

[文章编号]1002-8528(2011)05-0012-07

# 钢筋混凝土框架抗连续倒塌机制研究

李 易,陆新征,叶列平(清华大学土木工程系,清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室,北京 100084)  
陈适才(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100022)

[摘 要] 通过非线性动力拆除构件法,对不同抗震设防水平下的典型钢筋混凝土(RC)非整体现浇楼板框架和整体现浇楼板框架的抗连续倒塌机制进行分析。首先,总结出了两种典型连续倒塌模式并进行了讨论,发现框架柱的抗侧刚度不足将导致连续倒塌在水平向的传播。然后,通过分析框架在不同部位发生初始破坏后的力学响应,研究了框架结构不同部位的框架梁抗连续倒塌贡献,结果显示所有的框架梁都可以通过梁机制发挥抗连续倒塌承载力,但是只有两端具有足够水平支座约束框架梁才能发挥其悬链线机制的承载力。最后,通过研究框架结构的连续倒塌规律,分析了楼板和抗震设防烈度对框架抗连续倒塌性能的影响。

[关键词] 混凝土框架;抗连续倒塌机制;非线性动力拆除构件分析  
[中图分类号] TU375.4;TU311.4 [文献标识码] A

## Study on the Progressive Collapse Mechanism of RC Frame Structures

LI Yi, LU Xin-zheng, YE Lie-ping (Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Safety and Durability for Civil Engineering of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

CHEN Shi-cai (The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

[Abstract] The progressive collapse (PC) mechanism of two typical non-integrated slab and integrated cast-in-situ slab reinforced concrete (RC) frames, with different seismic fortification levels, is analyzed by the nonlinear dynamic alternate path (AP) method. Firstly, the two representative PC modes are summarized and it is found that the insufficient lateral stiffness of columns leads to propagation of collapse in horizontal direction. And then, the PC resisting contribution of framed beams at different locations of the frames is studied by analyzing the mechanical response of the frames with initial damage occurring at different locations. Results indicate that all beams are able to provide PC resistance by beam action but only the continuous beams, with enough horizontal constraint at both ends, are able to provide PC resistance by catenary action. At last, the influence of slabs and seismic design on PC resistance of the two RC frames is discussed by analyzing the PC law of RC frames.

[Key words] concrete frame; progressive collapse mechanism; nonlinear dynamic alternate path analysis

## 0 引 言

连续倒塌是指由意外事件或灾害所造成的结构初始局部破坏所引起的整体结构不成比例的倒塌破坏<sup>[1]</sup>。从 1968 年 Ronan Point 公寓燃气爆炸事故算起,工程界发现建筑结构的连续倒塌问题已经有 42 年的历史。然而直到最近十年左右的时间,随着

Oklahoma 汽车炸弹事件和 911 事件的发生,连续倒塌问题才在世界范围内得到重视,并开展了大量相关研究<sup>[2]</sup>。在我国,随着我国经济发展和国际化水平的提高,燃气爆炸导致的建筑物倒塌事故时有发生,不断涌现的大型公共建筑物也面临着反恐的需求。故而越来越多的建筑被要求进行抗连续倒塌设计和验算,比如奥运水立方<sup>[3]</sup>、莫斯科中国贸易中心<sup>[4]</sup>、虹桥综合交通枢纽<sup>[5]</sup>等。因此,建筑结构的防连续倒塌问题成为当前我国工程界关注的热点之一。为满足设计的需要,我国的相关设计规范和规程也在进行改进,《混凝土结构设计规范(征求意见稿)》(GB50010-200x)和《高层建筑混凝土结构技术规程(送审稿)》(JGJ3-201X)均增加了抗连续倒塌

[收稿日期] 2010-10-28

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2006BAJ06B06 和 2006BAJ03A02-01),长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT00736)、“城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目、北京市重点实验室开放基金项目”(EESR2010-03)

[作者简介] 李 易(1981-),男,博士生

[联系方式] yili07@mails.tsinghua.edu.cn

设计的相关内容,专门的《防连续倒塌设计规程》也在制定当中。

由于防连续倒塌问题相比其他工程防灾问题而言其研究的时间相对较短,特别是由于防连续倒塌是结构的整体行为,而过去由于研究手段有限,难以开展整体结构的非线性倒塌分析,故而当前对结构连续倒塌及工程对策的机理研究不足,进而也影响了相应工程方法的合理性和可靠性。

故本文以一栋典型钢筋混凝土(RC)框架结构为例,采用非线性动力拆除构件法,详细分析了不同抗震设防等级、不同拆除部位、考虑/不考虑楼板贡献对结构连续倒塌行为的影响,研究了倒塌过程中构件内力的重分布和不同的倒塌破坏模式,其结果可供相关工程设计参考。

## 1 钢筋混凝土框架模型与分析方法

### 1.1 设计模型

钢筋混凝土框架结构模型如图 1 所示,其结构平面布置如图 2 所示。

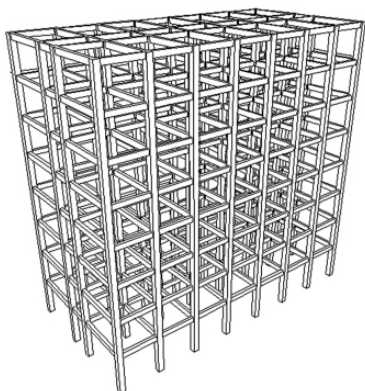


图 1 典型 RC 框架透视图

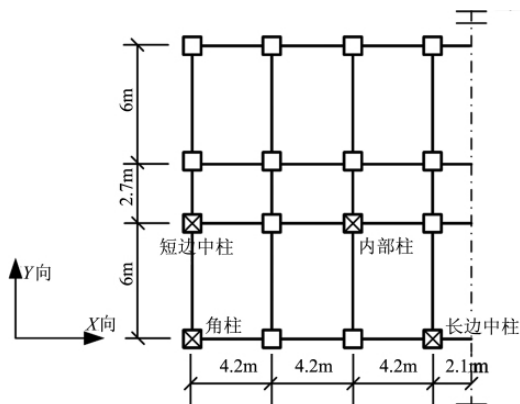


图 2 结构标准层平面图及所拆除柱的位置

构件尺寸、材料和设计参数等信息见文献[6]。本文为了比较抗震设计对抗连续倒塌性能的贡献程度,在文献[6]的基础上,抗震设防烈度分别按照 8 度、7 度和 6 度进行设计。高设防烈度设计下的框架梁柱钢筋用量增加,其中框架梁增加的钢筋主要集中在梁端,梁跨中钢筋增加较少。和 6 度抗震设计的框架相比,7 度和 8 度抗震设计的框架的梁柱配筋量分别约增加了 20% 和 100%。

### 1.2 数值分析模型

由于连续倒塌是结构的整体行为,试验难度很大,故国际上目前多采用非线性动力有限元方法进行研究。本文采用清华大学开发的基于 MSC. MARC 的钢筋混凝土纤维梁分析模型 THUFIBER 来完成连续倒塌过程的非线性动力计算。大量算例验证表明该平台可以满足连续倒塌分析的需要<sup>[6]</sup>。

为了考虑结构连续倒塌过程中构件的断裂破坏,本文在 THUFIBER 模型中加入了构件失效准则,利用 MSC. MARC 的“单元生死”技术删除达到失效准则的单元,释放失效单元的内力。本文所采用构件的失效准则如下:

(1) 对于柱构件,当钢筋的拉应变超过钢材的极限拉应变时认为该钢筋已经发生拉断失效,当钢筋的压应变超过混凝土压碎应变时认为受压钢筋失去支撑发生屈曲,如果一个柱截面上所有钢筋纤维都已经拉断或者压曲,则判定该柱构件发生破坏;

(2) 对于梁构件,在倒塌过程中先后经历小变形下的梁机制(端部受弯)和大变形下的悬链线机制(全截面受拉)两种工作状态<sup>[7]</sup>,梁机制时端部破坏的受压钢筋可以在悬链线阶段提供抗拉承载力,因此在纤维梁模型中仅当其截面上所有钢筋纤维都已经拉断时判断梁构件发生破坏。

### 1.3 楼板的模拟

整体现浇楼板对于提高结构的整体性有着重要影响。现行抗连续倒塌设计方法大多未考虑楼板的贡献。因此,本文对楼板的影响进行了专门讨论。

如果楼板和框架梁柱无可靠连接,如预制板楼板,则楼板对结构的抗连续倒塌性能没有贡献,结构的抗连续倒塌性能由梁柱骨架决定,计算模型中仅考虑框架梁柱构件,将楼板的荷载传递到相应的梁上。

而对于整体现浇楼板框架,楼板对结构的抗连续倒塌性能的影响不能忽略。Sasani 对 San Diego

酒店(六层现浇板混凝土框架)进行了倒塌试验研究和分析<sup>[8]</sup>,通过将框架梁用 T 形或 L 形截面的梁单元模拟以考虑有效翼缘宽度范围内的楼板对梁的增强,其结果和试验结果吻合较好。故本文也采用该方法,在用 THUFIBER 模型模拟框架梁时,建立 T 形或 L 形的截面并设置相应的板内钢筋,以考虑有效翼缘宽度范围内的楼板贡献,有效翼缘宽度按照我国 GB50010-2002《混凝土结构设计规范》<sup>[9]</sup>的要求选取。

#### 1.4 非线性动力拆除构件分析

参考 DoD2010<sup>[10]</sup>和 GSA2003<sup>[11]</sup>中拆除构件法的规定,本文采用以下流程:①拆除构件前,结构在竖向荷载作用下达到静力平衡状态;②迅速拆除目标构件(即在有限元模型中瞬间“杀死”相应单元);③进行非线性动力分析直至结构破坏或达到一个稳定状态。

本文为了对整体结构的不同部位的抗连续倒塌性能进行研究,对结构每层的长边中柱、短边中柱、角柱和内部柱均拆除进行分析,和现有规范规定的拆除构件相比有所增加<sup>[10,11]</sup>。在具体拆除过程中根据结构的布置情况进行了归并,对于不同部位的柱,代表性的选择一根柱进行拆除构件分析,如图 2 所示。

#### 1.5 连续倒塌判定准则

按照 GSA2003<sup>[11]</sup>和 DoD2005<sup>[12]</sup>的规定,预设初始破坏构件被拆除后,容许剩余结构发生后继破坏,从限制后继倒塌的范围(包括绝对面积和相对面积两个指标)来判断结构是否满足抗连续倒塌要求。这种判断准则从理论上是非常符合连续性倒塌的定义的,但是结构的连续倒塌过程中存在破坏、碰撞、堆载等一系列复杂力学行为,同时这一过程还伴随很大的随机性,故实际操作难度较大。因此,新版的 DoD2010 修改了 DoD2005 的规定,严格限制任何结构构件发生后继破坏<sup>[10]</sup>,即初始构件破坏后,剩余结构不能出现超过构件变形能力极限的塑性变形。在本文研究中,虽然 THUFIBER 程序可以完成整个结构倒塌全过程的模拟(图 3、图 4),但仍采用 DoD2010 建议的原则,当结构局部失去稳定性且最大竖向位移达到跨度 1/3 时,认为结构将会发生连续倒塌。

## 2 典型连续倒塌模式

非线性动力拆除构件分析结果表明,多层混凝土框架主要存在两种典型连续倒塌模式:①竖向连续倒塌;②竖向和水平向混合连续倒塌。图 3 和图 4 分别给出了两种连续倒塌模式的典型算例的破坏过程(灰色表示该截面处钢筋已经达到屈服,以标识结构损伤程度)。

第一种倒塌模式为竖向连续倒塌,如图 3 所示。在第 2 层角部柱发生初始破坏后,只有其上部的局部结构发生连续倒塌。原因是失稳结构区域和其他结构区域的拉结较弱,破坏发生在拉结构件上(如图 3c),破坏区域与其他结构区域失去连接而发生倒塌。

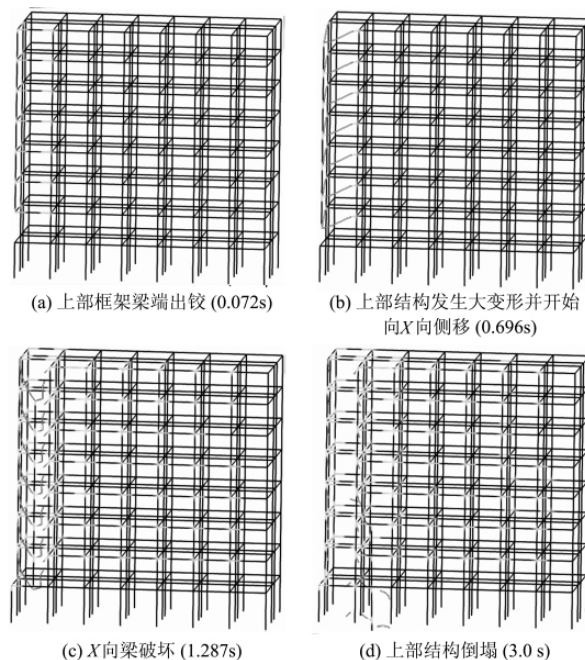


图 3 典型连续倒塌模式 A: 竖向连续倒塌  
(6 度抗震设防烈度/非整体现浇楼板框架/拆除第 2 层角柱)

第二种倒塌模式为竖向和水平向混合连续倒塌,如图 4 所示。在第 2 层内部柱发生初始破坏后,除了其上部失去支撑的局部结构发生倒塌以外,其左侧相邻区域的结构也发生了倒塌。从连续倒塌过程的模拟看,左侧相邻区域的结构在破坏区域的水平拉力作用下发生了倾覆破坏(如图 4c)。

连续倒塌在水平向的传播和初始破坏周边区域的抗侧刚度有关。由于初始倒塌区域发生较大竖向变形,该区域内的结构构件的受力模式发生转变,对

相邻区域产生较大的水平作用力。在第一种倒塌模式中,和角部初始破坏相邻的结构区域的跨数较多( $X$ 向六跨、 $Y$ 向二跨,如图 2 所示),其抗侧刚度较大,因此未形成水平向的连续倒塌。而在第二种倒塌模式中,和内部初始破坏相邻的左侧区域的跨数较少( $X$ 向一跨、 $Y$ 向一跨,如图 2 所示),其抗侧刚度较小,因此结构左侧形成了水平向的连续倒塌,而右侧抗侧刚度大,未形成水平向的连续倒塌。

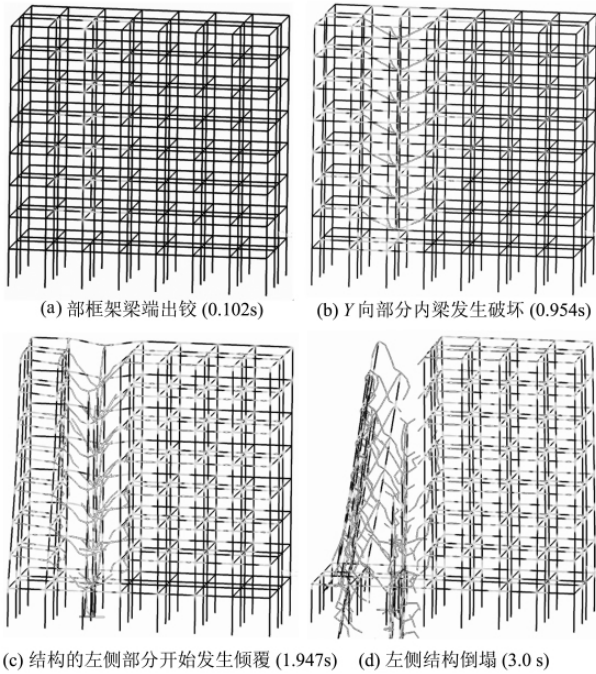


图 4 典型连续倒塌模式 B:竖向和水平向混合连续倒塌 (6 度抗震设防烈度/非整体现浇楼板框架/拆除第 2 层内廊柱)

现有的设计方法中,无论是拆除构件设计法还是拉结强度设计法,主要是针对框架梁进行抗连续倒塌设计,缺少对框架柱抗侧刚度的检验。本文的分析结果表明,如果初始破坏周边的框架柱抗侧刚度不足,即使经过上述两个方法设计后,结构仍然有可能发生连续倒塌。

### 3 框架梁抗倒塌机制分析

两种典型破坏模式下,结构的连续倒塌都始于结构失稳区域的竖向大变形破坏,因此框架梁在整体结构的抗连续倒塌机制中起到关键作用。限于篇幅,本文仅提取了该框架结构第 8 层,在三个典型拆除工况下(工况 1:第 8 层短边中柱拆除;工况 2:第 8 层长边中柱的拆除;工况 3:第 8 层角柱的拆除),

相应结点的位移和梁端内力进行分析。在讨论中,按  $x$  度抗震设防烈度设计相应的简称为“ $x$  度抗震设计”。

#### 3.1 第 8 层短边中柱拆除工况分析

对于该框架结构第 8 层短边中柱的拆除工况,原本由柱支撑的  $X$  向框架梁成为悬臂梁,而  $Y$  向框架梁由两跨变成了一跨,如图 5 所示。

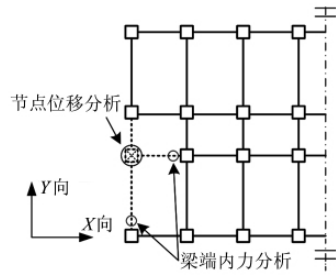


图 5 框架结构分析点位置

节点位移和框架梁的内力随时间的变化见图 6~8,所有的六个算例在拆除第 8 层短边中柱后均未发生连续倒塌。节点位移的比较见图 6,节点的位移量和框架梁开裂后的刚度有关,框架梁配筋越高,开裂后的刚度就越高,节点位移就越小。和 6 度抗震设计的框架比,7 度抗震设计的框架其顶层梁的配筋增加较少,而 8 度抗震设计的框架增加相对较多,因此 7 度抗震设计的框架的节点位移比 6 度的框架略小,而 8 度抗震设计的框架的节点位移减幅比较明显。对于整体现浇板框架,由于考虑了有效翼缘宽度范围内的楼板对框架梁的增强,构件刚度进一步增强,结构的变形也相应的减少。

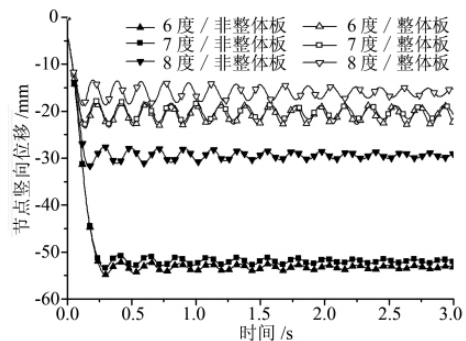


图 6 第 8 层短边中柱拆除工况,框架节点位移比较

比较  $X$  向和  $Y$  向的框架梁端轴力(图 7)可以发现,对于非整体现浇楼板框架, $X$  向的悬臂梁的两端缺乏足够的水平约束,因此轴力基本为零,而  $Y$  向的连续梁两端的支座可以提供一定的水平约束,因

此梁内产生了较大的轴压力。对于整体现浇板框架,由于Y向框架梁的刚度和承载力被翼缘增强,该梁对X向的悬臂梁能够形成微弱的水平约束,因此产生了少量轴压力。同时由于结点位移的减小,整体现浇板框架的Y向轴压力也相应的减少了。

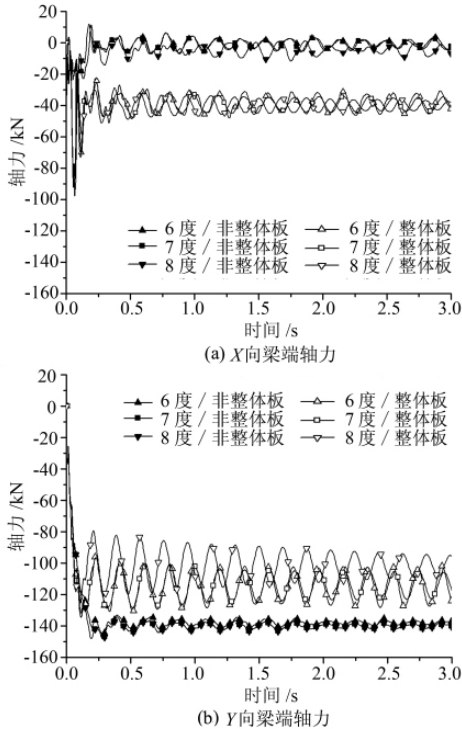


图 7 第 8 层短边中柱拆除工况 X、Y 向框架梁端轴力

比较 X 向和 Y 向的框架梁端弯矩 (图 8a 和图 8b) 可以发现,由于 X 向跨度较小,相同结点位移下,非整体现浇板框架 X 向梁端的剪力和弯矩小于 Y 向梁端;而整体现浇板框架中,由于 X 向梁只有一侧有楼板,而 Y 向梁两侧均有楼板,因此后者的刚度提高较多,两个方向上梁的线刚度比发生变化,使得两个梁的端部弯矩变得接近。

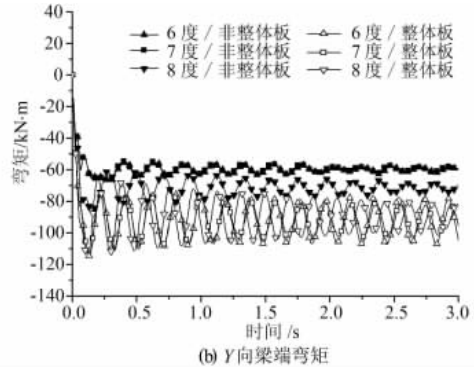
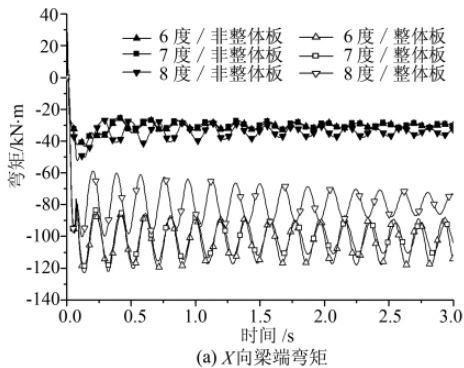


图 8 第 8 层短边中柱拆除工况 X、Y 向框架梁端弯矩

### 3.2 第 8 层长边中柱拆除工况分析

对于该框架结构第 8 层长边中柱的拆除工况中,非整体现浇板框架均发生倒塌,而整体现浇板框架均未发生倒塌。发生倒塌的非整体现浇板框架中的框架梁经历了大变形状态,结构边缘的 X 向框架梁受力发生了变化,如图 9 所示。初始时刻 (0 ~ 0.5s 左右) 边缘框架梁以端部的弯矩提供抗倒塌承载力;当变形较大时,端部抗弯承载力丧失,构件依靠钢筋提供的轴拉力抵抗外荷载 (0.5 ~ 1.0s 左右) 这种机制被称之为悬链线机制。框架梁在悬链线机制下产生较大的水平分力,因此需要两端支座提供足够的水平约束。

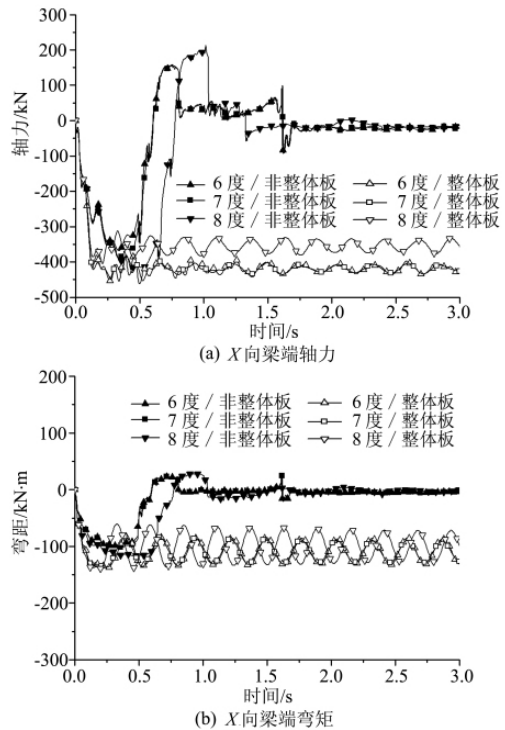


图 9 第 8 层长边中柱拆除工况 X 向框架梁端内力

长边中柱的拆除工况中,只有结构边缘的  $X$  向框架梁能够提供有效的支座约束,使之可以发挥悬链线机制的承载力,而  $Y$  向框架梁只有一端能够提供有效的支座约束,所以不能够以悬链线机制提供抗连续倒塌承载力贡献。图 10 给出了  $Y$  向框架梁的内力,对于发生倒塌的非整体现浇楼板框架,在 0.5s(6 度和 7 度抗震设计框架)和 0.75s(8 度抗震设计框架)以前,尽管框架梁发生了较大变形,但是  $Y$  向框架梁轴力仍然较小。此后,框架梁已经破坏并发生类似图 3c 的大变形,此时失稳框架被“吊”在剩余结构上,计算结果中轴力变大,这和悬链线机制中拉力不同。

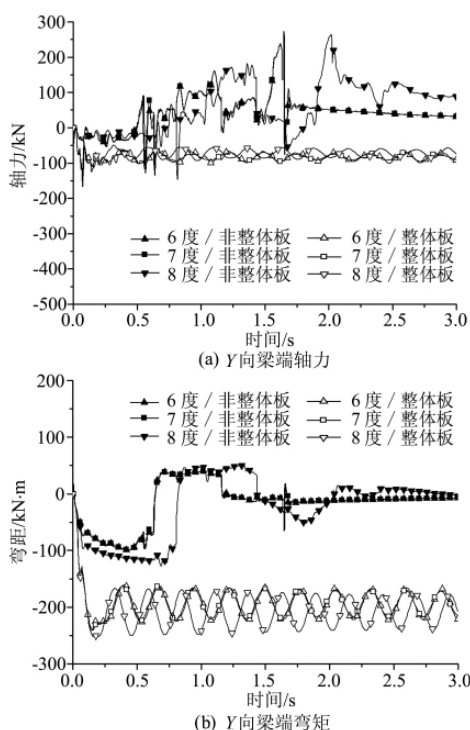


图 10 第 8 层长边中柱拆除工况,  $Y$  向框架梁端内力

### 3.3 第 8 层角柱拆除工况分析

对于该框架结构第 8 层角柱的拆除工况中,非整体现浇楼板框架和整体现浇楼板框架均发生了倒塌,图 11 列出了  $X$  向梁端内力,  $Y$  向梁端内力与之类似,故未列出。整体现浇板的计算中为节省时间,当变形达到倒塌判据时计算被中止。在计算中,除 8 度抗震设计的整体现浇板框架,其他五个算例在 0.5~0.75s 以后,结点位移均超过 1200mm,并产生较大轴力,原因和长边中柱拆除中的讨论相同,为不可靠的悬挂轴力。因此,角部的框架梁缺乏足够的

水平位移约束,在大变形时不能提供可靠的轴向拉力,只能在小变形时通过梁端弯矩提供抗倒塌承载力。

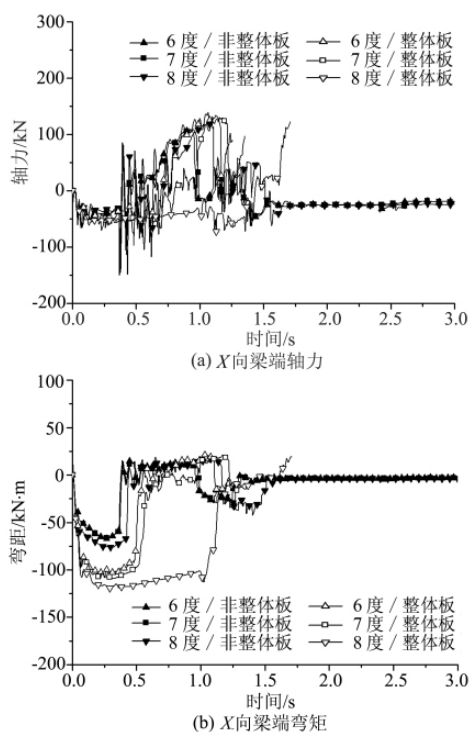


图 11 第 8 层角柱拆除工况,  $X$  向框架梁端内力

第 8 层内部柱的拆除工况中,非整体现浇楼板框架和整体现浇楼板框架均未发生倒塌,两个方向上梁的内力和图 6~8 中  $Y$  向梁的结果类似,限于篇幅未列出。

### 3.4 框架结构抗连续倒塌的一般性规律

通过上述分析可以获得以下框架结构抗连续倒塌的一般性规律:

- (1) 边缘柱破坏时,在小变形范围(梁两端位移小于跨度的十分之一)内,两个方向的框架梁都可以通过其抗弯承载力提供抗连续倒塌能力(可以称之为“梁机制”),在大变形范围(梁两端位移大于跨度的十分之一)内,只有边缘的贯通梁能以轴拉力提供抗连续倒塌能力(可以称之为“悬链线机制”),而垂直于边缘的梁在此阶段不能提供抗连续倒塌贡献;
- (2) 角部柱破坏时,框架梁仅能在小变形状态下以梁机制提供抗连续倒塌承载力;
- (3) 内部柱破坏时,双向贯通的框架梁均可通过梁机制或悬链线机制提供抗连续倒塌承载力。

现有国外规范的拉结设计法中,结构所有部位均以悬链线机制为目标进行设计,将可能导致抗连续倒塌承载力的不足,文献[7]对此结论已有验证。

#### 4 框架结构连续倒塌规律分析

对于非整体现浇楼板和整体现浇板钢筋混凝土框架结构,所有拆除工况下的非线性动力分析结果,如表 1 和表 2 所示。

表 1 非整体现浇楼板框架非线性动力拆除构件分析结果

楼层	设防烈度	角柱	长边中柱	短边中柱	内柱
1~2	8 度	未倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	倒	未倒	倒
	6 度	倒	倒	倒	倒
3~4	8 度	倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	倒	倒	倒
	6 度	倒	倒	倒	倒
5~7	8 度	倒	倒	未倒	未倒
	7 度	倒	倒	倒	倒
	6 度	倒	倒	倒	倒
8	8 度	倒	倒	未倒	未倒
	7 度	倒	倒	未倒	未倒
	6 度	倒	倒	未倒	未倒

表 2 整体现浇板框架非线性动力拆除构件分析结果

楼层	设防烈度	角柱	长边中柱	短边中柱	内柱
1~2	8 度	未倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	未倒	未倒	未倒
	6 度	倒	倒	未倒	未倒
3~5	8 度	未倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	倒	未倒	未倒
	6 度	倒	倒	未倒	未倒
6	8 度	倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	倒	未倒	未倒
	6 度	倒	倒	未倒	未倒
7	8 度	倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	未倒	未倒	未倒
	6 度	倒	倒	未倒	未倒
8	8 度	倒	未倒	未倒	未倒
	7 度	倒	未倒	未倒	未倒
	6 度	倒	未倒	未倒	未倒

##### 4.1 不同平面位置的差异

对于非整体现浇楼板框架,大多数拆除工况下结构都发生了连续倒塌。四个典型部位按发生连续倒塌工况所占比例来排序为:角柱 > 长边中柱 > 内柱 > 短边中柱。结合第 3 节的讨论可知,角柱的传力路径少且两端不能提供可靠的水平位移约束,不能产生轴压力以提高梁的抗弯承载力,因此抗连续

能力较差。在长边中柱、短边中柱和内柱的拆除工况中,短边中柱承担的荷载最小,失效后产生的不平衡荷载也最小,因此发生倒塌的工况最少;内柱承担的荷载最大,但是由于其两个方向的框架梁均为贯通梁,可以提供较大的承载力,发生倒塌的工况少于长边中柱。

##### 4.2 考虑楼板作用后的差异

整体现浇板框架和非整体现浇板框架相比,抗连续倒塌能力有显著的提高。各层边短边中柱和内柱拆除工况下结构均未发生连续倒塌。但是整体现浇板框架的角部和长边部位的抗连续倒塌能力虽然和非整体现浇板框架相比有所增强,但是仍存在不足。可见框架结构体系中的传力路径和框架梁跨度对抗连续倒塌承载力有显著的影响。

##### 4.3 不同楼层位置的差异

从发生连续倒塌工况的楼层来看,8 度抗震设计的框架中,拆除工况所在楼层越低越不容易发生连续倒塌,这是由于下部楼层框架梁的抗震配筋显著增大所致。而 6 度抗震设计的框架中,下部楼层的框架梁配筋和上部相比基本没有变化,因此不同楼层的相同位置处的拆除构件分析结果相同。7 度抗震设计中底部框架梁的钢筋稍有增加,但对结构的连续倒塌分析结果影响不大,仅非整体现浇板框架在 1~2 层短边中柱拆除工况中发生变化。

此外,模拟分析中还发现,框架在部分顶层的拆除工况下未发生倒塌,而在下部结构中发生了连续倒塌,比如非整体现浇板框架短边中柱和整体现浇板框架长边中柱的拆除工况。这是由于多层框架梁共同作用时,每层梁之间内力发展不均匀所导致的,文献[7]在计算多层框架梁抗连续倒塌承载力时,对承载力进行折减来考虑这一因素的影响,取得了和试验一致的结果。

## 5 结 论

结构连续倒塌规律和抗连续倒塌机理的研究是建立抗连续倒塌设计方法的基础。本文应用非线性动力拆除构件法对我国典型框架的连续倒塌规律和抗连续倒塌机理进行了研究,主要内容和结论如下:

(1) 框架柱抗侧刚度的不足可能会引起结构的水平向连续倒塌,而现有设计方法缺乏对框架柱抗侧刚度的检验。

(下转第 22 页)

了初步的实验探讨。实验证明,火源位置对壁面痕迹的形成具有直接的关系,对室内火灾的发展具有重要影响。相同试验条件下,墙角火引起的火灾燃烧剧烈,热释放速率、墙面温度及辐射热等参数较中心火相比,测量结果高,曲线波动大。墙角火的热释放速率峰值为 2.5MW,中心火达到 600kW,为墙角火的 1/4。从热释放速率的曲线变化来看,墙角火灾在发展过程中没有出现相对稳定的阶段,这与墙角火易引燃其他物品是密切相关的。建筑房间内的同一受热点常常出现热辐射交叉重叠的现象,一定程度增加了热辐射通量,温度随之升高,随着房间物品的不断着火点燃,很容易导致热释放率的突然增大;

(2) 建筑火灾中火灾的发展是与火焰的蔓延方式直接相关的,由试验可以看出,不同起火位置的火焰蔓延方式有很大差别,墙角火源因紧贴壁面等其他物体,蔓延较快,火灾发展也较快,容易在近火源墙面上形成较为明显的痕迹,较其他位置在颜色上也有差别,依此确定起火点的位置是可行的;

(3) 墙面痕迹的表现形态与室内热烟气的分层是密切相关的,火焰产生的热烟气向上运动,到达顶面后下沉,与从房间门窗等进入的冷气流会在房间

的垂直面上形成明显的分层,热烟气主要集中在上部,易对房间内高处的物品形成热损害,直至引燃。热烟气造成的烟熏痕迹也就相对集中在墙面的上部。实际火灾中,着火房间内因为室内物品的点燃,会在多处形成火源,类似于墙角火和中心火,进而加大火势,会在墙壁上形成痕迹的重叠,增加了第一着火点确定的复杂性。因此基于壁面痕迹的起火原因鉴定还有赖于实际经验的进一步积累和实际火场模拟实验的进一步完善。

#### [参考文献]

- [1] Mikhailov E. F, Vlasenko S. S, Ryshkevitch T I and Kiselev A A et. al. Soot structure investigation: adsorb-tional properties [J]. Journal of Aerosol Science, 1996, 27:709 ~ 710.
- [2] NFPA 921, Guide for Fire and Explosion Investigations [S]. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association. 2004.
- [3] Death Investigation: A Guide for the Scene Investigator [R]. Research Report, Washington, D. C.: U. S. Department of Justice, National Institute of Justice, December 1997, NCJ 167568.
- [4] 李一涵,邱榕,蒋勇.数值模拟方法在壁面烧损痕迹的应用[J].火灾科学,2006,15(2):102-110.
- [5] Cheng Qian. Turbulent Flame Spread on Vertical Corner Walls [J]. Fire Safety Journal, 1995(1):35-40.
- (上接第 18 页)
- (2) 现有拉结强度法对所有位置采用悬链线机制进行设计验算,但是实际上,结构不同部位处的抗连续倒塌作用机制不同,悬链线机制并不能在结构的所有部位处都能有效发挥。
- (3) 按 8 度抗震设防烈度设计的框架的抗连续倒塌能力被显著提高,而 7 度抗震设防烈度的设计对抗连续倒塌能力增强并不明显。整体现浇楼板显著提高了混凝土框架的抗连续倒塌性能,当框架结构按 8 度抗震设防烈度进行设计时,两者效果的叠加将使结构的抗连续倒塌性能基本满足现行规范的要求。
- [参考文献]
- [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] Crowder B, Stevens D J, Marchand K A. Design of buildings to resist progressive collapse [C]. Virginia Society of Professional Engineers Tidewater Chapter & DoD Security Engineering Working Group, Short course proceedings of Security Engineering Workshop, 2004.
- [3] 陆新征,卢啸,李易.结构连续倒塌及其工程对策[J].防护工程,2009,31(4):51~57.
- [4] 朱炳寅,胡北,胡纯扬.莫斯科中国贸易中心工程防止结构连续倒塌设计[J].建筑结构,2007,37(12):6~9.
- [5] 周健,陈素文,苏骏,等.虹桥综合交通枢纽结构连续倒塌分析研究[J].建筑结构学报,2010,31(5):174~180.
- [6] 梁益,陆新征,李易,叶列平.国外 RC 框架抗连续性倒塌设计方法的检验与分析[J].建筑结构,2010,40(2):8~12.
- [7] 易伟建,何庆峰,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.
- [8] Sasani M. Response of a reinforced concrete in filled-frame structure to removal of two adjacent columns [J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2478 - 2491.
- [9] GB50010-2002 混凝土结构设计规范[S].
- [10] DoD2010 (UFC4-023-03) Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S]. 2010.
- [11] GSA2003 Progressive Collapse Analysis and design guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Project [S]. 2003.
- [12] DoD2005 (UFC4-023-03) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. 2005.