

文章编号: 1000-4750(2019)01-0216-11

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

周 云^{1,2,3}, 陈太平¹, 胡 翔¹, 易伟建^{1,2}

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410082; 2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南, 长沙 410082;
3. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南, 长沙 410082)

摘 要: 为了考察周边结构约束对钢筋混凝土(RC)框架结构防连续倒塌承载能力的影响, 该文通过 Qian K 等进行的中柱移除的框架子结构拟静力试验, 校核了论文中 ABAQUS 软件建立的框架子结构精细有限元分析模型的准确性。模拟所得的荷载位移曲线与试验曲线吻合良好, 较好地模拟了中柱移除至子结构破坏的全过程。在成功进行模型校核的基础上, 通过改变平面框架两侧边跨的约束情况, 分析了两侧边跨约束对所研究子结构防连续倒塌承载力的影响; 其次通过对比考虑楼板与不考虑楼板的单层空间结构的承载力, 分析了楼板在结构防连续倒塌受力过程中对提高压拱阶段和悬链线阶段承载力的作用, 讨论了楼板对连续倒塌各个受力阶段不同的影响; 最后建立了多层空间框架结构模型, 研究框架底层柱移除过程中结构的承载能力, 分析发现楼层数的增加, 成倍地提高框架结构承载力, 并对连续倒塌各个受力阶段产生不同的影响。

关键词: 混凝土框架结构; 连续性倒塌; 有限元分析; 楼板作用; 多层结构; 悬链线效应; 压拱效应

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.11.0887

PROGRESSIVE COLLAPSE RESISTANCE OF RC FRAME STRUCTURES CONSIDERING SURROUNDING STRUCTURAL CONSTRAINTS

ZHOU Yun^{1,2,3}, CHEN Tai-ping¹, HU Xiang¹, YI Wei-jian^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Green Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: This study investigated the effects of surrounding structural constraints on the bearing capacity of progressive collapse resistance of reinforced concrete (RC) frame structures. The accuracy of the sub-structural detailed finite element model established by the ABAQUS software was verified by the Qian K's pseudo-static tests via the middle column removal of the sub-frame. The load-displacement curves obtained from the simulation were in good agreement with tested results, and the whole processes of the middle column removal until the sub-structure failure were well simulated. After the verification of the model, the effects of lateral span constraints on the plane sub-structural progressive collapse capacity were studied by varying the lateral span constraints. The effects of floor slab on improving the bearing capacity of arch and catenary stage were analyzed by comparing the capacity of a single-story space structure with or without considering the slab. Different effects of slab on various

收稿日期: 2017-11-22; 修改日期: 2018-01-31

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400, 2016YFC0701308); 湖南省科技计划项目(2017SK2220); 长沙市科技计划项目(kq1706019); 国家自然科学基金项目(51338004)

通讯作者: 陈太平(1990—), 男, 甘肃人, 硕士生, 从事框架结构防连续倒塌性能的研究(E-mail: hnu_chentp2015@163.com).

作者简介: 周 云(1979—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测及动力识别的研究(E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn);

胡 翔(1993—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事框架结构防连续倒塌性能的研究(E-mail: 2459936667@qq.com);

易伟建(1954—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构基本理论及结构损伤诊断研究(E-mail: wjyi@hnu.edu.cn).

stages of progressive collapse were discussed. Multi-stories space structural models were established to study the structural bearing capacity during bottom column removal. The results show that increasing the number of stories multiplied the bearing capacity of the frame structure and exerted different effects on various stages of progressive collapse of RC frame structures.

Key words: RC frame structure; progressive collapse; finite element analysis; slab action; multi-stories structure; catenary action; arch action

自从英国 Ronan Point 公寓连续性倒塌事故^[1]发生以来, 多层结构的防连续性倒塌引起了工程界的关注。所谓连续性倒塌, 即由初始的局部破坏, 从构件到构件扩展, 最终导致一部分或整个结构倒塌。一般来说结构的最终破坏状态与初始破坏状态不成比例。引起连续倒塌的因素主要为煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等意外事件。

为了研究 RC 框架结构体系在偶然荷载作用下发生连续倒塌破坏的可能性、倒塌过程中力的转换机制以及结构受力特性等机理, 国内外学术界和工程界对倒塌破坏实例进行了大量的分析, 开展了大量的抗连续性倒塌试验研究。Powell^[2]利用能量平衡原理对 1 个一层两跨框架结构进行了抗连续性倒塌分析, 在失去中柱时结构的重力势能逐渐转变为该结构的变形能和动能, 当重力势能完全转化为变形能, 结构的位移达到最大值, 此时框架动能为零。Zdenfk^[3]从能量平衡的角度阐述连续性倒塌: 当结构外部受到撞击所产生的动能超过了结构自身能吸收能量限制时, 结构将发生连续性倒塌。易伟建等^[4]利用拟静力试验方法对 1 榀三层四跨钢筋混凝土平面框架进行了抗连续性倒塌试验研究。Su 等^[5]通过数值分析模型研究了不同梁配筋率、梁跨高比和加载速率下的钢筋混凝土框架子结构抗连续性倒塌的性能, 预测模型的压拱机制与悬链线机制的能力。Lew^[6]进行了 2 个不同抗震等级的足尺梁柱框架子结构抗连续性倒塌试验并进行模拟分析。陆新征等^[7-9]开展了 RC 框架子结构拟静力倒塌的系列试验研究, 包括 1 个三层四跨 RC 框架、2 个关键梁柱节点和 4 个关键框架柱。研究表明纤维模型仍然是最适合的计算模型。Bao 等^[10]通过使用宏模型对 RC 框架结构的连续性倒塌过程进行数值分析, 利用高仿真有限元分析软件同样对这一倒塌过程进行模拟表明了宏模型是有效性。Ren 等^[11]和 Lu 等^[12]通过试验研究了单向约束梁板系统移除中柱和边柱情况下楼板所起到的作用。结果表明楼板可以显著提高结构的抗连续性倒塌承载力。Jun

等^[13-14]利用 Ls-dyna 显示有限元分析了梁板子结构移除边柱过程中的荷载转化机理和承载能力, 探讨了边界约束、板厚和板筋等对子结构受力机理的影响, 且研究认为将楼板等效为 T 或 L 型梁的翼缘低估了大变形下结构的承载力。Pham 等^[15]利用数值模拟分析了均布加载下梁板子结构移除框架柱的破坏模式和承载能力。分析发现, 楼板悬膜效应对边界条件的依赖远小于梁悬链线效应, 并且梁悬链线效应在梁板系统分析中可以保守的忽略。Dat 等^[16]通过理论和数值分析了双向约束作用下梁板楼盖系统在移除中柱情况下的荷载传递路径和承载能力, 研究表明楼板可以大大提高框架结构的承载能力。刁梦竹等^[17]提出将楼板沿两个平面方向离散形成一个梁网, 每个方向上的网格线采用纤维梁单元来模拟钢筋和混凝土的组合受力行为的方法大大提高了整体结构运算效率。周育洸等^[18]建立的压拱机制下梁板子结构系统的连续倒塌抗力分析模型, 在计算梁板共同作用下的连续倒塌抗力时精度提高显著。左文武^[19]通过 SAP2000 软件建立空间框架结构模型, 分析了楼板对框架结构倒塌性能的影响, 并分析了局部楼板破坏时结构的承载能力。刘帅^[20]利用 ABAQUS 软件中的梁单元建立空间结构的分析模型, 讨论了不同层数的结构防连续倒塌的能力。李晓路等^[21]建立了纵横向均为 2 跨的单层空间框架模型, 分析了梁板柱相互作用下结构的承载能力。戎贤等^[22]进行的 1/3 比例缩尺的两层 3×2 跨的空间框架底层边柱和角柱的拟静力倒塌试验表明楼板和梁的钢筋产生的悬链线效应在异形柱空间框架倒塌中发挥重要作用。

基于前述研究成果表明, 对于 RC 框架结构, 典型的替代路径法(ALP)包括弯曲作用、压拱作用和悬链线作用^[23]。弯曲作用是基于 RC 结构构件的受弯能力而其承载力较小, 压拱作用和悬链线作用承载力将会超过常规设计承载力, 尤其是悬链线作用, 在结构大变形下形成并且充分利用了钢筋的抗拉强度, 被认为是结构抵抗连续性倒塌的最后一道

防线。压拱作用和悬链线作用的发挥与周边约束密切相关，因此研究周围框架对研究子结构约束的强弱及承载力的影响很有必要。另外，楼板作为框架结构的组成构件，在框架结构防连续倒塌中常常被忽略，板在结构受力中形成压膜作用和拉膜作用，有利于结构防连续性倒塌。进一步地，研究符合实际结构的多层空间框架结构防连续倒塌承载能力很有必要。

本文利用有限元软件 ABAQUS 强大的非线性分析功能，建立了精细的有限元模型，对 Qian 等^[24]做的试件进行模拟分析，模拟过程中考虑了材料非线性、边界条件非线性以及结构大变形的影响。在校准有限元计算模型的基础上，为了进一步研究框架边跨对研究子结构性能的影响，对平面框架设置了不同的边跨约束工况，分析了静力荷载下框架子结构防连续性倒塌性能的承载能力；另外建立单层空间框架模型，研究静力荷载作用下考虑楼板的 RC 框架结构在框架柱失效时的防连续倒塌的能力，分析楼板在整体结构防连续性倒塌受力过程中的作用；进一步地，建立多层空间框架模型，研究其在底层不同位置处框架柱移除过程中的承载能力，分析楼层对结构防连续倒塌性能的影响。

1 混凝土框架结构的建立

本文研究的原型结构为 1 栋纵横向均为四跨层高为 3.6 m 的三层框架结构，如图 1 所示。柱截面是边长为 800 mm 的正方形截面，纵横向框架梁截面分别为 400 mm×720 mm 和 320 mm×560 mm，楼板厚度为 220 mm。本文按照 1/4 缩尺建立 RC 框架结构防连续倒塌有限元分析模型，见表 1。

利用南洋理工大学 Qian 等^[24]的框架子结构拟静力试验结果校验分析模型的正确性，并分别利用平面框架和空间框架模型研究其在静力荷载下防连续倒塌的承载能力。

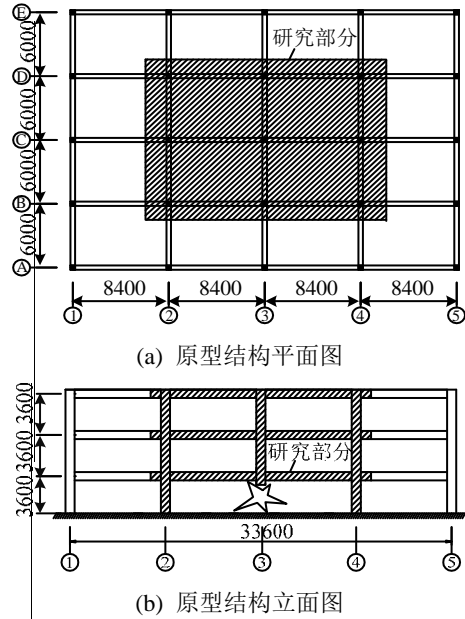


图 1 原型结构图

Fig.1 Prototype structure diagram

表 1 分析模型表

Table 1 Analytical models

模型编号	尺寸规格	模型信息
PF1	1/4 缩尺	平面框架结构，两侧无边跨约束作用
PF2	1/4 缩尺	平面框架结构，右侧有边跨约束作用
PF3	1/4 缩尺	平面框架结构，两侧有边跨约束作用
SF4	1/4 缩尺	单层空间框架，不考虑楼板作用
SF5	1/4 缩尺	单层空间框架，考虑楼板作用
SF6	1/4 缩尺	一层空间框架结构
SF7	1/4 缩尺	二层空间框架结构
SF8	1/4 缩尺	三层空间框架结构

1.1 Qian 等^[24]试验的简介

Qian 等^[24]进行了 1 批 1/4 缩尺框架子结构试验，试件参数见表 2，包括 P、T 和 S 三个系列，每个系列包括 2 个试件。P 系列试件为平面框架，包括三根柱两根梁，T 系列为十字型交叉空间框架，包括五根柱四根梁，S 系列试件为考虑楼板作用的田字形空间框架，包括九根柱十二根梁。这批试件均为短柱头，且边柱柱头配筋局部加强。图 2 给出

表 2 试验构件信息表

Table 2 Specimen properties

构件 编号	试件规格				纵向钢筋			横向箍筋	
	柱截面/mm ²	梁截面/mm ²	梁轴跨/mm	板厚/mm	柱纵筋	梁纵筋	板配筋	节点/(%)	梁截面/(%)
P1	200×200	100×180	2100	—	4T13	4T10	—	0.8	0.5
P2	200×200	80×140	1500	—	4T13	4T10	—	0.8	0.6
T1	200×200	100×180/80×140	2100/1500	—	4T13	4T10	—	0.8	0.5/0.6
T2	200×200	80×140	1500	—	4T13	4T10	—	0.8	0.6
S1	200×200	100×180/80×140	2100/1500	55	4T13	4T10	R6@250	0.8	0.5/0.6
S2	200×200	80×140	1500	55	4T13	4T10	R6@250	0.8	0.6

了试件 S1 的规格尺寸和钢筋布置图。试件 P1 和 P2 参数分别同 S1 试件 B-B 和 A-A 剖面的平面框架，试件 T1 参数同 S1 试件中十字型交叉空间框架。表 3 为试验材料力学性能表。

表 3 材料性能参数

Table 3 Properties of materials

项目	钢筋类型	屈服强度 f_y /MPa	屈服应变 ϵ_y / $\mu\epsilon$	极限强度 f_u /MPa	伸长率 δ /%
钢筋	R6	355	1910	465	17.5
	T10	437	2273	568	13.1
	T13	535	2605	611	11.6
	T16	529	2663	608	14.3
混凝土	圆柱体抗压强度分别为: P1: 19.9 MPa P2: 20.8 MPa T1: 21.5 MPa S1: 21.4 MPa				

试验过程通过位移控制在 S1 试件中柱 Z2 上表面按比例线性施加向下的集中位移来模拟中柱移除过程，试验加载直至试件破坏失效。其余试件加载与其相同，在边柱头固定情况下，中柱上表面逐

渐施加静力荷载。得到了试件的荷载位移曲线与承载能力。

1.2 混凝土和钢筋的本构关系

1.2.1 混凝土本构

本文利用有限元软件 ABAQUS 模拟 Qian 等^[24]所做的框架子结构试验的力学性能，利用损伤塑性 CDP 模型模拟混凝土的非线性行为。CDP 模型是连续的、基于塑性的混凝土损伤模型，采用各向同性弹性损伤及各向同性拉伸和压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性行为^[25]。ABAQUS 损伤塑性模型将损伤指标引入混凝土模型，对混凝土的弹性刚度矩阵加以折减，以模拟混凝土的卸载刚度随损伤增加而降低的特点，并且将非关联硬化引入混凝土塑性本构模型中，以期更好的模拟混凝土的受压弹塑性行为^[26]。

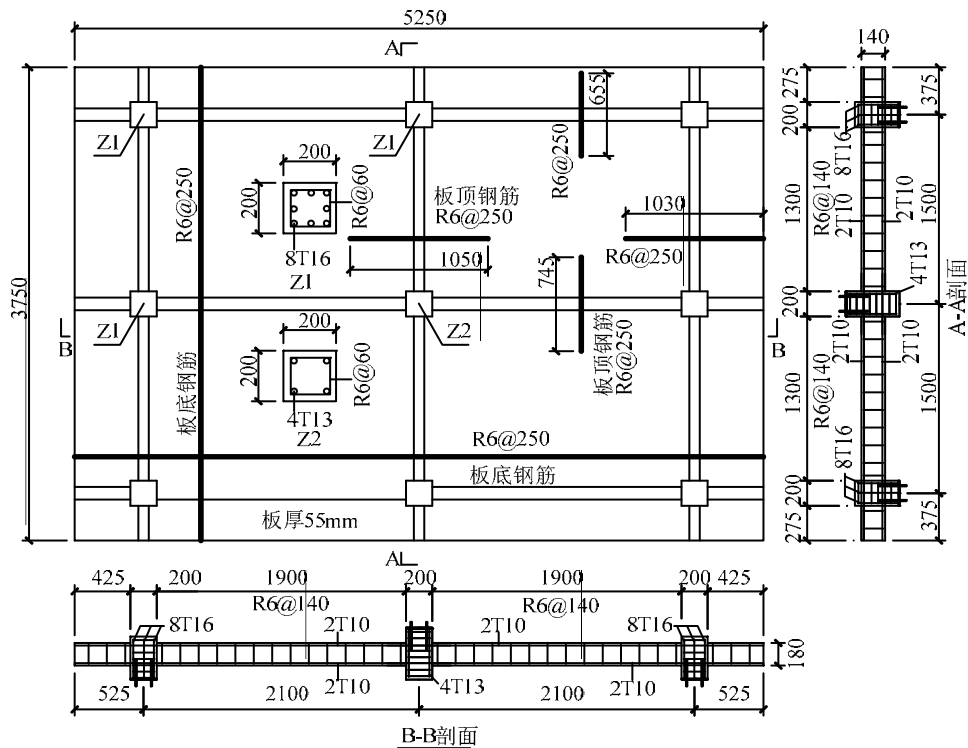


图 2 试件 S1 尺寸与配筋图

Fig.2 Dimension and reinforcement details of S1

混凝土的损伤包括受拉开裂和受压压溃两种主要的破坏模式，分别由受拉和受压的等效塑性应变控制。表 4 列出了定义 CDP 模型的五个参数。

表 4 CDP 模型参数^[25]

Table 4 Parameter of CDP model

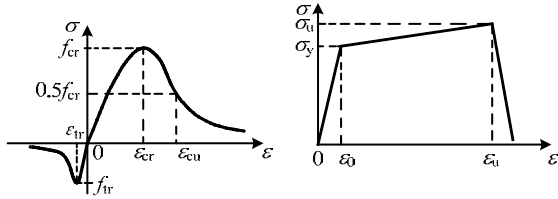
参数名称	膨胀角 Ψ	流动势偏移量 ϵ	双单轴抗压强度比 σ_{b0}/σ_{c0}	屈服面形状参数 K_c	粘性系数 μ
数值	30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

本文采用图 3(a)所示的混凝土单轴应力-应变关系曲线，这是我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[27]推荐的曲线，包括混凝土单轴受压和受拉应力-应变曲线，分别模拟混凝土受拉开裂和受压压溃过程的受力性能。

1.2.2 钢筋本构

根据表 3 的试验结果，纵向受力钢筋采用线性强化模型，考虑到连续倒塌过程中钢筋会发生断

裂，钢筋单轴应力应变曲线采用如图 3(b)所示的本构，钢筋应力达到极限值后会降为一个很小的应力值，并保持稳定，模拟中以此下降点作为钢筋断裂的依据。用理想弹塑性模型来模拟箍筋。在 ABAQUS 软件中用传统的金属塑性来模拟钢材的性能。



(a) 混凝土应力-应变曲线 (b) 钢筋应力-应变曲线

图 3 材料应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of materials

1.3 建模过程

模型中混凝土采用三维六面体减缩实体单元 C3D8R，钢筋采用三维二节点桁架单元 T3D2，钢筋骨架通过 EMBED 命令嵌入到混凝土中，这种方式能够很好的模拟钢筋与混凝土一起受力的性能。混凝土单元网格大小为 30 mm，钢筋单元大小为 50 mm，网格划分采用结构化网格划分技术。图 4 给出了试件 S1 的有限元模型图。

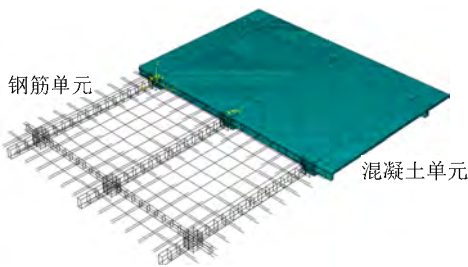


图 4 试件 S1 有限元模型图

Fig.4 Finite element model of S1

为了简化计算，提高运算速度，本模型对 Qian 等^[24]系列试验的边界条件进行了简化模拟，忽略了固定用的螺栓和钢板的影响，两个边柱头上下表面均采用完全固定约束。根据试验过程荷载的施加方式，模型采用位移控制施加集中荷载，施加点为与中柱上表面耦合在一起的参考点，约束中柱的转动，使其竖直向下运动。利用 ABAQUS/Standard 通用分析模块求解。

1.4 模拟结果

图 5 为试件 P1 的模拟结果，从图中可以看出模拟曲线和试验曲线吻合较好，变化趋势相同。在压拱机制峰值荷载之前，试验值和模拟值基本重合，在压拱机制峰值荷载到悬链线机制峰值荷载之间，模拟曲线稍高于试验曲线。压拱机制和悬链线

机制峰值荷载的模拟值稍大于试验值。图 6 为试件 P2 的模拟结果，同 P1 的模拟结果一样，P2 试验曲线和模拟曲线吻合良好，尤其是悬链线机制的上升段，模拟曲线与试验曲线基本重合。关键节点的荷载和位移值见表 5。

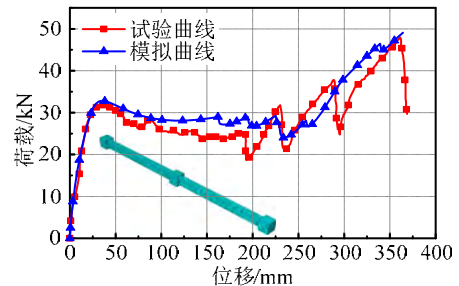


图 5 试件 P1 试验与模拟荷载-位移曲线

Fig.5 Tested and simulated load-displacement curve of P1

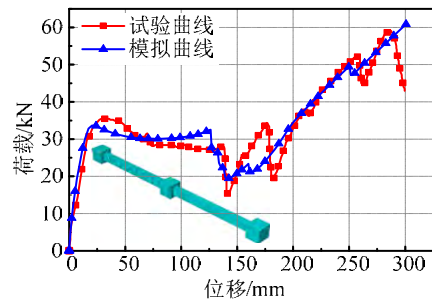


图 6 试件 P2 试验与模拟荷载-位移曲线

Fig.6 Tested and simulated load-displacement curve of P2

图 7 为试件 T1 的模拟结果，从图中可以看出模拟曲线和试验曲线吻合较好。在压拱机制峰值荷载之前，试验曲线和模拟曲线完全重合，在压拱机制荷载后下降段有所差异，悬链线机制上升阶段试验曲线和模拟曲线吻合良好。压拱机制峰值荷载的模拟值和试验值相差很小，悬链线机制荷载的模拟值和试验值也较为吻合。图 8 为试件 S1 的模拟结果。压拱机制峰值荷载前试验曲线和模拟曲线有所差异，悬链线机制上升段试验曲线和模拟曲线吻合很好。所不同的是试验曲线在压拱机制峰值荷载之后有所降低，而模拟曲线则没有明显下降阶段，相对变得平缓，然后继续上升。关键节点的荷载和位移值见表 5。

图 9~图 11 分别为试件 P1、T1 和 S1 试验和模拟破坏裂缝模式对比图。P1 试件的试验破坏裂缝模式与模拟破坏裂缝模式相同，中柱端梁端下部混凝土受拉开裂，上部受压破坏；边柱端梁端上部混凝土受拉开裂，下部受压破坏。T1 试件的试验破坏裂缝模式与模拟结果有所差异，试验试件破坏主要为一根短跨梁在靠近中柱处受剪破坏，而模拟结果为

表 5 Qian K 等系列试件试验与模拟对比表

Table 5 Comparison of tested and simulated of Qian K et al series specimens

试件		开裂荷载	屈服荷载	压拱峰值	压拱位移	$\frac{F_{u,模}}{F_{u,试}}$	悬链线峰值	悬链线位移	$\frac{F_{t,模}}{F_{t,试}}$
		F_{cr}/kN	F_y/kN	F_u/kN	w_u/mm		F_t/kN	w_t/mm	
P1	试验值	8	24	32	35	1.026	47	361	1.043
	模拟值	8.70	23.9	32.82	34.96		49	-	
P2	试验值	11	26	36	28	0.962	59	286	1.034
	模拟值	11.9	27.6	34.64	20.27		61	-	
T1	试验值	15	48	67	32.9	1.024	79	250.4	1.015
	模拟值	15.7	48.4	68.6	38.5		80.2	-	
S1	试验值	44	80	115	41.3	0.895	169	213.8	1.002
	模拟值	46	78.5	102.9	29.4		169.4	-	

注：系列试件的模拟悬链线峰值分别取试验悬链线位移所对应的中柱反力。

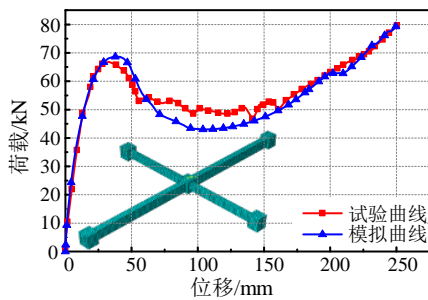


图 7 试件 T1 试验与模拟荷载位移曲线

Fig.7 Tested and simulated load-displacement curve of T1

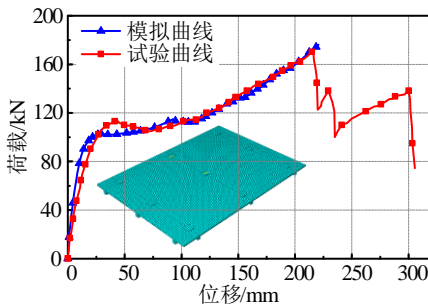
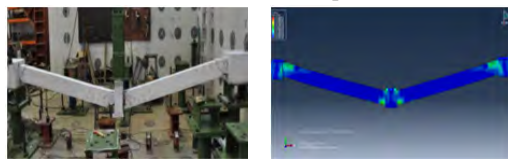


图 8 试件 S1 试验与模拟荷载位移曲线

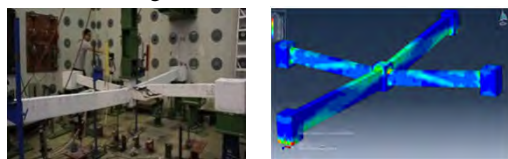
Fig.8 Tested and simulated load-displacement curve of S1



(a) P1 试验破坏模式^[19] (b) P1 模拟破坏模式

图 9 P1 破坏模式

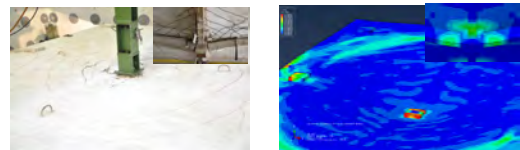
Fig.9 Failure mode of P1



(a) T1 试验破坏模式^[19] (b) T1 模拟破坏模式

图 10 T1 破坏模式

Fig.10 Failure mode of T1



(a) S1 试验破坏模式^[19] (b) S1 模拟破坏模式

图 11 S1 破坏模式

Fig.11 Failure mode of S1

在短跨梁出现剪切裂缝，但子结构长跨方向还可以继续承载；S1 试件试验与模拟破坏裂缝模式显示在楼板上表面均形成裂缝环，靠近板的外边的为受拉裂缝环，靠近中柱位置的为受压开裂环。梁的破坏为靠近中柱的梁端下部混凝土受拉开裂破坏。

2 不同边跨约束下平面框架结构防连续倒塌分析

平面框架结构的受力性能与其周围构件的约束情况密切相关，尤其是在结构中柱失效情况下，荷载传递路径依赖于周围构件的完整性。本文根据倒塌跨受到的不同边跨约束作用，建立 ABAQUS 有限元模型，分析倒塌跨在边跨约束下防连续倒塌的性能。边跨约束如图 12 所示，(a) PF1 模型，表示倒塌跨无边跨约束作用，(b) PF2 模型，表示倒塌跨右侧有边跨约束，(c) PF3 模型，表示倒塌跨两侧有边跨约束。通过在中柱上表面施加静力线性位移模拟中柱移除过程，直至梁受力钢筋断裂。

图 13 为模型 PF3 在中柱移除过程中边柱节点水平位移与中柱竖向位移之间的关系曲线，负值表示节点向框架外视为位移，正值表示节点向框架内的位移。可以看出，边节点先向外移动，之后又向内移动，据此将框架结构中柱移除过程分为压拱机制和悬链线机制。

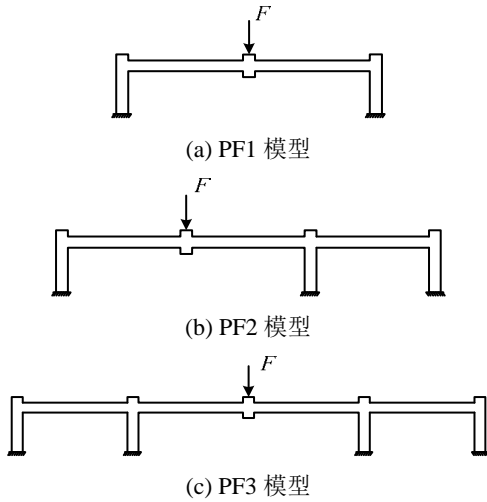


图 12 平面结构模型

Fig.12 Plane structure models

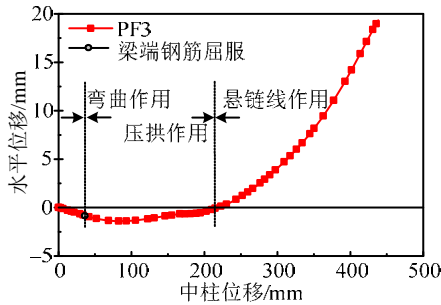


图 13 模型 PF3 边节点水平位移曲线

Fig.13 Horizontal displacement curve of model PF3 joint

图 14 为不同边跨约束情况下的框架子结构移除中柱过程中荷载位移关系曲线。采用不同的约束情况，子结构荷载位移曲线发展趋势整体相同，中柱位移在 150 mm 之前，三条曲线基本重合，差别很小，位移 150 mm 之后，荷载差别逐渐变大，其中 PF3 子结构模型荷载下降最明显，PF1 子结构模型荷载下降最少。悬链线阶段 PF3 子结构荷载增长

表 6 不同边跨约束下子结构承载能力和位移表

Table 6 Capacity and displacement of substructures with different lateral span constraints

模型编号	屈服荷载	压拱峰值	压拱位移	悬链线峰值	悬链线位移	边柱节点相对位移	
	F_y/kN	F_a/kN	w_a/mm	F_t/kN	w_t/mm	u_{min}/mm	u_{max}/mm
PF1	25.2	28.4	52.4	27.8	369.6	-2.21	65.02
PF2	25.6	28.9	51.9	26.7	445.9	-2.52	64.76
PF3	26.3	29.4	48.9	41.0	432.6	-2.80	38.64

表 6 为不同边跨约束下子结构关键点的荷载位移值。表中数据可以看出，子结构在弯曲阶段和压拱效应阶段的承载力差异很小，在悬链线效应阶段，子结构承载力差异较大。在悬链线阶段节点水平位移中，PF3 子结构模型左右边节点相对水平位移最小，为 38.64 mm，PF1 和 PF2 模型左右边节点

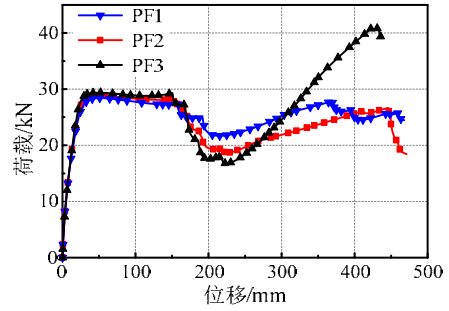


图 14 不同边跨约束下荷载-位移曲线

Fig.14 Load-displacement curve under different lateral span constraints

速率最快，PF1 和 PF2 子结构上升增长速率相当。

图 15 为不同边跨约束情况下边节点水平位移与中柱竖向位移之间的关系曲线。PF3 子结构模型边柱节点在竖向位移为 217 mm 时回到初始原点，PF1 子结构模型边节点在竖向位移则为 137 mm 时回到初始原点。PF2 子结构模型左节点与右节点位移不同，右侧有边跨约束，水平位移很小，左侧无边跨约束，水平位移较大，左右节点回到初始原点的时刻也不相同，分别为 131 mm 和 313 mm。每个子结构关键节点的具体荷载和位移见表 6。

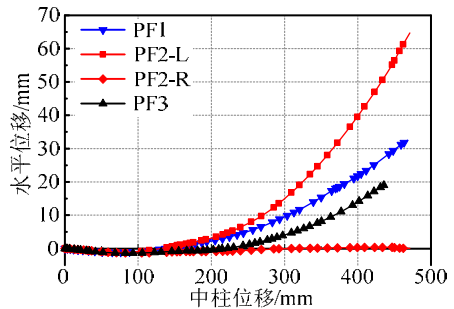


图 15 不同边跨约束下边节点水平位移曲线

Fig.15 Horizontal displacement curve of joint

水平相对位移相差不大，分别为 65.02 mm 和 64.76 mm，是 PF3 模型相对位移的 1.683 倍和 1.675 倍；悬链线阶段的承载力中 PF3 子结构模型为 41 kN、PF1 和 PF2 模型为分别 27.8 kN 和 26.7 kN，是 PF3 模型的 0.678 倍和 0.651 倍，说明框架子结构承载能力与边跨约束密切相关。两侧均存在边跨约

束时,子结构边节点水平相对位移小,边跨对倒塌跨框架梁的轴向约束大,悬链线阶段的承载能力也高。

3 考虑楼板影响的单层空间框架结构防连续倒塌分析

楼板作为框架结构的组成构件,在结构受力过程中起着非常重要的作用,但在框架结构防连续倒塌中常常被忽略。以单层空间子结构为研究单元,研究不同位置处框架柱失效时框架子结构防连续性倒塌的性能,分析楼板对结构防倒塌承载力的贡献。分析模型如图 16 所示,(a) SF4 模型,无楼板作用;(b) SF5 模型,有楼板作用。对 SF4 和 SF5 模型分别进行移除中柱、长跨边柱、短跨边柱和角柱的防连续倒塌性能分析,比较不同位置处框架柱失效时框架结构防倒塌的能力。通过对比 SF4 和 SF5 模型在同一位置处框架柱失效时防连续倒塌性能,分析楼板在结构防倒塌过程中的作用。通过在失效柱上表面施加静力线性位移来模拟框架柱的移除过程,直至梁受力钢筋断裂。

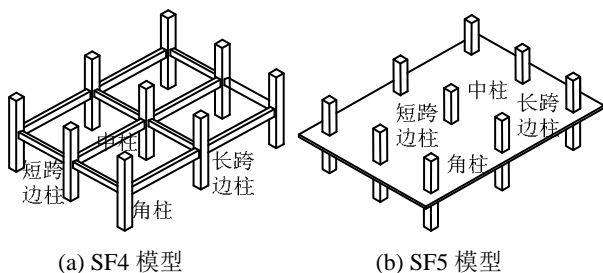


图 16 单层空间框架模型

Fig.16 Single-storey spatial frame models

图 17 为 SF4 模型不同位置处框架柱失效过程中荷载-位移曲线。图中可以看出,中柱和边柱移除过程中荷载都有两个上升段,压拱效应和悬链线效应明显,角柱移除过程中荷载只有一个上升段,无悬链线效应。比较四条曲线,中柱移除过程中子结构防连续性倒塌的能力最高,拱效应峰值和悬链线效应峰值荷载达 60.7 kN 和 90.2 kN。短跨边柱与长跨边柱在压拱效应阶段承载力相差不大,在悬链线阶段,短跨边柱移除过程承载力明显高于长跨边柱移除过程。角柱移除过程子结构防连续性倒塌能力最低,拱效应峰值约为移除中柱拱效应峰值的 0.49。

图 18 为 SF5 模型不同位置处框架柱失效过程中荷载-位移曲线。不同位置处框架柱移除过程中承载力大小关系与 SF4 模型相似,所不同的是,由于楼板作用,移除中柱和边柱移除过程中拱效应峰值之后没有明显的下降段。中柱移除过程中的子结构

防连续倒塌能力最高,拱效应峰值和悬链线效应峰值分别为 146.4 kN 和 264.3 kN。长跨边柱和短跨边柱移除过程中拱效应峰值相差不大,约为中柱移除峰值荷载的 0.5,悬链线效应峰值长跨中柱移除过程小于短跨中柱移除过程。角柱移除过程无悬链线效应发生,拱效应峰值为 48.2 kN,为中柱移除拱效应峰值的 0.33。具体承载力值见表 7。

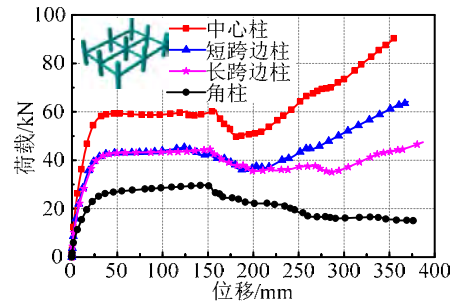


图 17 SF4 模型荷载-位移曲线

Fig.17 Load-displacement curve of SF4 model

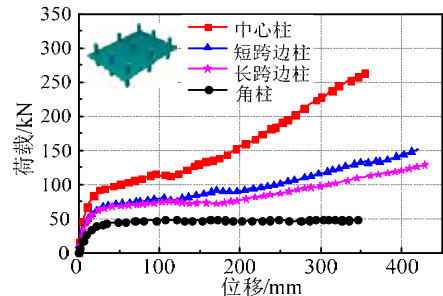


图 18 SF5 模型荷载-位移曲线

Fig.18 Load-displacement curve of SF5 model

表 7 列出了空间框架 SF4 和 SF5 模型不同位置处框架柱失效的承载力对比结果。相比于 SF4 模型,有楼板作用的 SF5 模型承载力明显更高。同一位置框架柱移除过程中,以框架子结构中柱移除过程为例,悬链线阶段承载力提高最高, SF5 模型与 SF4 模型悬链线效应峰值比为 2.92,压拱效应阶段承载力比值为 2.41,弯曲阶段承载力比值为 1.27。SF4 和 SF5 模型边柱和角柱移除过程也有相同的规律,同一位置处框架柱移除过程中 SF5 模型承载力均明显高于 SF4 模型,说明楼板明显提高了框架结构防连续倒塌承载能力,最高可达 2.92。并且,楼板对屈服阶段承载力提高系数最小为 1.25,压拱阶段承载提高 1.85,悬链线阶段提高最大,为 2.65。

4 考虑楼层影响的多层空间框架结构防连续倒塌分析

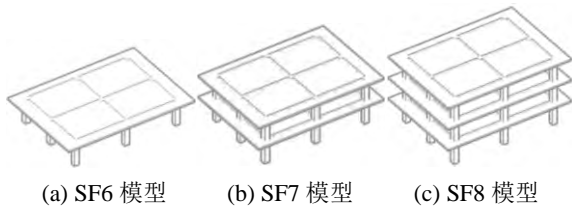
以 1 层~3 层空间框架子结构为研究单元,建立有限元模型,分析多层空间框架结构防连续倒塌性

表 7 考虑楼板作用的空间框架承载力汇总

Table 7 Bearing capacity summary of space frame considering slab action

工况	模型	屈服荷载 F_y/kN	$\frac{F_{y,5}}{F_{y,4}}$	压拱峰值 F_u/kN	压拱位移 w_u/mm	$\frac{F_{u,5}}{F_{u,4}}$	悬链线峰值 F_t/kN	悬链线位移 w_t/mm	$\frac{F_{t,5}}{F_{t,4}}$
中柱	SF4	52.4		60.7	158.7		90.5	355.9	
失效	SF5	66.7	1.27	146.4	187.6	2.41	264.3	355.8	2.92
长跨边柱	SF4	39.1		44.5	152.2		47.5	387.2	
失效	SF5	45.8	1.17	74.7	189.0	1.69	128.5	431.0	2.71
短跨边柱	SF4	36.5		45.5	125.9		64.2	370.5	
失效	SF5	45.9	1.23	76.4	84.83	1.68	151.1	420.9	2.35
角柱	SF4	22.2		29.8	150.4		-	-	
失效	SF5	34.0	1.53	48.2	121.2	1.62	-	-	-

能。分析模型示意如图 19 所示，图 19(a)~图 19(c) 分别为 1 层~3 层框架子结构模型。通过有限元模型对底层不同位置框架柱移除过程承载能力的分析，对比每个位置处不同楼层框架模型承载能力，得到结构承载力与楼层的关系。通过在失效柱上表面施加静力线性位移来模拟框架柱的移除过程，直至梁受力钢筋断裂。



(a) SF6 模型 (b) SF7 模型 (c) SF8 模型
图 19 多层空间框架模型

Fig.19 Multilayer spatial frame models

图 20 为模型 SF6 框架柱移除过程荷载与中柱竖向位移的关系曲线。分别研究了移除中柱、短跨边柱、长跨边柱和角柱时结构的承载能力。图中可以看出，中柱移除过程承载力最高，悬链线效应峰值荷载达 262.7 kN，长跨边柱与短跨边柱移除过程承载力相差不大，约为中柱移除过程承载力的 0.39，角柱移除过程承载力最低，为 48.2 kN，且无悬链线效应阶段。

图 21 为模型 SF7 在底层框架柱移除过程中的荷载位移曲线。中柱移除过程承载力为 490.8 kN，长跨边柱和短跨边柱移除过程承载力差异很小，约为中柱移除过程承载力的 0.49，角柱移除过程承载力最小，为 100.67 kN，且没有悬链线阶段。

图 22 为模型 SF8 在底层框架柱移除过程中的荷载位移曲线。与模型 SF6 和 SF7 有相似的规律，中柱移除过程承载力最大，为 469 kN，长跨边柱和短跨边柱移除过程承载力差异很小，角柱移除过程承载力为 155.36 kN。具体荷载位移值见表 8。

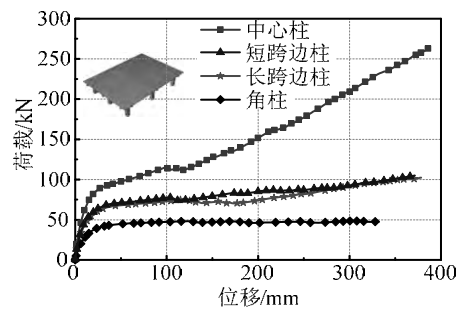


图 20 SF6 模型荷载-位移曲线

Fig.20 Load-displacement curve of SF6 model

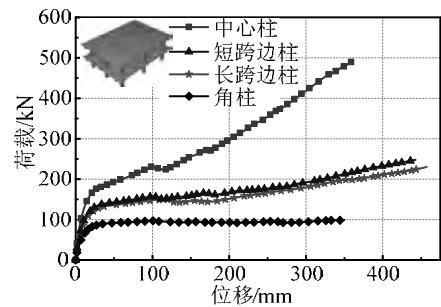


图 21 SF7 模型荷载-位移曲线

Fig.21 Load-displacement curve of SF7 model

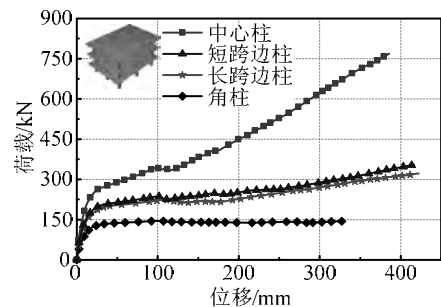


图 22 SF8 模型荷载-位移曲线

Fig.22 Load-displacement curve of SF8 model

表 8 给出了不同楼层框架结构在移除中柱、边柱和角柱过程中荷载位移对比值。中柱移除过程中，SF7 框架模型和 SF8 框架模型的拱效应峰值荷载分别为 SF6 框架模型的 2.17 倍和 3.24 倍，悬链线

表 8 空间框架不同楼层防连续倒塌承载力汇总

Table 8 Bearing capacity summary of space frame with different stories

工况	模型 编号	屈服荷载 F_y/kN	$\frac{F_{y,n}}{F_{y,6}}$	压拱峰值 F_p/kN	压拱位移 w_p/mm	$\frac{F_{u,n}}{F_{u,6}}$	悬链线峰值 F_t/kN	悬链线位移 w_t/mm	$\frac{F_{L,n}}{F_{L,6}}$
中柱 失效	SF6	61.8	1	106.1	76.10	1	262.7	385.94	1
	SF7	135.9	2.20	230.5	98.37	2.17	490.8	360.07	1.87
长跨 中柱 失效	SF6	54.4	1	71.7	160.29	1	102.3	378.27	1
	SF7	96.5	1.77	158.2	220.42	2.21	230.2	457.17	2.25
短跨 中柱 失效	SF6	46.1	1	73.8	72.14	1	104.5	371.46	1
	SF7	106.9	2.32	173.4	101.11	2.35	247.9	442.71	2.37
角柱 失效	SF6	36.4	1	48.2	120.28	1	—	—	—
	SF7	71.1	1.95	97.1	100.67	2.01	—	—	—
	SF8	107.2	2.95	140.4	155.36	2.91	—	—	—

注： $F_{y,n}$ 表示编号为 n 框架结构的屈服荷载， n 为6~8， $F_{u,n}$ 、 $F_{L,n}$ 意义相同。

效应峰值则分别为 SF6 框架模型的 1.87 倍和 2.93 倍。可以看出，随着框架结构层数的增加，结构的承载力成倍的增加，同样的规律在边柱和角柱移除过程也可以看到。说明楼层的增加，可以大幅度地提高结构防连续倒塌的能力。在相同层数分析时，中柱移除过程中，屈服阶段的承载力随楼层的增长幅度最大，压拱阶段次之，悬链线阶段最小。而边柱移除过程却有相反的规律，悬链线阶段增长幅度最大，屈服阶段增长最小。

5 结论

本文利用有限元软件 ABAQUS 的强大非线性分析能力，对 Qian 等^[24]框架子结构拟静力试验结果进行了精细有限元模拟。在此基础上，根据框架结构周围约束的不同，分析了平面子结构在左右不同跨约束下的防连续倒塌性能；建立了单层空间框架模型，分析了楼板对空间框架防倒塌性能的影响；进一步的建立了多层空间框架模型，分析了多层框架结构的防倒塌性能。本文主要结论为以下四点：

(1) ABAQUS 软件对 Qian 等^[24]框架子结构的精细化模拟与试验结构吻合良好，S1 试件拱效应峰值误差为 10%，其余试件误差均在 5% 以内。说明塑性损伤模型能够很好地模拟混凝土的受力性能，ABAQUS 对大变形下 RC 框架结构的模拟是可行的。采用《规范》推荐的混凝土本构和线性强化钢筋本构是可取的。

(2) 分析了平面 RC 框架子结构在受到两侧不同的边跨约束时的承载能力。两侧均有边跨约束子

结构承载力最高，尤其是悬链线阶段，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能力的 0.68。

(3) 分析了考虑楼板作用的单层空间框架结构除框架柱过程中结构防连续倒塌性能。在框架中柱、边柱和角柱移除过程中，考虑楼板作用的模型框架柱移除过程承载力均高于不考虑楼板作用的模型，且随着结构受力阶段的发展，楼板作用对屈服、压拱和悬链线各阶段的承载力提高幅度逐渐变大，悬链线阶段最明显，楼板可将其防连续倒塌承载力提高至 2.92 倍，大幅度提高了结构承载力。

(4) 分析了 1 层~3 层空间框架结构移除底层框架柱过程中结构防连续倒塌性能。RC 框架结构随着楼层的增多，不同位置处框架柱除过程中承载能力都成倍的增长。相同楼层时，中柱移除过程屈服阶段承载力增长幅度最大，压拱阶段次之，悬链线阶段最小；而边柱移除过程有着相反的规律，悬链线阶段增长幅度最大，屈服阶段增长最小。

参考文献：

- [1] Griffiths H, Pugsley A, Saunders O. Report of the inquiry into the collapse of flats at Ronan Point, canning town: presented to the Minister of Housing and Local Government [R]. London: HMSO, 1968.
- [2] Powell G. Progressive collapse: Case studies using nonlinear analysis [C]. New York: Structures Congress, 2005: 1—14.
- [3] Zdenfk P B. Mechanics of progressive collapse: learning from world trade center and building demolitions [J].

- Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(3): 308—319.
- [4] 易伟建, 何庆峰, 肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 104—117.
- Yi Weijian, He Qingfeng, Xiao Yan. Experimental study on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Building Structure, 2007, 28(5): 104—117. (in Chinese)
- [5] Su Y, Tian Y, Song X. Progressive collapse resistance of axially-restrained frame beams [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(5): 600—607.
- [6] 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]. Maryland, U.S. Department of Commerce, 2011.
- [7] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 I: 框架试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 19—22.
- Lu Xinzheng, Ye Lieping, Pan Peng, et al. Pseudo static collapse test and numerical simulation competition of reinforced concrete frame structure I: frame test [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 19—22. (in Chinese)
- [8] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 II: 关键构件试验[J]. 建筑结构 2012, 42(11): 23—26.
- Lu Xinzheng, Ye Lieping, Pan Peng, et al. Pseudo static collapse test and numerical simulation competition of reinforced concrete frame structure II: Key component test [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 23—26. (in Chinese)
- [9] 中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 III: 模拟结果分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 27—30.
- Member of building structural collapse prevention committee of Chinese Architectural Society. Pseudo static collapse test and numerical simulation competition of reinforced concrete frame structure III: Analysis of simulation results [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 27—30. (in Chinese)
- [10] Bao Y, Kunnath S K, El-Tawil S, et al. Micromodel-based simulation of progressive collapse: RC frame structure [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(7): 1079—1091.
- [11] Ren P Q, Li Y, Lu X Z, et al. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column-removal scenario [J]. Engineering Structures, 2016, 118(1): 28—40.
- [12] 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(1): 91—103.
- [13] Yu J, Luo L, Ge C. Numerical investigation on structural behavior of RC beam-slab assemblies under an exterior column removal scenario [J]. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, 2018, 1(1): 1252—1262.
- [14] Yu J, Luo L Z, Li Y. Numerical study of progressive collapse resistance of RC beam-slab substructures under perimeter column removal scenarios [J]. Engineering Structures, 2018, 159(1): 14—27.
- [15] Pham A T, Lim N S, Tan K H. Investigations of tensile membrane action in beam-slab systems under progressive collapse subject to different loading configurations and boundary conditions [J]. Engineering Structures, 2017, 150(1): 520—536.
- [16] Dat P X, Hai T K. Membrane actions of RC slabs in mitigating progressive collapse of building structures [J]. Engineering Structures, 2013, 55(4): 107—115.
- [17] 刁梦竹, 李易, 陆新征, 等. 钢筋混凝土楼板连续倒塌的一种简化模拟方法[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊): 72—78.
- Diao Mengzhu, Li Yi, Lu Xingzheng, et al. A simplified simulation method for continuous collapse of reinforced concrete floor [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(Suppl): 72—78. (in Chinese)
- [18] 周育泷, 李易, 陆新征, 等. 钢筋混凝土框架抗连续倒塌的压拱机制分析模型[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 34—42.
- Zhou Yulong, Li Yi, Lu Xingzheng, et al. Analysis model of compression arch mechanism for progressive collapse of reinforced concrete frame [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 34—42. (in Chinese)
- [19] 左文武. 楼板对混凝土框架结构抗连续倒塌性能的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- Zuo Wenwu. Effect of floor slab on concrete frame structure resistance to progressive collapse [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] 刘帅. RC 框架结构抗连续倒塌的 ABAQUS 仿真分析 [D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2012.
- Liu Shuai. ABAQUS simulation analysis of progressive collapse of RC frame structure [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway Institute, 2012. (in Chinese)
- [21] 李晓路, 李寰, 方士超, 等. RC 框架结构梁板柱空间协同抗连续性倒塌非线性有限元分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(21): 67—72.
- Li Xiaolu, Li huan, Fang Shichao, et al. RC frame slab column space to resist progressive collapse for nonlinear finite element analysis [J]. Building Structure, 2017, 47(21): 67—72. (in Chinese)
- [22] 戎贤, 张健新, 李艳艳. 钢筋混凝土异形柱空间框架抗倒塌试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 189—196.
- Rong Xian, Zhang Jianxin, Li Yanyan. Experimental study on progressive collapse of reinforced concrete special shaped column space frame [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 189—196. (in Chinese)

(参考文献[23]—[27]转第 237 页)

- 42(06): 77—103.
- [17] Kerr A D. The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads [J]. *Journal of Glaciology*, 1975, 17(76): 229—268.
- [18] Tan X, Su B, Riska K, et al. The effect of heave, pitch and roll motions to ice performance of ships [C]// *Iahr International Symposium on Ice*, 2012: 1080—1093.
- [19] Valanto P. The icebreaking problem in two dimensions: experiments and theory [J]. *Journal of Ship Research*, 1992, 36(4): 299—316.
- [20] 武文华, 于佰杰, 许宁, 等. 海冰与锥体抗冰结构动力作用的数值模拟[J]. *工程力学*, 2008, 25(11): 192—196.
Wu Wenhua, Yu Baijie, Xu Ning, et al. Numerical simulation of dynamic ice action on conical structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(11): 192—196. (in Chinese)
- [21] 王刚, 武文华, 岳前进. 锥体接触宽度对冰排弯曲破坏模式影响的有限元分析[J]. *工程力学*, 2008, 25(1): 235—240.
Wang Gang, Wu Wenhua, Yue Qianjin. FEM analysis on ice-bending failure mode with width effect of ice-cone interaction [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(1): 235—240. (in Chinese)
- [22] Di S, Xue Y, Wang Q, et al. Discrete element simulation of ice loads on narrow conical structures [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 146(12): 282—297.
- [23] Riska K, Leiviskä T, Nyman T, et al. Ice performance of the Swedish multi-purpose icebreaker *Tor Viking II* [C]// *16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 2001: 849—866.

(上接第 226 页)

- [23] Jun Y, Tan K H. Structural behavior of RC beam-column subassemblages under a middle column removal scenario [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(2): 233—250.
- [24] Qian K, Li B, Ma J X. Load-carrying mechanism to resist progressive collapse of RC buildings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(2): 4014107-1 — 4014107-14.
- [25] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. *工业建筑*, 2014, 44(增刊): 167—171.
Liu Wei, Xu Ming, Chen Zhongfan. Parameter calibration and verification of damage plasticity model for ABAQUS concrete [J]. *Industrial Construction*. 2014, 44(Suppl): 167—171. (in Chinese)
- [26] 江见鲸, 陆新征. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Jiang Jianjing, Lu Xingzheng. Finite element analysis of concrete structure [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [27] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)