ的第4层)梁内在连续倒塌过程会形成显著的压拱受力机制;(3)其他楼层梁主要通过受弯以提供连续倒塌抗力。

3 RC框架结构计算模型

根据上述整体结构抗连续倒塌受力机制,本文进一步提出多层RC框架在底层中柱失效下的连续倒塌抗力计算模型。

根据W.J. Yi等^[4]和K. Qian等^[6]研究,多层空间RC框架在底层内柱失效后,结构的连续倒塌抗力可以表示为各层抗力之和。此外,Y. Wang等^[19]的试验研究表明,在三维规则RC框架中,楼层的连续

倒塌承载力可以表示为x和y方向框架梁的承载力之和。因此,只要明确各楼层不同方向上的RC框架梁的连续倒塌抗力贡献,即可计算出整体结构在底层中柱失效后的抗连续倒塌承载力。在本研究中,选取K.Q. Lin等^[9]基于多基因遗传编程技术(Multi-Gene Genetic Programming, MGPP)建立的梁端固支的RC框架梁-柱子结构抗连续倒塌承载力计算模型,以下简称MGPP模型,计算不同楼层的承载力贡献。

3.1 单层RC框架梁柱子结构计算模型

K.Q.Lin等^[9]的MGPP模型主要适用于计算梁端为固支的单层RC框架梁-柱子结构,可以计算子结构在连续倒塌受力全过程的特征点承载力和位移,相比既有模型而言^[20-21],MGPP模型的主要优势在于计算式简单易用,计算过程无需迭代,方便工程应用。该模型中,梁-柱子结构在中柱失效下的承载力-位移曲线包含4个特征点:即屈服点,压拱峰值点,转换点和悬链线峰值点,如图11所示。在外荷载作用下,屈服点(A点)作为屈服阶段与压拱作用阶段(图1)的临界点,其承载力与位移分别由式(1)~(4)计算;压拱峰值点(B点)则用于标定压拱作用阶段(图1)的最大承载力,其承载力与位移分别由式(5)~(6)计算;转换点(C点)是梁受力由压拱作用阶段转向悬链线作用阶段的临界点,其承载力与位移分别由式(7)~(8)计算;悬链线峰值点(D点)用于表征结构的极限受力状态,其承载力与位移分别由式(9)~(10)计算。

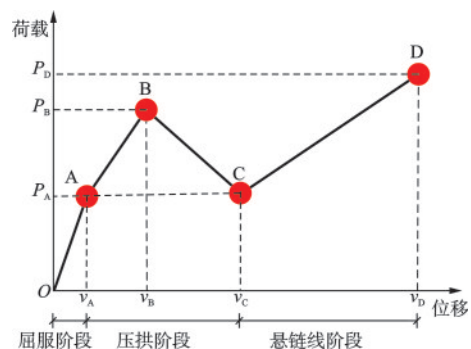


图11 首层RC框架梁的连续倒塌抗力

Fig.11 Progressive collapse resistance of the first-story RC frame beam

$$P_A = k(M_b + M_{bp}) \quad (1)$$

$$M_b = \rho_b f_{yb} b d^2 \left(1 - 0.59 \frac{\rho_b f_{yb}}{f_c} \right) \quad (2)$$

$$M_{bp} = \rho_t f_{yt} b d^2 \left(1 - 0.59 \frac{\rho_t f_{yt}}{f_c} \right) \quad (3)$$

式中, P_A 表示屈服点承载力; k 表示静弯矩系数, 集中荷载作用下为 $4/L$ (L 表示双跨梁总长); M_b 和 M_{bp} 分别表示双跨梁中间节点和边界梁端节点的截面弯矩; ρ_{yt} (ρ_{yb}) 分别表示梁顶(底)受力纵筋配筋率; f_{yt} (f_{yb}) 分别表示梁顶(底)受力纵筋屈服强度; f_c 表示混凝土圆柱体抗压强度; b 表示梁截面宽度; d 表示混凝土有效高度。

$$v_A = \frac{P_A L^3}{192 \alpha EI} \quad (4)$$

式中, v_A 表示屈服点位移; α 表示刚度折减系数, 取 1.0; E 表示混凝土弹性模量; I 表示梁截面惯性矩。

$$P_B = 0.0059767(L/d)^2 - 4.0597d^{2.5}/L^2 - 25.5966df_c - 251.33\sqrt{d^2}/L - 0.0035542bf_{yb}\sqrt{f_{yt}} + [56.697d\sqrt{A_{st}} + 2.1803d^2f_{yt} - (1.1382\sin A_{st})/(bd) + 1.149.1bd^2f_c + 237.34dA_{sb}f_{yb}\sqrt{f_{yt}}]/L - 3.781 \quad (5)$$

$$v_B = 136.21d + 11.415\sin(d/L) - 1.4435\sin(\sin(L)) - 4.5535\cos(L) + 279.07d/L + 45.677Le^{-\sqrt{d}} + 0.000031209f_c^3 - 418.14d^{1/4} + 11.415f_c^{1/4} - 0.025038Lf_c/d + 23.963\cos L/[d(L+f_c)] + 160.1 \quad (6)$$

式中, P_B 和 v_B 分别表示压拱峰值点承载力和位移; A_{yt} (A_{yb}) 分别表示梁顶(底)受力纵筋面积。

$$P_C = P_A \quad (7)$$

$$v_C = 0.1l_n \quad (8)$$

式中, P_C 和 v_C 分别表示转换点承载力和位移; l_n 为单跨梁长。

$$P_D = 0.41631L - 206.466A_{sb} + 0.028422f_{yb} + 22.384\sqrt{A_{st}A_{sb}f_{yt}} - 7.2525\sqrt{LA_{st}e^{-L}} - 0.20816df_{yb} + (296.55f_{yb} - 80.958f_{yt})n_\epsilon A_{sb} + 173.599Ld^2\sqrt{A_{sb}e^{-L}} + d^2n_\epsilon e^{-L}(40.688A_{st}f_{yt} + 24.305A_{sb}f_{yb}) + 17.113 \quad (9)$$

$$v_D = 0.2l_n \quad (10)$$

式中, P_D 和 v_D 分别表示悬链线峰值点的承载力和位移; n_ϵ 表示纵筋的极限强度与屈服强度之比。

3.2 模型基本假设

结合第 2 节的受力机制分析, 本文提出的多层

RC 框架中柱失效下的连续倒塌抗力计算模型的基本假设如下:

(1) 内柱失效后, 考虑相邻跨对失效跨的约束, 计算各楼层框架梁承载力贡献时, 假设失效跨的梁端为固支。

(2) 整体结构的承载力可以表示为不同楼层的承载力之和, 根据本文第 2 节的分析结果, 不同楼层的承载力-位移曲线依据其受力特点分别采用不同的 4 折线模型表示, 如图 11、12 所示。

(3) 依据 5.2 节的分析结论, 计算连续倒塌承载力时, 首层梁考虑压拱和悬链线机制承载力贡献 (图 11), 其余楼层仅考虑梁的抗弯承载力贡献见图 12(a), 在楼内沿高度方向采用不同的梁截面布置时, 额外考虑变截面的下部楼层梁的压拱承载力贡献见图 12(b)。

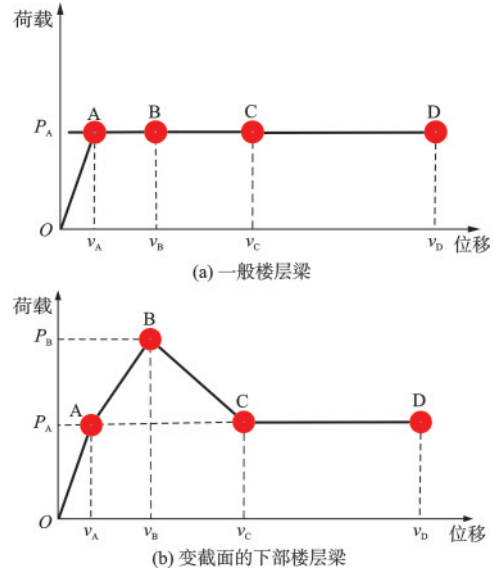


图 12 不同楼层梁的荷载-位移关系曲线

Fig.12 Load-displacement relationship curves for the beams on different stories

3.3 计算流程

基于上述基本假设, 不同楼层梁的抗连续倒塌承载力-位移曲线特征点可以按照如下流程确定:

(1) $v_{Axi}(v_{Ayi})$ 、 $v_{Bxi}(v_{Byi})$ 、 $v_{Cxi}(v_{Cy})$ 和 $v_{Dxi}(v_{Dyi})$ 分别表示第 i 层 x 向 (y 向) 框架梁的特征点位移, 可以分别依据式 (4)、(6)、(8) 和 (10) 确定。

(2) $P_{Axi}(P_{Ayi})$ 、 $P_{Bxi}(P_{Byi})$ 、 $P_{Cxi}(P_{Cy})$ 和 $P_{Dxi}(P_{Dyi})$ 分别表示第 i 层 x 向 (y 向) 框架梁的特征点承载力, 对于不同楼层应采用不同计算方法, 具体如下:

① 对于首层梁,4个特征点承载力依照式(1)~(10)确定,对应图 11;② 对于变截面的下部楼层梁, P_{Bxi} (P_{Byi})依照式(5)确定,其他特征点, P_{Axi} (P_{Ayi})、 P_{Cxi} (P_{Cyi})和 P_{Dxi} (P_{Dyi}),承载力数值相等,依照式(1)至(3)确定,对应图 12(a);③ 对于其他楼层框架梁,4个特征点承载力相等,均依照式(1)~(3)确定,对应图 12(b)。

在此基础上,将各楼层的承载力-位移曲线叠加,即可得到整体结构在底层内柱失效下的抗连续倒塌承载力-位移关系曲线。在叠加不同楼层的承载力-位移曲线时,由于 N 层 RC 框架结构在底层内柱失效后,需要计算 N 个楼层、 x 和 y 方向共计 $2N$ 个双跨梁的承载力-位移曲线,因此,不同曲线叠加后会有多个特征点,为简化计算,本文采用“5折线”计算模型(图 13)表示多层 RC 框架的抗连续倒塌承载力,各特征点的荷载、位移可由式(11)~(16)表示。其中,当失效柱头两侧梁内配筋不一致时,对应的承载力取为依照两侧框架梁配筋计算出的承载力均值^[20, 22]。

$$v_{E_1} = \min(v_{Axi}, v_{Ayi}) \quad (11)$$

$$v_{E_2} = \max(v_{Axi}, v_{Ayi}) \quad (12)$$

$$v_{E_3} = v_{Bxi} \quad (13)$$

$$v_{E_4} = 0.1l_{n1} \quad (14)$$

$$v_{E_5} = 0.2l_{n1} \quad (15)$$

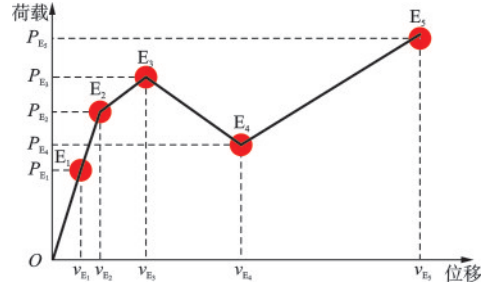


图 13 RC 框架结构的抗连续倒塌简化荷载-位移曲线
Fig.13 Simplified load-displacement curve for the progressive collapse resistance of an RC frame

$$P_{E_j} = \sum_{i=1}^N (P_{xi}(v_{E_j}) + P_{yi}(v_{E_j})), (j = 1, 2, \dots, 5) \quad (16)$$

式中, l_{n1} 表示结构首层的单跨梁长; $P_{xi}(v_{E_j})$ 表示位移达到 v_{E_j} 时第 i 层 x 向梁的承载力贡献; $P_{yi}(v_{E_j})$ 表示位移达到 v_{E_j} 时第 i 层 y 向梁的承载力贡献。

3.4 模型验证

为了验证上述计算模型的准确性,基于上述计算流程,计算了 W.J. Yi 等^[4]的 3层平面 RC 框架试验及表 1 中 9 个框架的承载力-位移曲线。其中,以 W.J. Yi 等^[4]的试验为例,给出了典型算例的计算流程和计算与试验结果的对比,如图 14 所示。此外,本文也计算了表 1 中 9 个框架的承载力-位移曲线,与 OpenSees 的计算结果对比如图 15 所示。

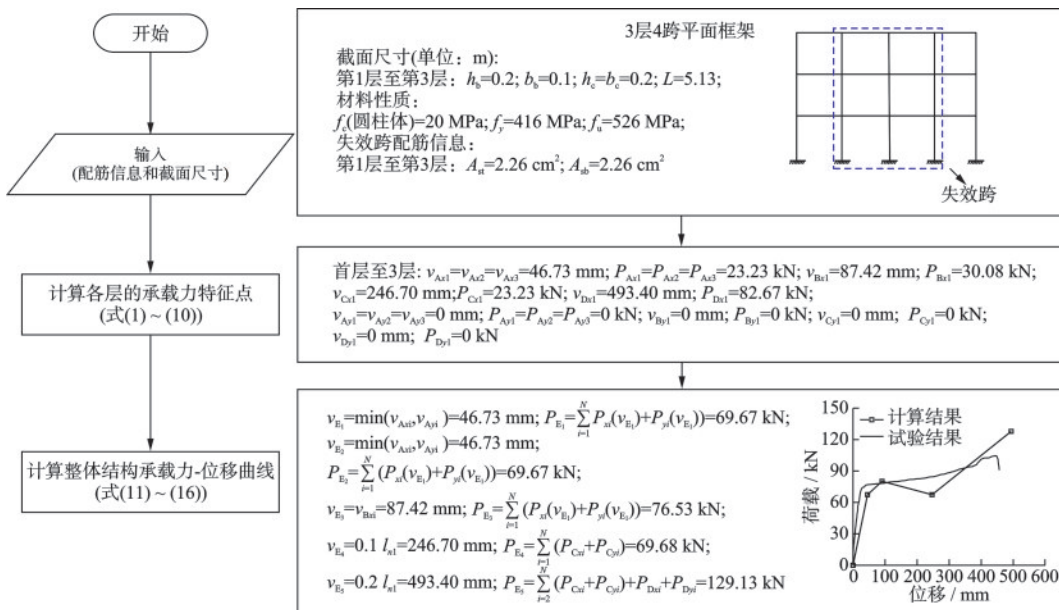


图 14 典型多层 RC 框架的计算流程^[4]

Fig.14 Calculation process of a typical multi-story RC frame^[4]

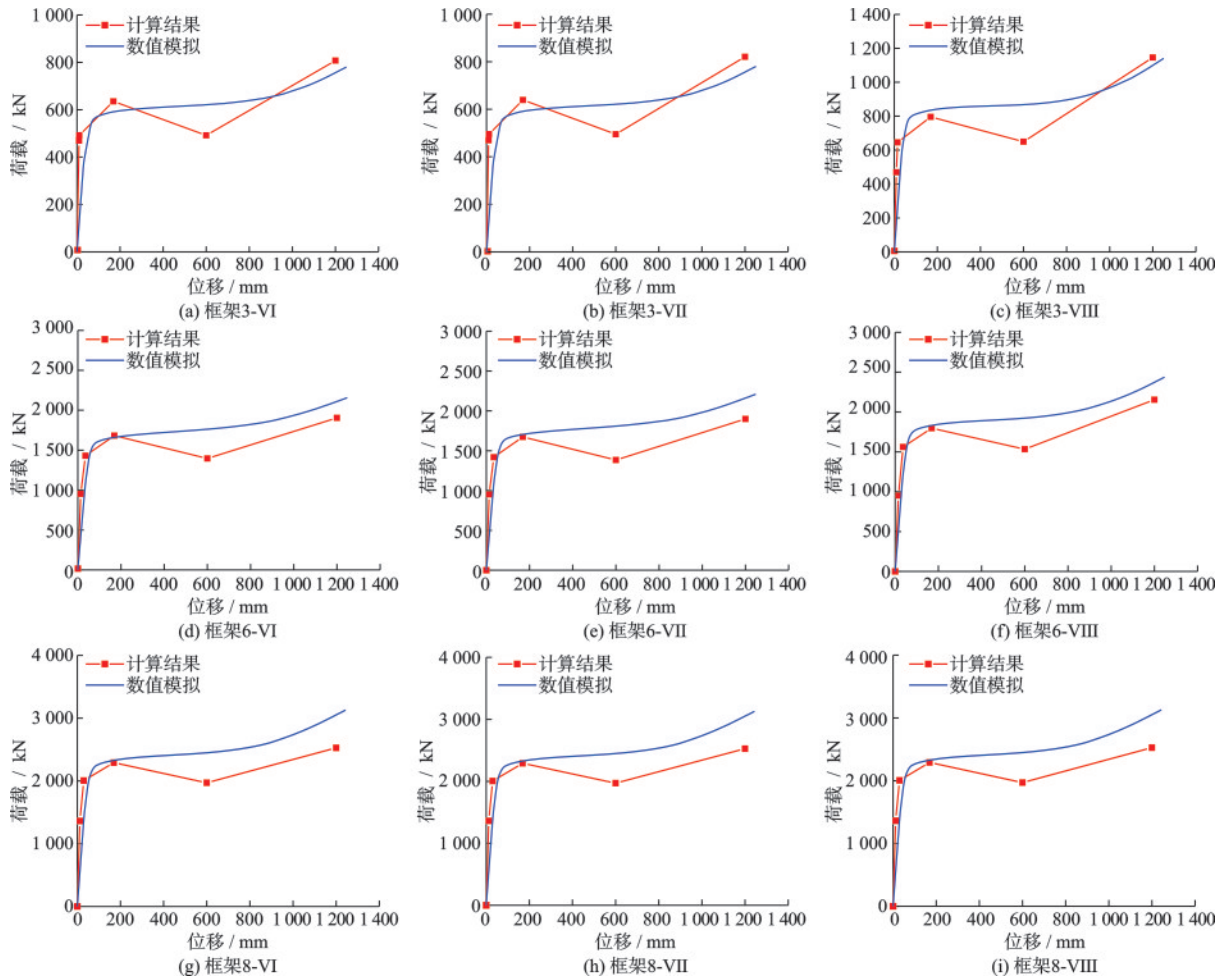


图15 数值模拟与计算结果对比

Fig.15 Comparison of numerical simulations and calculated results

结果表明,本文的计算结果在转换点及悬链线机制阶段与数值模拟有所误差,该误差可能是由于模型在计算过程中的一些简化导致的,包括MGGP模型的简化假设^[9]和各层承载力贡献的简化计算假设等。但是,总体而言,基于本文提出的多层RC框架连续倒塌抗力计算模型,可以较好地估计试验和数值模拟得到的多层RC框架在底层中柱失效后的静力连续倒塌承载力-位移关系。

4 结论

结构的抗连续倒塌设计亟需建立准确和高效的计算模型。然而,既有研究缺少对空间RC框架结构各层抗连续倒塌受力机制的讨论,且理论计算模型大多集中于计算RC框架梁-柱子结构的连续倒塌抗力。因此,本研究依据我国标准^[10]设计了9个典型的多层RC框架,基于OpenSees建立了这些

框架数值模型,分析了多层RC框架在底层内柱失效时的抗连续倒塌受力机制,建立了适用于多层RC框架内柱失效的连续倒塌抗力计算模型。本研究的主要结论如下:

(1)对于底层内柱失效的多层RC框架,RC框架首层梁内存在显著的压拱机制和悬链线机制。

(2)当多层RC框架沿楼层高度方向布置了不同尺寸的构件时,截面尺寸变化的下部楼层全程受压且出现了显著的压拱受力机制,上部楼层则全程受拉,但该上部楼层的悬链线发展程度较弱,主要通过受弯机制提供抗力。

(3)除了上述楼层外,结构的其他楼层梁在底层内柱失效后,均通过受弯机制提供连续倒塌抗力。

(4)底层内柱失效后,结构的连续倒塌抗力可以表示为不同楼层梁的抗力之和。在此基础上,依据RC框架各楼层梁的受力机制,结合单层RC框架梁-柱子结构的连续倒塌抗力计算模型,提出了适用

于多层RC框架底层中柱失效的连续倒塌抗力计算模型,与试验和数值模拟结果对比验证了所提模型的准确性。对于其他楼层及其他位置柱失效的状况,可以参考本文的研究流程开展讨论分析并提出对应的承载力计算模型。

上述研究成果可以为多层RC框架结构的抗连续倒塌分析与设计提供参考。

参考文献:

- [1] 初明进,周育洸,陆新征,等. 钢筋混凝土单向梁板子结构抗连续倒塌试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 31-40.
Chu M J, Zhou Y L, Lu X Z, et al. An experimental study on one-way reinforced concrete beam-slab sub-structures for resisting progressive collapse [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 31-40. (in Chinese)
- [2] 何庆锋,易伟建. 考虑悬索作用钢筋混凝土梁柱子结构抗倒塌性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4):52-59.
He Q F, Yi W J. Experimental study of the collapse-resistant behavior of RC beam-column sub-structures considering catenary action [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 52-59. (in Chinese)
- [3] 秦卫红,刘昕煜,惠卓,等. 纵筋屈服后刚度对混凝土梁柱子结构抗连续倒塌性能的影响[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1):21-31.
Qin W H, Liu X Y, Hui Z, et al. Effect of post-yield of longitudinal reinforcement on the progressive collapse behavior of concrete beam-column sub-assemblages [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 21-31. (in Chinese)
- [4] Yi W J, He Q F, Xiao Y, et al. Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures [J]. ACI Struct Journal, 2008, 105(4): 433-439.
- [5] 程建军,喻君,刘军. 中柱失效时多层RC平面框架荷载传递机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 259-266.
Cheng J J, Yu J, Liu J. Load transfer mechanisms of multi-story planar frame subjected to a middle column removal scenario [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 259-266. (in Chinese)
- [6] Qian K, Weng Y H, Fu F, et al. Numerical evaluation

of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behaviour of multi-story RC frames [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101636.

- [7] Brunesi E, Parisi F. Progressive collapse fragility models of European reinforced concrete framed buildings based on pushdown analysis [J]. Engineering Structures, 2017, 152: 579-596.
- [8] 乔惠云,杨应华,钟炜辉. 中柱失效下多层框架的连续性倒塌分析与机理研究[J]. 振动与冲击, 2017, 37(22):136-143.
Qiao H Y, Yang Y H, Zhong W H. Progressive collapse analysis and mechanism study for multi-story frame structures with middle-column demolition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 37(22): 136-143. (in Chinese)
- [9] Lin K Q, Li D Y, Xie L L, et al. Analytical model for progressive collapse of RC frame beam-column sub-structures using multi-gene genetic programming [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(13): 2350150.
- [10] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 建筑抗震设计标准: GB/T 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [12] 刘传卿,梅佐云,孙海峰. 基于纤维模型的钢框架连续倒塌抗力机制分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(4): 424-429.
Liu C Q, Mei Z Y, Sun H F. Analytical investigation of progressive collapse resistance mechanism in steel moment frame with fiber model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(4): 424-429. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] Mander J B, Priestley M J N, Park M R, et al. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1805-1826.
- [15] Lu X Z, Lin K, Li C F, et al. New analytical calculation models for compressive arch action in reinforced concrete structures [J]. Engineering Structures, 2018, 168: 721-735.

(本文编辑:张艺)

(下转第 1335 页)