

文章编号:1673-2049(2018)06-0029-12

# RC 框架结构连续倒塌影响因素与破坏机制的研究现状

黄 华,黄 敏,郭洁娜,郭梦雪

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:** 鉴于近年来国内外连续倒塌事件时有发生,并带来大量的人员伤亡和巨大的经济损失,针对当前影响结构倒塌性能的主要因素及其倒塌破坏机制研究进展进行了综述。结果表明:楼板对结构抗连续倒塌的作用不可忽略;柱失效位置和柱距对结构抗连续倒塌性能具有重要影响;与不考虑节点影响时相比,考虑节点影响时结构的抗连续倒塌承载力降低;填充墙和抗震设计对结构抗连续倒塌能力有益;框架梁上先后作用梁机制(压拱机制)和悬链线机制,板上先后作用压膜机制和拉膜机制,但不同构件作用机制之间的耦合作用和度量指标等研究不足;今后的研究中要加强试验测试工作和倒塌影响的定量化研究,并体现到设计方法中,同时要加强偶然荷载的碰撞冲击对结构倒塌性能的影响研究。

**关键词:** 框架结构;连续倒塌;影响因素;破坏机制;设计方法

**中图分类号:** TU375

**文献标志码:** A

## Research Status on Influencing Factors and Failure Mechanism for RC Frame Structural Progressive Collapse

HUANG Hua, HUANG Min, GUO Jie-na, GUO Meng-xue

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** In recent years, progressive collapse often occurred at home and abroad, and accompanied by a large number of casualties and huge economic losses. The research progress of main factors and collapse mechanism that affected the progressive collapse were reviewed. The results show that the contribution of floor on progressive collapse can't be neglected, and the column failure position and the column spacing have important influence on structural anti-progressive collapse. Compared with without considering the influence of joint, when considering the influence of joint, the progressive collapse resistance of structure will be reduced. The infilled wall and seismic design are beneficial to progressive collapse. In turn, the beam mechanism (the compressive arch mechanism) and the catenary mechanism act on the frame beam, and the compressive membrane mechanism and the tensile membrane mechanism act on the floor. However, the research of the coupling action and measurement index of the mechanism of different components are insufficient. In the next step, the experimental test and the quantitative research about progressive collapse should be strengthened, and the research results should be

**收稿日期:** 2018-04-28

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51778060);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130205130001);

中央高校基本科研业务费专项资金团队项目(310828173401,310828173702,310828171012)

中央高校基本科研业务费专项资金高新技术项目(300102288203)

**作者简介:** 黄 华(1979-),男,江苏常州人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:huanghua23247@163.com。

applied to the collapse design. Meanwhile, it also should be enhanced to study the impact of accidental load on the progressive collapse.

**Key words:** frame structure; progressive collapse; influencing factor; failure mechanism; design method

## 0 引言

结构连续性倒塌是指偶然荷载(如爆炸、冲击、火灾、地震等)作用下,由最初的局部破坏引起构件失效不断扩展而导致整个结构倒塌或与初始局部破坏不成比例地大范围倒塌<sup>[1]</sup>,其破坏特点表现为不确定性、非线性、滞后性、连续性和不成比例性<sup>[2]</sup>。迄今为止,国内外对连续倒塌问题的研究经历了3个高峰。自1968年英国伦敦 Roman Point 公寓因煤气爆炸发生局部倒塌后,工程界开始了连续倒塌问题的研究。1995年美国俄克拉荷马州 Alfred P. Murrah 联邦大楼因恐怖分子汽车炸弹袭击发生倒塌破坏事故后,建筑结构的连续倒塌问题再次引起国内外学者的广泛重视。2001年纽约世贸中心双子大楼遭恐怖袭击倒塌,造成了2 996人遇难,并对全球造成1万亿美元损失,此次事件也将连续倒塌问题的研究推向高潮<sup>[3]</sup>。2001年石家庄特大连环爆炸案、2003年衡阳大厦特大火灾倒塌事件,以及近年来广州、深圳、温州、沈阳等城市多起在役房屋坍塌事件同样也说明中国现役建筑在抗连续倒塌能力方面存在不足,且连续倒塌事故一旦发生,将带来大量的人员伤亡和巨大的经济损失,因而如何避免连续倒塌已成为21世纪以来土木工程学科研究的最大热点之一。

Starossek<sup>[4]</sup>将连续倒塌划分为6种:薄饼型倒塌、拉链型倒塌、多米诺型倒塌、截面型倒塌、失稳型倒塌和混合型倒塌。GSA 2003<sup>[5]</sup>,DOD 2010<sup>[6]</sup>,EN 1991-1-7:2006<sup>[7]</sup>等规范给出的抗连续倒塌设计方法包括概念设计法、拆除构件法、拉结强度法和关键构件法等。采用拆除构件法时,可以采用线性静力、线性动力、非线性静力和非线性动力分析方法对剩余结构进行计算。结构连续倒塌的影响因素众多,倒塌机制相对复杂,目前研究者基于各自的研究对象进行了较为深入全面的研究,但结论并不统一。现有关于结构抗连续倒塌能力的研究大都以框架结构为例,且平面框架、不带板框架居多,与实际结构存在显著差异。本文在现有研究成果的基础上,综述了楼板、柱失效位置和柱距、节点、填充墙以及抗震设计等因素对结构抗连续倒塌能力影响的研究,

并论述了连续倒塌的破坏机制,对现有研究中存在的问题进行了总结。

## 1 连续倒塌影响因素分析

### 1.1 楼板对框架结构连续倒塌的影响

现有研究认为:结构连续倒塌分析中不考虑楼板对抗连续倒塌作用的设计是偏于保守的<sup>[8-11]</sup>。对于楼板提高结构抗连续倒塌能力的作用,由于不同学者所用的研究方法、模型、柱失效位置等因素的不同,得出的结果也不同,具体见表1。由表1可见,通过对有无楼板结构进行数值分析和试验研究,发现楼板不仅能提高结构的抗连续倒塌能力,且幅值都在24%以上,甚至达到200%。因此在抗连续倒塌设计时不可忽略楼板的影响。王惠宾等<sup>[12]</sup>将板等效为有效翼缘,在梁的受力钢筋中计入翼缘宽度范围内的楼板钢筋,以考虑楼板的影响,分析模型见图1,同时假定:①梁各截面为双直线型的弯矩与转角关系,如图2所示,其中, $M_p$ 为塑性铰弯矩, $\theta_y$ 为刚形成塑性铰时的转角, $\theta_0$ 为塑性铰极限转角;②全部梁端弯矩同时达到塑性铰弯矩,并同时失去承载能力。考虑板效应时,梁机制的抗力极值 $R_{dmax}$ 为

$$R_{dmax} = \frac{M_{T1P} + M_{T2P}}{L} + 2 \frac{M_{L1P} + M_{L2P}}{L} \quad (1)$$

式中: $M_{T1P}$ 为梁3BC两端形成塑性铰时的弯矩; $M_{L1P}$ 为梁C23(C34)两端形成塑性铰时的弯矩; $L$ 为梁计算跨度。

悬链线机制的抗力 $R_c$ 为

$$R_c = 2T_L \sin(\theta) \quad (2)$$

式中: $T_L$ 为梁C23(C34)悬链线拉力; $\theta$ 为梁的梁端转角。

同样计入翼缘宽度范围内的楼板贯通钢筋,以考虑楼板的共同工作效应,复合机制的抗力 $R_{bc}$ 为

$$R_{bc} = R_{dmax} + R_c \quad (3)$$

楼板作为框架结构不可或缺的一部分,它不仅可以增加结构的冗余度,使框架柱失效后的不平衡内力通过板的拉结重新分布,还可以增加结构的刚度和整体性,从而提高结构的抗连续倒塌能力。研究发现:增加楼板配筋率可以提高结构的抗连续倒塌能力<sup>[19-21]</sup>,而增加板厚对结构抗连续倒塌性能的

表 1 板对结构抗连续倒塌能力的贡献

Tab. 1 Contribution of Slab to Anti-progressive Collapse of Structures

文献来源	研究方法	模型	柱失效位置	结果
文献[13]	ABAQUS 有限元分析	有、无楼板的单层框架	角柱	结构最大承载力提高 57%
文献[14]	ABAQUS 有限元分析	有、无楼板的 2×1 跨框架	底层长边内柱	结构最大承载力提高 24%
文献[15]	SAP2000 有限元分析	有、无楼板的 6 层 RC 框架	底层内柱	结构最大承载力提高 29.1%
文献[16]	SAP2000 有限元分析	有、无楼板的 3,6,9 层 RC 框架	角柱和边柱	结构最大承载力提高 45%~200%
文献[17]	试验研究	有、无楼板的单层框架	角柱	结构最大承载力提高 63%
文献[18]	试验研究	有、无楼板的单层框架	角柱和边柱	结构最大承载力提高 40%~55%

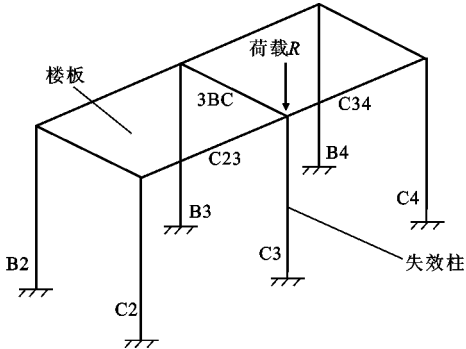


图 1 分析模型

Fig. 1 Analysis Model

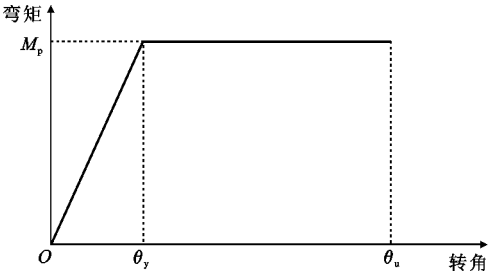


图 2 弯矩-转角的关系

Fig. 2 Relation Between Moment and Rotation Angle

影响不同学者得出不同的结论。齐宏拓等<sup>[19]</sup>通过对钢筋混凝土板进行连续倒塌的碰撞仿真分析发现,增加板厚能提高结构抗连续破坏能力,且增大板厚比提高配筋率对增大抗连续破坏能力的作用更明显。Lu 等<sup>[20]</sup>通过试验研究发现,板的存在会使框架的抗倒塌能力提高 98%~146%,且框架抗倒塌能力会随板厚及板配筋的增加而提高。何沙沙<sup>[21]</sup>利用有限元软件对柱失效后不同板厚和配筋率下失效点竖向位移峰值以及关键构件内力进行对比分析,发现在配筋率不变时,增加板厚,失效点的竖向位移基本不变甚至增加,同时柱的轴力也会增加,因此认为仅增加楼板厚度,框架结构的抗连续倒塌能力并不会有所提高。另有研究发现,板厚对结构抗连续倒塌能力的影响与配筋率有关,当配筋率较大时,增加板厚对结构的抗连续倒塌能力有益,然而当

配筋率小于一定值后,增加板厚却提高了结构发生连续倒塌的可能性<sup>[22]</sup>。

根据以上研究分析可知,板配筋率的增加对结构抗连续倒塌能力有益,但是板支座的拉结能力和混凝土的抗拉强度有限,盲目增加配筋可能导致板发生超筋破坏。寻找一个合适的抗连续倒塌配筋率是今后的研究方向。板厚的增加在提高结构刚度的同时也会增加结构的自重,刚度对结构是有利的,而自重会增加结构所受荷载,增大向下运动的惯性和冲击力,对结构是不利的。因此增加板厚对结构有利和不利哪个占主导,在什么范围内占主导,还有待进一步研究,并且倒塌设计时如何有效计算楼板提供的抗力,当前的研究显得并不充分。

1.2 柱失效位置和柱距对结构抗连续倒塌能力的影响

建筑物在遭受偶然荷载作用时,不同构件失效对剩余结构倒塌能力的影响不同,因此有必要研究不同部位构件失效对结构抗连续倒塌能力的影响。根据 GSA 和 DOD 准则,框架结构中角柱、边柱和内柱为关键构件。已有柱失效位置对结构连续倒塌性能影响的研究结果大致可以分为 2 类:一是通过对相同层、相同跨度的框架在拆除角柱、边柱和内柱后的连续倒塌性能进行研究,发现内柱发生破坏时,抗连续倒塌能力最弱,其次是边柱,拆除角柱对结构的影响最小,即剩余结构的抗连续倒塌能力从小到大依次为内柱、边柱、角柱<sup>[23-24]</sup>;二是通过对相同层、不同跨度的框架在拆除角柱、边柱和内柱后的连续倒塌性能进行研究。卢磊<sup>[25]</sup>以单榀柱距依次为 5.4,3,5.4 m 的 4 层钢筋混凝土框架结构为研究对象,采用有限元软件 SAP2000 对结构在角柱、长边中柱、短边中柱和内柱失效后的抗连续倒塌能力进行对比分析,发现剩余结构抗连续倒塌能力从小到大依次为长边中柱、角柱、内柱、短边中柱。杨雪蕾<sup>[26]</sup>以单榀柱距依次为 6,2.5,6 m 的钢筋混凝土框架结构为研究背景,采用 SAP2000 对不同部位柱

失效后结构的抗连续倒塌能力进行非线性静力分析,得出拆除柱后,剩余结构的连续倒塌能力从小到大依次为长边中柱、内柱、角柱、短边中柱。何沙沙<sup>[21]</sup>采用 ABAQUS 有限元软件,以单榀柱距为 6, 2.7, 6 m 的 3 层框架结构为研究对象,对比分析了不同部位的柱失效后剩余结构抗连续倒塌能力。发现剩余结构抗连续倒塌能力依次为角柱、边柱、内柱。由以上分析可知,不同跨度时,拆除不同部位的柱,得到剩余结构抗连续倒塌能力的结论不同。因此跨度是影响结构抗连续倒塌能力的一个非常重要的因素。

拆除关键构件后,关键构件周边的梁、板跨度变大,且原来由柱承担的竖向荷载通过梁和板进行内力重分布,使得作用在结构上的竖向荷载增大,结构抗连续倒塌能力降低,且随着跨度的加大,承载力降低很快<sup>[27]</sup>。因此不考虑跨度对结构的影响,分析结构在拆除关键构件后的连续倒塌能力会得出不同的结论,且以上研究以有限元数值分析为主,绝大部分未考虑楼板的影响。为使研究结果与工程实际相符,建议在试验测试基础上开展不同部位柱失效后的抗连续倒塌性能研究,同时考虑板存在时的影响研究。

### 1.3 节点对结构抗连续倒塌的影响

节点作为梁板柱的交接点,是整个结构的关键受力区域,节点在结构抗连续倒塌中的作用目前已引起了国内外学者的关注。杜修力等<sup>[28-31]</sup>研究了钢框架结构不同梁柱节点形式对其抗连续倒塌能力的影响,提出节点加固的方法,以改善结构抗连续倒塌性能。Main 等<sup>[32-35]</sup>通过研究发现钢框架中增强节点承载力能充分提高结构整体抗连续倒塌性能。Yang 等<sup>[36]</sup>通过试验研究发现,在钢梁柱的连接中,采用钢节点的连接方式可以提高框架的抗倒塌能力。当前研究主要集中于钢框架中节点对抗连续倒塌性能的影响,而对混凝土框架结构中节点对抗连续倒塌性能影响的研究甚少,且在 RC 结构的连续倒塌分析中,大多数研究者将节点处理成刚节点,忽略其在连续倒塌中的作用。司应石<sup>[37]</sup>对比分析了不同节点刚度对结构抗连续倒塌能力的影响,认为节点刚度大的模型抗连续倒塌能力也大,且在静力分析中,节点刚度大的结构抗连续倒塌能力强,而在动力分析中,节点刚度对结构抗连续倒塌能力的影响不明显。Kang 等<sup>[38]</sup>通过对四榀预制混凝土框架进行试验研究,发现梁柱节点处采用不同的钢筋连接方式会对框架的抗倒塌能力产生一定的影响;节

点处钢筋采用贯通搭接的连接方式会提供更高的抗连续倒塌能力。李爽等<sup>[39]</sup>对比分析了考虑节点和不考虑节点对 RC 框架连续倒塌能力的影响,发现考虑节点影响比不考虑节点影响时结构的抗连续倒塌承载力下降 23%。实际工程中不考虑节点影响的抗连续倒塌设计会高估结构抗连续倒塌能力,从而使结构偏于不安全。如何在工程设计中考虑节点的影响还需要进一步的研究。

### 1.4 填充墙对结构抗连续倒塌的影响

填充墙虽为非结构构件,但一定程度上仍会与框架共同作用而抵抗部分荷载,因此在连续倒塌分析中有必要考虑填充墙的影响。李寰等<sup>[40-41]</sup>利用有限元软件对纯框架结构和填充墙框架结构进行对比分析,认为填充墙的存在提高结构的抗连续倒塌能力。Kaushik 等<sup>[42]</sup>通过研究发现,填充墙可以提高结构的初始刚度,替代结构承受大部分的侧向地震荷载。Qian 等<sup>[43]</sup>通过试验研究了填充墙对框架抗倒塌能力的影响,结果表明,填充墙不仅可以提高框架的承载力和刚度,改变框架的破坏模式,还可以提高节点的抗剪能力和梁纵筋的抗拉能力。Sasani 等<sup>[44-46]</sup>以一带有填充墙的 6 层 RC 框架结构为研究对象,对其关键构件进行爆破拆除试验,通过对试验数据的详细分析发现,填充墙可以限制梁的变形,从而提高其连续倒塌能力。这是因为填充墙在受到梁传来的压力和剪力的同时,还会受到柱的挤压作用,在框架与填充墙之间产生相互协调耦合作用<sup>[47]</sup>。由此看来,填充墙不仅可以增加结构的冗余度,传递水平和竖向荷载,使结构内力重分布更加均匀,还可以承担部分水平和竖向荷载,从而提高结构的抗连续倒塌能力。吴春<sup>[48]</sup>从定量的角度分析了填充墙对混凝土框架结构抗连续倒塌能力的影响,发现纯框架结构的鲁棒性指标比填充墙的鲁棒性指标低 20%~50%。单思镛等<sup>[49-50]</sup>通过研究发现,填充墙开洞率越大的结构,其抗连续倒塌能力越弱。Tsai 等<sup>[51]</sup>通过对某 10 层 RC 框架抗连续倒塌能力的研究发现,不同类型的开洞填充墙对结构抗连续倒塌能力的影响不同。高丽<sup>[52]</sup>还发现洞口大小保持不变时,洞口位置的变化会显著影响整体结构的受力性能:当洞口设置在框架柱边时,结构的整体受力性能最差,洞口设置在两柱中间时,其受力性能会有所提高;当洞口只与框架柱相距一小段距离时,其受力性能最佳。

以上研究说明填充墙能增强结构的抗连续倒塌能力,而开洞又会使结构抗连续倒塌能力减弱,实际

工程中如何考虑填充墙的影响,尤其量化计算其对结构抗倒塌能力的贡献等问题仍需进一步研究。

### 1.5 考虑抗震设计对结构抗连续倒塌能力的影响

现有研究认为相对于非抗震设计结构而言,抗震设计结构将具有更好的抗连续倒塌能力<sup>[53-60]</sup>。Qian 等<sup>[61]</sup>以抗震和非抗震设计的单层带板和不带板框架为研究对象,对其在角柱失效情况下的动力效应进行试验研究,结果表明,对于带板和不带板框架,抗震设计使第一峰值位移分别降低 23.5%, 65.4%。江晓峰等<sup>[62]</sup>指出抗震设计中提出的结构冗余特性和延性能力等要求对提高结构的抗连续倒塌能力是有益的。Powell<sup>[63]</sup>和 Osteraas<sup>[64]</sup>以及黄华等<sup>[65]</sup>认为结构的抗连续倒塌设计与抗震设计二者之间存在显著差别,抗震设计方法虽然有益于结构的抗连续倒塌能力,但不足以让它取代抗连续倒塌设计,并且 Gurley<sup>[66]</sup>认为地震同样可以破坏承重构件(经常是角柱),从而造成双向的悬臂梁型倒塌机制,地震工程界的确需要认识到柱破坏事件的重要性,从而考虑抗连续倒塌设计。目前关于抗震设计对结构连续倒塌影响的研究还不成熟,抗震结构如何具有可靠的抗连续倒塌能力尚有待进一步研究。

## 2 连续倒塌破坏机制

以上因素对结构抗倒塌能力的影响最终体现到结构倒塌破坏机制上。当前研究者就 RC 结构的连续倒塌破坏,根据其不同受力阶段分别提出了梁机制(压拱机制)、悬链线机制和拉压薄膜机制。

### 2.1 梁机制

初明进等<sup>[67]</sup>通过对钢筋混凝土单向梁板子结构缩尺试验,认为在加载位移较小时,试件主要受弯,处于小变形阶段,可定义为梁机制,见图 3。结构连续倒塌抗力主要由截面抗弯承载力来提供,梁内钢筋承受由弯曲作用而引起的不断增加的拉力,直至其达到屈服状态,进而形成塑性铰,当所有梁截面的塑性铰完全形成时该阶段结束。结构破坏主要集中在梁柱节点处的塑性铰区域,整体构件破坏不会特别严重。

李易等<sup>[68]</sup>针对 RC 框架梁机制下的受力机理,建立了连续倒塌抗力需求的计算方法,为钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计提供了依据。初明进等<sup>[67]</sup>认为梁机制下的抗弯承载力主要取决于楼板截面尺寸和钢筋配置,楼板的宽度、厚度和板内配筋以及梁高能够显著增加试件在梁机制下的承载力。

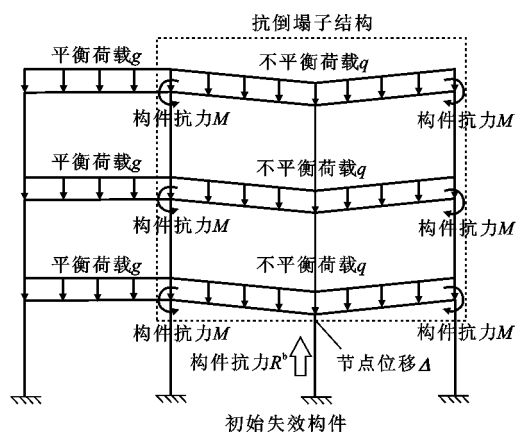


图 3 RC 框架结构抗连续倒塌的梁机制

Fig. 3 Beam Mechanism of Anti-progressive Collapse for RC Frame Structure

熊进刚等<sup>[69]</sup>对 RC 空间框架的抗连续倒塌进行了试验研究,结果表明,纵向框架中起着抗连续倒塌作用的是梁机制和悬链线机制,而横向框架只有悬链线机制起作用。

压拱效应产生于梁机制阶段,需要两侧能提供足够的水平约束才能产生<sup>[70]</sup>,这是因为在轴向约束下,梁端靠近边柱的截面混凝土开裂后中性轴上移,而失效柱两边的截面在混凝土开裂后中性轴下移,使梁处于压拱受力状态,如图 4 所示,其中  $P$  为失效柱顶的集中力,  $M_{e0}$  为 A 截面和 D 截面提供的弯矩,  $M_{m0}$  为 B 截面和 C 截面提供的弯矩,  $M_e$  为 A 处和 D 处截面的抗弯承载力,  $M_m$  为 B 处和 C 处截面的抗弯承载力,  $l_n$  为单跨净跨度,  $N_n$  为轴向压力,另外在弯矩较小的中间区域内构件全截面受压。

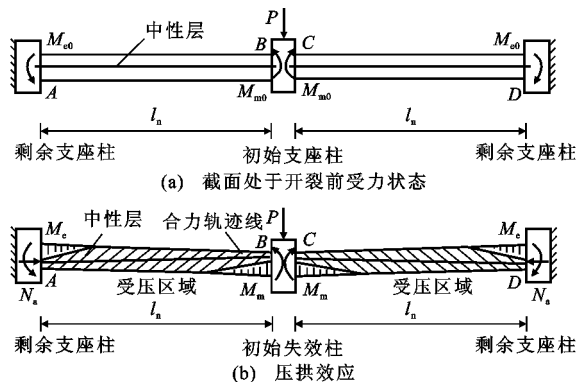


图 4 压拱机制受力分析

Fig. 4 Force Analysis of Compressive Arch Mechanism

Park 等<sup>[71]</sup>通过建立 RC 结构在压拱机制下的承载力理论计算公式,证实了由于压拱效应的存在,即使单向板只受部分约束,其承载力仍有显著提高。周育凌等<sup>[70]</sup>通过建立压拱机制下的 RC 框架连续倒塌抗力分析模型,得到楼盖系统的连续倒塌抗力

计算公式,并认为按传统的塑性理论会严重低估 RC 框架的真实倒塌抗力。Su 等<sup>[72]</sup>通过双跨梁试验,验证了轴向约束梁产生的压拱效应可以提高双跨梁的承载能力。王英等<sup>[73]</sup>通过 RC 双跨梁的静力加载试验,进一步验证轴向约束下双跨梁产生的压拱效应和悬索效应,认为压拱效应提高了梁的竖向承载力。Kang 等<sup>[74]</sup>通过对柱的刚度进行量化和参数研究,认为压拱机制作用下,当柱的高度较低、截面较小或者梁的深度较大时,柱很可能发生剪切和弯曲破坏。

目前研究者普遍认为压拱机制对提高结构连续倒塌抗力有利,而对其不利影响的研究甚少。压拱效应的存在使梁的竖向承载力在钢筋屈服后又得到了显著提升,但对由此导致的柱剪切和弯曲破坏机理研究并不充分。对梁机制作用阶段抗倒塌承载能力影响因素的定量分析不足,承载力计算方法不够完善,还有待进一步的研究。

2.2 悬链线机制

随着竖向变形增加,压拱效应减弱,结构进入大变形阶段,水平构件截面丧失抗弯能力,由受压转为受拉,倒塌破坏进入悬链线阶段。初明进等<sup>[67]</sup>认为,在加载位移较大时构件全截面受拉,可定义为悬链线机制。此时水平构件通过轴力和较大挠度形成的力矩来抵抗外荷载所产生的弯矩<sup>[75]</sup>。GSA 2003<sup>[5]</sup>和 DOD 2010<sup>[6]</sup>分别对梁类构件在悬链线机制中的转动能力进行了要求。悬链线效应大幅提高了梁的竖向承载力和变形能力<sup>[72-76]</sup>。由图 5 可见,悬链线机制下结构的倒塌抗力主要由框架梁或楼板的轴向受拉承载力来提供。

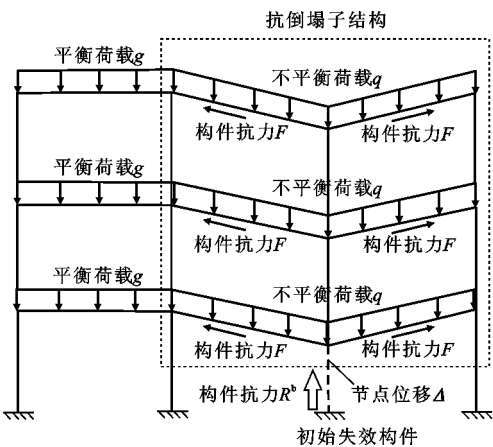


图 5 RC 框架结构抗连续倒塌的悬链线机制  
Fig. 5 Catenary Mechanism of Anti-progressive Collapse for RC Frame Structure

易伟建等<sup>[77]</sup>采用拟静力试验方法对 3 层 4 跨

的 RC 平面框架进行了连续倒塌试验,认为框架结构经历了弹性阶段、塑性阶段和悬索破坏 3 个阶段,并且经历了受弯为主的塑性机构到受拉为主的悬索机构的转换过程。Orton 等<sup>[78]</sup>认为,当移除 1 根承重柱时,碳纤维增强复合材料(CFRP)可以通过悬链线效应来提供足够的连续倒塌抗力去防止结构的连续倒塌,并且悬索效应需要足够大的竖向变形来产生轴向拉力以抵抗竖向荷载。初明进等<sup>[67]</sup>通过梁板子结构试验认为:悬链线机制下的承载力主要取决于截面中的钢筋,影响截面钢筋数量的楼板宽度和楼板配筋率能大幅提高悬链线机制下的承载力。李易等<sup>[79]</sup>建立了直线型和曲线型悬链线机制的抗力需求关系计算公式,并给出了悬链线机制下抗连续倒塌承载力储备值的常用范围:直线型悬链线机制储备值在 1.46~2.01 之间;曲线型悬链线储备值在 1.66~2.25 之间。于晓辉等<sup>[80]</sup>建立了考虑悬链线效应的 RC 框架宏单元模型,研究悬链线效应对 RC 框架抗连续倒塌能力的影响,发现悬链线效应可以充分发挥,并能有效提高结构抗连续倒塌能力。Naji<sup>[81]</sup>通过极限分析法模拟悬链线效应,研究表明悬链线效应增加了结构抗连续倒塌能力,不考虑悬链线效应可能会导致承载力计算结果偏低。

悬链线机制下的承载力主要由截面钢筋的配筋面积决定,而梁和楼板的配筋及其协同工作机理比较复杂,并且不同部位悬链线机制的效能发挥并不相同,目前对该问题的研究并不充分。

综上,试件的受力全过程为:梁机制(梁底产生轴向压力)→悬链线机制形成(梁内产生拉力)→梁靠近中柱节点端底部钢筋断裂→梁远离中柱端顶部钢筋断裂(结构倒塌)。压拱机制和悬链线机制均减缓和抑制了结构连续倒塌。压拱机制和梁机制不是 2 个完全分离的阶段,梁受弯达到一定阶段时,压拱效应伴随产生,并对梁的受弯承载力产生提高作用。从梁机制到悬链线机制有明显的转化阶段,转变的标志通常是钢筋从受压逐步转为受拉。

2.3 薄膜机制

薄膜机制主要是由框架结构中的楼板所产生,是结构重要的连续倒塌破坏机制。四周约束的双向板受荷后,混凝土开裂,引起截面中性轴移动,同时引起板边界在平面内的扩张。如果板四周向外扩张的趋势受到压力约束,双向板中将会产生压薄膜效应;当板的挠度增大到一定值时,双向板边缘有向内移动的趋势,如果这种向内移动的趋势受到拉力约束,双向板中将会产生拉薄膜效应<sup>[82]</sup>。如图 6 所

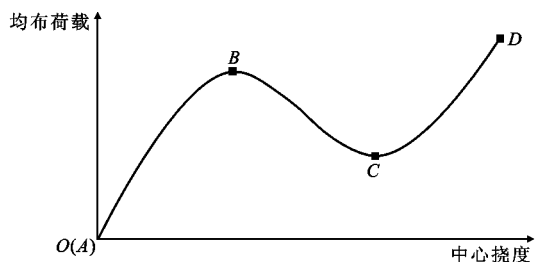


图6 边缘处受侧向约束的双向RC板荷载-挠度曲线  
Fig.6 Load-deflection Curve of Two-way RC Slab Under Lateral Restraints on Edge

示,AB 和 BC 两段为受压薄膜阶段,随着双向板所受荷载逐渐增加,AB 段楼板会由弹性渐渐进入弹塑性阶段。B 点处板的屈服模式形成后,双向板承受的荷载为极限荷载。由于混凝土抗压和抗拉性能的差异较大,随着中心挠度增大,构件受拉部位开裂,构件中部截面中性轴上移,构件端部截面中性轴下移,中性轴不在一条水平线上,因为构件边缘约束的存在,在荷载作用后构件由受弯转换为偏心受压,即弯矩和轴力同时作用。B 点之后,挠度继续增加,受压薄膜压力降低,板承担的荷载迅速下降。接近 C 点时,板中心区域的薄膜压力逐渐转变为拉力,随挠度继续增大。由于板中心区域的下表面受拉开裂的同时上表面也受拉,裂缝在板的中心区域贯穿于板厚,使得板中心区域的双向钢筋形成钢筋网受力模式并继续承载,钢筋屈服进入弹塑性阶段。当挠度到达 D 点时,钢筋开始断裂或者板的其他部分遭到破坏。受拉薄膜力使得板在达到 B 点极限荷载时免于大区域破坏,受拉薄膜阶段内允许的大挠度使得板实际承担的荷载超过极限荷载。

Wang<sup>[83]</sup>认为支撑柱失效情况下,楼板在大挠度下产生薄膜效应,使得承载力远大于基于小挠度破坏准则时的承载力。丁阳等<sup>[29]</sup>通过 2 个 10 层钢框架结构的抗倒塌能力、破坏模式和抗倒塌机制分析,认为节点和楼板会对结构的抗倒塌性能有较大提高,节点破坏后结构竖向荷载由楼板产生的薄膜效应来承担。史奉伟等<sup>[84]</sup>建立数值模型,分析了底层边缘内柱失效情况下组合楼板的受力特点和悬链线阶段组合楼板的薄膜效应机理,认为侧向无约束板在大变形阶段通过周围板块形成受压环以支撑中心变形区域的拉力,发挥受拉薄膜效应,提高结构拉结力。Fu 等<sup>[85]</sup>讨论了钢结构和组合结构的连续倒塌情况,对三维复合楼盖模型进行静力分析,研究荷载传递机理及破坏发展过程,认为双跨主梁的悬链线效应比次梁作用发生要早,在梁中拉薄膜效应比

悬链线效应作用发生早。

RC 框架结构连续倒塌过程中,组合楼板产生的薄膜效应可以显著提高失效节点的极限承载力,延缓塑性铰的破坏发展,减小失效点位移,因此抗连续倒塌设计中需考虑薄膜效应的影响。当前对基于火灾情况下组合楼板薄膜效应的研究较多,对连续倒塌情况下组合楼板薄膜效应的研究较少,且拉压薄膜效应是否会同时作用,其作用机理和承载力计算方法等需进一步的试验研究来验证。

### 3 结 语

(1)柱失效对结构连续倒塌的影响与柱所处位置和柱距有关,是影响结构连续倒塌能力最重要的参数之一。

(2)楼板至少能提高结构抗连续倒塌能力 24%,在连续倒塌设计时不可忽略板的作用,但增加板厚对结构连续倒塌能力的影响是否有利,尚未得出一致结论,有待进一步的研究。虽然有些学者提出了楼板抗力的计算公式,但公式的正确性还有待进一步的验证。

(3)现有关于结构抗连续倒塌的研究以有限元数值模拟为主,试验研究较少,因结构抗连续倒塌的评判标准、所用有限元软件等因素的不同,得出的结论并不统一,与实际情况有一定的差距,不能很好地用于规范和标准的编写,建议以后加大连续倒塌的试验研究。

(4)虽然节点、填充墙、抗震设计等因素对结构的抗连续倒塌能力具有一定的影响,但定量化的研究偏少,设计时如何考虑尚未形成实用的研究成果。

(5)RC 结构的倒塌机制根据其受力阶段不同可分为梁机制(压拱机制)、悬链线机制和拉压薄膜机制。梁上先后作用梁机制(压拱机制)和悬链线机制。板上先后作用压薄膜机制和拉薄膜机制,但不同构件作用机制之间的耦合作用和度量指标等研究不足。

(6)限于现有的技术和水平,在对结构连续倒塌的研究中,很少有学者对偶然荷载作用时所产生的冲击荷载和上部构件破坏对下部结构的碰撞冲击对结构连续倒塌的影响进行研究,这也是未来努力的一个方向。

### 参考文献:

### References:

[1] 傅学怡,黄俊海. 结构抗连续倒塌设计分析方法探讨

- [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增1): 195-199.
- FU Xue-yi, HUANG Jun-hai. Structural Design Methods to Prevent Progressive Collapse[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S1): 195-199.
- [2] 万福磊. 建筑结构连续性倒塌数值模拟方法研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011.
- WAN Fu-lei. Research on the Numerical Simulation Method of Building Structure Progressive Collapse[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2011.
- [3] 何和萍. 多层框架结构抗连续倒塌分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- HE He-ping. Progressive Collapse Analysis of Multi-storey Frame Structures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [4] STAROSSEK U. Typology of Progressive Collapse[J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2302-2307.
- [5] GSA 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S].
- [6] DOD 2010, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S].
- [7] EN 1991-1-7: 2006, Eurocode 1: Actions on Structures — Part 1-7: General Actions — Accidental Actions[S].
- [8] 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): 72-78.
- DIAO Meng-zhu, LI Yi, LU Xin-zheng, et al. A Simplified Simulation Method for Progressive Collapse of Reinforced Concrete Slabs[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S): 72-78.
- [9] TOHIDI M, BANIOTOPOULOS C. Effect of Floor Joint Design on Catenary Actions of Precast Floor Slab System[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 274-288.
- [10] ALASHKER Y, LI H, EL-TAWIL S. Approximations in Progressive Collapse Modeling[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(9): 914-924.
- [11] KIM S, LEE C H, LEE K. Effects of Floor Slab on Progressive Collapse Resistance of Steel Moment Frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 110: 182-190.
- [12] 王惠宾, 朱江, 熊进刚, 等. 混凝土框架结构中楼板抗连续性倒塌效应的分析[J]. 南昌大学学报: 理科版, 2014, 38(6): 548-552.
- WANG Hui-bin, ZHU Jiang, XIONG Jin-gang, et al. Analysis on Floor-collapsed Progressive Resistance Effect of RC Frame Structures[J]. Journal of Nanchang University: Natural Science, 2014, 38(6): 548-552.
- [13] 李付勇. 钢筋混凝土框架抗连续倒塌仿真分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 30-35.
- LI Fu-yong. Progressive Collapse Simulation of Reinforced Concrete Frames[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2): 30-35.
- [14] 崔瑞夫. 楼板对 RC 框架结构抗连续倒塌性能的影响[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- CUI Rui-fu. The Influence of Floor Slab on the Collapse Resistance of RC Frame Structures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [15] 李亚娥, 左文武, 王加祥, 等. 混凝土框架结构楼板对抗连续性倒塌的影响[J]. 甘肃科学学报, 2014, 26(4): 110-113.
- LI Ya-e, ZUO Wen-wu, WANG Jia-xiang, et al. Influence of Concrete Frame Structure Floors on Progressive Collapse[J]. Journal of Gansu Sciences, 2014, 26(4): 110-113.
- [16] 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 Wen-wu. Influence of Slabs on the Progressive Collapse Behavior of RC Frame Structures[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [17] QIAN K, LI B. Slab Effects on Response of Reinforced Concrete Substructures After Loss of Corner Column[J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(6): 845-855.
- [18] LIM N S, TAN K H, LEE C K. Experimental Studies of 3D RC Substructures Under Exterior and Corner Column Removal Scenarios[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 409-427.
- [19] 齐宏拓, 李琪琳. 钢筋混凝土楼板抗连续倒塌性能数值模拟分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(增): 358-364.
- QI Hong-tuo, LI Qi-lin. Research on Crush of Reinforced Slabs in Progressive Collapse[J]. Building Structure, 2010, 40(S): 358-364.
- [20] 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.
- [21] 何沙沙. 现浇钢筋混凝土楼板对框架结构抗连续倒塌性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- HE Sha-sha. The Influence of Cast-in-place RC Slab on the Progressive Collapse Resistance of Frame Structure[D]. Changsha: Hunan University, 2014.



- [22] 赵 颖. RC 框架结构节点和楼板对结构抗连续倒塌性能影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
ZHAO Ying. The Influences of Joint and Slab on the Progressive Collapse-resisting Performance of RC Frames[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [23] 童少轩. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌分析方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012.  
TONG Shao-xuan. Research into Reinforce Concrete Frame Structure Progressive Collapse Analyze Methods[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [24] 陈 状. 考虑填充墙影响的 RC 框架连续倒塌分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.  
CHEN Zhuang. Progressive Collapse Analysis of RC Frame to Consider the Impact of Infilled Walls[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [25] 卢 磊. 多层钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
LU Lei. Study on Multi-layer Reinforced Concrete Structure Prevented Progressive Collapsed Performance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [26] 杨雪蕾. 基于抗震设计的 RC 框架结构抗连续倒塌能力研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
YANG Xue-lei. Research on the Progressive Collapse Resistance Capacity of Earthquake Resistant Design-based RC Frame Structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [27] REZVANI F H, RONAGH H. Span Length Effect on Alternate Load Path Capacity of Welded Unreinforced Flange-bolted Web Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 714-728.
- [28] 杜修力, 石 磊. 钢结构梁柱抗连续倒塌加固节点, 中国: CN101736817A[P]. 2010-06-16.  
DU Xiu-li, SHI Lei. The Strengthening Beam-column Joint of Steel Structure, China: CN101736817A[P]. 2010-06-16.
- [29] 丁 阳, 宋晓然, 师燕超, 等. 考虑节点影响的钢框架结构连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 11-18.  
DING Yang, SONG Xiao-ran, SHI Yan-chao, et al. Progressive Collapse Analysis of Steel Frame Structures Considering Influence of Steel Connection[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 11-18.
- [30] 马人乐, 黄 鑫, 陈俊岭. 钢框架梁柱节点在结构连续倒塌中的性能分析[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(2): 31-35.  
MA Ren-le, HUANG Xin, CHEN Jun-ling. Analysis of Performance of Beam-column Connections of Steel Frame in the Progressive Collapse of Structures[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(2): 31-35.
- [31] 陈俊岭, 舒文雅, 李金威. 框架结构典型梁柱节点的抗连续倒塌性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(1): 53-58, 135.  
CHEN Jun-ling, SHU Wen-ya, LI Jin-wei. Performance of Various Steel Moment Connections Under Progressive Collapse Scenario[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(1): 53-58, 135.
- [32] MAIN J A, SADEK F. Development of 3D Models of Steel Moment-frame Buildings for Assessment of Robustness and Progressive Collapse Vulnerability[C]// ASCE. Structures Congress 2009. Austin: ASCE, 2009: 1-8.
- [33] YU M, ZHA X X, YE J Q. The Influence of Joints and Composite Floor Slabs on Effective Tying of Steel Structures in Preventing Progressive Collapse [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(3): 442-451.
- [34] KIM T, KIM J. Collapse Analysis of Steel Moment Frames with Various Seismic Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(6): 1316-1322.
- [35] KIM T, KIM J. Progressive Collapse-resisting Capacity of Steel Moment Frames Considering Panel Zone Deformation[J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(2): 231-240.
- [36] YANG B, TAN K H. Experimental Tests of Different Types of Bolted Steel Beam-column Joints Under a Central-column-removal Scenario [J]. Engineering Structures, 2013, 54: 112-130.
- [37] 司应石. 钢筋混凝土框架结构局部构件对连续倒塌的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.  
SI Ying-shi. Local Structures of Reinforced Concrete Frame Structure's Influence on the Continuous Collapse[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [38] KANG S B, TAN K H. Progressive Collapse Resistance of Precast Concrete Frames with Discontinuous Reinforcement in the Joint[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 04017091.
- [39] 李 爽, 赵 颖, 翟长海, 等. 节点对 RC 框架结构抗连续倒塌能力影响研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 80-87.  
LI Shuang, ZHAO Ying, ZHAI Chang-hai, et al. The

- Influence of Joint on the Progressive Collapse-resisting Performance of RC Frames[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 80-87.
- [40] 李 寰. 考虑抗震设计与填充墙影响的 R. C. 框架抗连续倒塌性能仿真分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.  
LI Huan. Simulation Analysis on the Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Frame While Considering the Effects of Seismic Design and Infilled Wall[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [41] 赵 鑫. 考虑填充墙影响的钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2012.  
ZHAO Xin. Research on the Progressive Collapses Resistance Performance of Reinforced Concrete Frame Structure Including Effects of Infill Walls[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2012.
- [42] KAUSHIK H B, RAI D C, JAIN S K. Code Approaches to Seismic Design of Masonry-infilled Reinforced Concrete Frames: A State-of-the-art Review [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(4): 961-983.
- [43] QIAN K, LI B. Effects of Masonry Infill Wall on the Performance of RC Frames to Resist Progressive Collapse[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 04017118.
- [44] SASANI M, BAZAN M, SAGIROGLU S. Experimental and Analytical Progressive Collapse Evaluation of Actual Reinforced Concrete Structure[J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(6): 731-739.
- [45] SASANI M, SAGIROGLU S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(3): 478-488.
- [46] SASANI M. Response of a Reinforced Concrete Infill-frame Structure to Removal of Two Adjacent Columns[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(9): 2478-2491.
- [47] 樊 江, 陶 燕. 砖填充墙框架结构中填充墙的应力分析[J]. 昆明理工大学学报, 1998, 23(1): 25-28.  
FAN Jiang, TAO Yan. The Stress Analysis of Masonry Infill Walls in Reinforced Concrete Frame Buildings [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 1998, 23(1): 25-28.
- [48] 吴 春. RC 空间框架填充墙结构连续倒塌可视化模拟与安全性评定[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
WU Chun. Visualized Simulation and Safety Assessment for Progressive Collapse of RC Space Frames with and Without Infilled Walls[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [49] 单思镝. RC 填充墙框架连续倒塌机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
SHAN Si-di. Research on Progressive Collapse Mechanisms of RC Frames with Infill Walls[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [50] 赵福家, 冯强强. 开洞填充墙对框架结构受力性能影响的研究[J]. 福建建设科技, 2012(3): 24-25.  
ZHAO Fu-jia, FENG Qiang-qiang. Research on the Influence of Opening In-filled Wall to Mechanical Behavior of Frame [J]. *Fujian Construction Science & Technology*, 2012(3): 24-25.
- [51] TSAI M H, HUANG T C. Progressive Collapse Analysis of an RC Building with Exterior Partially In-filled Walls [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2013, 22(4): 327-348.
- [52] 高 丽. 框架开洞砌体填充墙平面外受力性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.  
GAO Li. Research on the Mechanical Behavior of Masonry Infilled Wall with Opening Under Out-of-plane Loading[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [53] 陈 蕾. RC 框架结构抗连续倒塌性能分析与可靠度评估[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
CHEN Lei. Analysis and Reliability Assessment on Progressive Collapse Resistance of RC Frame Structures[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [54] BAO Y H, KUNNATH S K, EL-TAWIL S, et al. Macromodel-based Simulation of Progressive Collapse: RC Frame Structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1079-1091.
- [55] CORLEY W G. Applicability of Seismic Design in Mitigating Progressive Collapse[C]//National Institute of Building Sciences. Proceedings of National Workshop on Prevention of Progressive Collapse. Washington DC: National Institute of Building Sciences, 2002: 10-11.
- [56] HAYES J R, WOODSON S C, PEKELNICKY R G. Can Strengthening for Earthquake Improve Blast and Progressive Collapse Resistance[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1157-1177.
- [57] BILOW D N, KAMARA M. General Services Administration Progressive Collapse Design Guidelines Applied to Concrete Moment-resisting Frame Buildings [C]//ASCE. Structures Congress 2004. Nashville: ASCE, 2004: 1-27.
- [58] CORLEY W G, MLAKAR P F, SOZEN M A, et al. The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1998, 12(3):

- 100-112.
- [59] YAP S L, LI B. Experimental Investigation of Reinforced Concrete Exterior Beam-column Subassemblages for Progressive Collapse[J]. ACI Structural Journal, 2011, 108(5): 542-552.
- [60] QIAN K, LI B. Experimental and Analytical Assessment on RC Interior Beam-column Subassemblages for Progressive Collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 26(5): 576-589.
- [61] 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.
- [62] 江晓峰, 陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究现状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 1-8.  
JIANG Xiao-feng, CHEN Yi-yi. A Review on the Progressive Collapse and Control Design of Building Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 1-8.
- [63] POWELL G. Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis[C]//ASCE. Structures Congress, 2005. New York: ASCE, 2005: 1-24.
- [64] OSTERAAS J D. Murrah Building Bombing Revisited: A Qualitative Assessment of Blast Damage and Collapse Patterns[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 330-335.
- [65] 黄 华, 刘伯权, 张彬彬, 等. 钢筋混凝土抗震框架连续倒塌行为分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 35-44.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, ZHANG Bin-bin, et al. Analysis of Progressive Collapse Behavior of Earthquake-resistant Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 35-44.
- [66] GURLEY C. Progressive Collapse and Earthquake Resistance[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2008, 13(1): 19-23.
- [67] 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 Ming-jin, ZHOU Yu-long, LU Xin-zheng, et al. An Experimental Study on One-way Reinforced Concrete Beam-slab Substructures for Resisting Progressive Collapse[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 31-40.
- [68] 李 易, 叶列平, 陆新征. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 I: 梁机制[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 1-8.  
LI Yi, YE Lie-ping, LU Xin-zheng. Progressive Collapse Resistance Demand of RC Frame Structures Based on Energy Method I: Beam Mechanism[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 1-8.
- [69] 熊进刚, 吴赵强, 邹 园, 等. 钢筋混凝土空间框架结构抗连续倒塌机制研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(9): 105-108.  
XIONG Jin-gang, WU Zhao-qiang, ZOU Yuan, et al. Research on Progressive Collapse Mechanism of RC Spatial Frame Structures[J]. Building Structure, 2013, 43(9): 105-108.
- [70] 周育洸, 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 Yu-long, LI Yi, LU Xin-zheng, et al. An Analytical Model of Compressive Arch Action of Reinforced Concrete Frames to Resist Progressive Collapse[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 34-42.
- [71] PARK R, GAMBLE W L. Reinforced Concrete Slabs[J]. Wiley, 1980, 4(4): 636-645.
- [72] SU Y P, TIAN Y, SONG X S. Progressive Collapse Resistance of Axially-restrained Frame Beams[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(5): 600-607.
- [73] 王 英, 顾祥林, 林 峰. 考虑压拱效应的钢筋混凝土双跨梁竖向承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 32-42.  
WANG Ying, GU Xiang-lin, LIN Feng. Vertical Bearing Capacity of RC Two-bay Beams Considering Compressive Arch Action[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 32-42.
- [74] KANG S B, TAN K H. Analytical Study on Reinforced Concrete Frames Subject to Compressive Arch Action[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 373-385.
- [75] 何 政, 黄国辉. 框架结构悬链线效应研究新进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 547-561.  
HE Zheng, HUANG Guo-hui. Progress in Studies of Catenary Action in Frame Structures[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 547-561.
- [76] YU J, TAN K H. Experimental and Numerical Investigation on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Beam Column Sub-assemblages[J]. Engineering Structures, 2013, 55: 90-106.
- [77] 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, 2009, 28(5): 104-109, 117.  
YI Wei-jian, HE Qing-feng, XIAO Yan. Collapse Performance of RC Frame Structure[J]. Journal of Build-

- ing Structures, 2009, 28(5): 104-109, 117.
- [78] ORTON S, JIRSA J O, BAYRAK O. Carbon Fiber-reinforced Polymer for Continuity in Existing Reinforced-concrete Buildings Vulnerable to Collapse[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(5): 608-616.
- [79] 李 易, 陆新征, 叶列平. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 II: 悬链线机制[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 9-16.
- LI Yi, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Progressive Collapse Resistance Demand of RC Frame Structures Based on Energy Method II: Catenary Mechanism [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 9-16.
- [80] 于晓辉, 钱 凯, 吕大刚. 考虑悬链线效应的钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌能力分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4): 28-34.
- YU Xiao-hui, QIAN Kai, LU Da-gang. Progressive Collapse Capacity Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Considering Catenary Action [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 28-34.
- [81] NAJI A. Modelling the Catenary Effect in the Progressive Collapse Analysis of Concrete Structures[J]. Structural Concrete, 2016, 17(2): 145-151.
- [82] 陈 曦. RC 框架结构抗连续倒塌中压拱作用和悬索作用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- CHEN Xi. Study on the Arch Action and Catenary Action for RC Frame Structures to Resist Progressive Collapse[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [83] WANG Y C. Tensile Membrane Action and Fire Resistance of Steel Framed Buildings[C]//HASEMI Y. Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science. Melbourne: International Association for Fire Safety Science, 1997: 1117-1128.
- [84] 史奉伟, 王 来, 董 硕. 基于楼板薄膜效应的钢框架抗连续倒塌研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 113-118.
- SHI Feng-wei, WANG Lai, DONG Shuo. Progressive Collapse Analysis of Steel Frame Structure Based on Membrane Action of Composite Floor Slabs[J]. Industrial Construction, 2016, 46(3): 113-118.
- [85] FU Q N, TAN K H, ZHOU X H, et al. Numerical Simulations on Three-dimensional Composite Structural Systems Against Progressive Collapse[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 135: 125-136.