

# 钢筋混凝土框架结构连续倒塌的竖向非线性动力分析

吕大刚, 李雁军, 陈志恒

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**结构的连续倒塌分析(PCA)是结构抗连续倒塌能力定量评定和抗连续倒塌设计的基础,已成为当前国内外土木工程界的热点研究领域。本文基于备用荷载路径原理,采用考虑构件失效时长的竖向非线性动力分析方法,对钢筋混凝土平面框架结构进行了竖向连续倒塌分析,根据损伤结构的反应判断剩余结构能否抵抗连续倒塌,分析中考虑了将同一轴线不同楼层的框架柱逐根移除和将同一轴线所有楼层的框架柱同时移除这两种情况对结构倒塌失效模式的影响,探讨了失效时长对结构动力响应的影响,发现构件失效时长对剩余结构的响应有重大影响。研究表明,竖向非线性动力分析方法是结构抗连续倒塌设计与抗连续倒塌能力分析的一种有效方法。

**关键词:**连续倒塌分析;竖向非线性动力分析;备用荷载路径;抗倒塌能力;构件移除;失效时长

中图分类号:TU311.4

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0049-05

## Progressive Collapse Analysis of RC Frame Using Vertical Nonlinear Dynamic Analysis

LU Da-gang, LI Yan-jun, CHEN Zhi-heng

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China,)

**Abstract:** Progressive Collapse Analysis (PCA) is the base of quantitative assessment of progressive collapse-resisting capacity and progressive collapse-resisting design. There has been heightened interest among researchers of civil engineering in PCA. PCA of planar RC frame is carried on by vertical nonlinear dynamic analysis based on alternate load path method. According to responses of damage structure, progressive collapse-resisting capacity of remaining structure is evaluated. Two cases of removal of elements are analyzed, removal of columns at different stories on the same axes one by one and removal of all columns on the same axes at the same time. According to analysis of the effect of failure duration on structural progressive collapse, it is showed that the response of remaining structure is highly sensitive to failure duration of elements. The results indicate that vertical nonlinear dynamic analysis is an efficient method of progressive collapse-resisting design and progressive collapse-resisting capacity analysis.

**Key words:** progressive collapse analysis, vertical nonlinear dynamic analysis, alternate load path, collapse-resisting capacity, removal of element, failure duration

结构的连续倒塌是结构的初始局部损伤失效引起整体结构与初始损伤不成比例的失效,造成部分或整体结构的倒塌<sup>[1-3]</sup>。自1968年英国Ronan Point公寓垮塌以后<sup>[4]</sup>,特别是2001年美国纽约世贸中心大楼遭到飞机撞击和随后的大火造成的彻底坍塌事件,有关结构连续倒塌的科技文献层出不穷,很多学者开展了避免结构连续倒塌设计方法的研究<sup>[5-9]</sup>。房屋的所有者以及政府机构也越来越关注于已有结构连续倒塌的可能性,要求设计能抵抗连续倒塌的新型结构。1970年,英国首先在建筑规范中提出了避免结构连续倒塌的要求;美国则颁布了著名的GSA“新建联邦办公建筑和重大现代项目的连续倒塌分析与设计”指南<sup>[10]</sup>和统一设施准则(UFC)“建筑物抗连续倒塌设计”<sup>[11]</sup>,它们较其他规范更为系统地阐述了结构连续倒塌的概念、设计方法、设计过程以及实施步骤等问题,给出了评价连续倒塌可能性的分析方

法;ASCE对连续倒塌的基本概念以及防止连续倒塌进行了系统的研究;20世纪80年代以后,中国的各种建筑结构设计规范、标准和规程中也提出了防止结构连续倒塌,加强结构整体稳定性的总体要求,但是还没有形成可以普遍接受的结构抗连续倒塌设计方法。

本文采用考虑构件失效时长的竖向非线性动力分析方法,对钢筋混凝土平面框架结构进行了竖向连续倒塌分析,根据损伤结构的反应判断剩余结构能否抵抗连续倒塌,分析中考虑了将同一轴线不同楼层的框架柱逐根移除和将同一轴线所有楼层的框架柱同时移除这两种情况对结构倒塌失效模式的影响,探讨了失效时长对结构动力响应的影响。

### 1 结构抗连续倒塌设计方法

1978年, Ellingwood根据概率风险分析的基本原理和各

国设计规范的抗连续倒塌要求,将结构的抗连续倒塌设计方法归结为三类<sup>[3]</sup>:1)事件控制法;2)间接设计法;3)直接设计法。对于结构工程师而言,主要考虑间接设计法和直接设计法。间接设计法主要包括概念设计和拉结强度设计;而直接设计法包括特殊局部抗力法(或关键构件法)和备用荷载路径。

间接设计法主要从结构概念设计的角度来改善结构的抗连续倒塌能力。抗连续倒塌概念设计的重要性得到了各国规范和设计指南的重视,概念设计主要包括<sup>[12]</sup>:合理的结构方案和结构布置,避免薄弱部位的存在;采用延性构造措施,使可能发生失效破坏部位具有足够的延性;加强构件间的连接,增强结构的整体性和连续性;增加结构的冗余度,使结构具有多个荷载传递路径;通过优化配筋方式,使楼板和梁能充分发挥悬链线作用;考虑反向荷载作用;墙和柱能承受一定的横向荷载。间接设计法只给出了一些定性的规定,缺乏量化的指标,实施过程很大程度上依赖于设计人员的主观经验。

拉结强度设计法通过对结构进行有效的捆绑实现横向的拉结,为结构提供足够的备用荷载路径,以提高结构的整体性和鲁棒性。按照拉结的位置和作用可分为内部拉结、周边拉结、对墙/柱的拉结、竖向拉结 4 种类型。拉结强度设计无需对整个结构进行受力分析,比较简便易行,但分析模型参数主观性较强。

关键构件设计法将偶然荷载直接作用到关键构件上对其进行设计,当遭遇到类似的偶然荷载作用时,该构件就不会失效。所谓关键构件是指失效后引发的破坏会超出局部破坏允许值的构件。关键构件法采用的设计方法与常规设计法一致,所不同的是荷载代表值的取法,该方法一定程度上减轻了局部破坏的程度,从而降低连续倒塌发生的概率。

备用荷载路径法,通过“假想构件移除”方法来研究或评价发生局部损伤结构的冗余性能及抵抗连续性倒塌的能力。通过有选择性的移除完整结构的一个或几个主要竖向承重构件(如,柱或承重墙),并对剩余结构进行分析和设计,使得剩余结构的冗余性足以提供足够的备用荷载路径来进行荷载重分布;分析中可以考虑塑性变形、悬链线以及薄膜效应类的大变形。在目前的抗连续倒塌分析中,备用荷载路径法是最准确可靠的方法。因为这种方法不依赖于具体的荷载形式,以结构发生局部破坏为起点进行分析,适合于任何偶然荷载作用下结构的破坏分析。本文即采用该方法对结构进行抗连续倒塌能力分析。

## 2 基于备用荷载路径的竖向非线性动力分析法

结构的连续倒塌破坏是一个非常复杂的非线性动力过程,目前主要有 4 种评定结构抗连续倒塌能力的分析方法:线性静力法、线性动力法、非线性静力法、非线性动力法。其中最基本、最简单的就是线弹性静力分析方法,但它无法考虑动力效应和材料非线性;非线性静力分析方法,当在水平荷载作用的情况下也就是众所周知的 Pushover 分析,而在连续倒塌分析中称为竖向 Pushover 分析或 Pushdown 分析,这种方法考虑了材料的非线性,但评定结果整体上偏于保守<sup>[13]</sup>;线弹性动力分析考虑了构件移除的实时性,但没有考

虑材料及几何非线性,使得分析结构不能考虑大的变形以及非线性;而非线性动力分析作为抗倒塌能力分析的主要方法,不仅考虑了构件移除的实时性和材料的非线性,而且包含了大变形、能量的耗散以及裂缝断裂等等非线性行为。基于备用荷载路径的竖向非线性动力分析是目前分析模拟结构连续倒塌全过程最有效的计算方法之一。

与外部动力荷载作用下的水平动力分析情形不同,用于抗连续倒塌分析的竖向非线性动力分析没有外部荷载的作用,内部动力荷载(也就是由于构件的突然移除产生的惯性力)是产生运动的诱因。如果结构在移除部分构件后,在内部动力荷载的作用下,能重新找到一个平衡稳定状态,那么结构就不会发生连续倒塌。否则,结构将会发生连续倒塌破坏。竖向非线性动力分析,须以正常使用荷载作用完毕后的状态为初始状态进行分析。

施加荷载的示意图如图 1 所示,作用到结构上的竖向荷载在  $t_0$  时刻施加完毕(如图 1(a)所示),对于竖向荷载静力分析部分,结构的时间是虚拟时间,只表示将静力分步施加到结构上。从  $t_0$  时刻开始到  $t_1$  时刻结束,构件处于被移除的过程,也就是其失效时长。当失效时长为 0 时表示构件瞬间失效,对应的是一个矩形的冲击荷载;如果不为 0,则表示构件的失效有一个时间过程,对应的是一个具有上升段的冲击荷载(如图 1(b)所示)。在 OpenSees 分析平台中,移除单元是在瞬间完成,为实现构件失效的过程性,需借助于结构不平衡力与等效结构的概念。结构不平衡力与失效构件的杆端内力的大小和方向相同,构件的失效过程就通过等效结构在不平衡力作用到剩余结构的过程来实现,如图 2 所示。

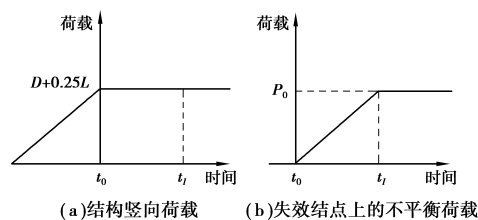


图 1 施加荷载示意图

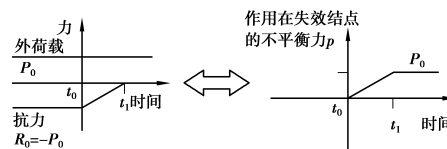


图 2 结点不平衡力

基于备用荷载路径的竖向非线性动力分析的步骤如下<sup>[13]</sup>。

- 1) 建立结构模型;
- 2) 正常使用荷载作用下结构的内力分布;
- 3) 进行稳定性分析;
- 4) 确定加载时间步;
- 5) 评估构件能力和力与位移关系;
- 6) 进行非线性分析;
- 7) 评定分析结果。

本文选用 OpenSees 作为分析平台,依据统一设施准则

(UFC)“建筑物抗连续倒塌设计”<sup>[11]</sup>提供的非线性分析流程,对五层三跨现浇钢筋混凝土框架办公楼的一榀框架进行了竖向非线性动力分析,混凝土材料的本构关系采用不考虑抗拉强度的 Concrete01 模型,钢筋的本构模型采用考虑屈服强化的 Steel02 模型,框架梁和框架柱采用考虑轴力与弯矩相互作用的集中塑性纤维梁柱单元进行模拟。

### 3 钢筋混凝土框架结构连续倒塌的非线性动力分析

本文采用 PKPM 按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)设计了一座典型的五层三跨钢筋混凝土框架结构办公楼<sup>[14]</sup>,结构平面布置如图 3 所示,底层层高 3.9 m,2~5 层,高 3.3 m;框架柱截面 600 mm×600 mm,框架梁截面 250 mm×500 mm;混凝土立方体抗压强度标准值取 35 MPa,纵向受力钢筋的屈服强度标准值取 335 MPa,箍筋的屈服强度标准值取 235 MPa。抗震设防烈度为 8 度,按 II 类场地土考虑。抗震设防烈度为 8 度,按 II 类场地土考虑地震作用。取中间一榀框架为研究对象,其立面图及梁柱配筋如图 4 所示。

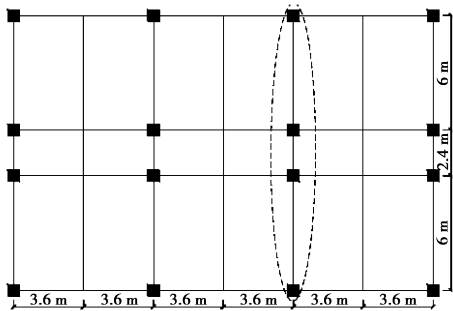


图 3 结构平面布置图

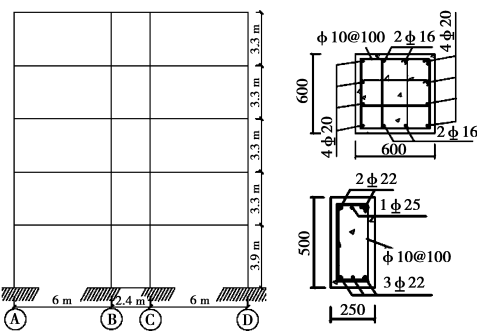


图 4 结构立面图及梁柱配筋图

进行非线性分析时施加的荷载组合,本文采用 GSA“新建联邦办公建筑和重大现代项目的连续倒塌分析与设计”指南<sup>[10]</sup>的规定,对于线弹性静力分析,荷载组合取为:2(DL+0.25LL);对于线弹性动力分析和非线性动力分析,荷载组合取为:DL+0.25LL,其中,DL 为恒荷载,LL 为活荷载。

#### 3.1 倒塌准则

结构的倒塌准则广义上可分为:截面层次、构件层次和结构层次。本文从构件截面破坏出现塑性铰,整个结构形成机构分析结构的连续倒塌。将梁柱截面边缘受力钢筋屈服

定义为生成塑性铰的时刻,塑性铰最大转角状态定义为箍筋内侧混凝土应变达到极限压应变。

#### 3.2 移除同一轴线不同楼层柱对倒塌模式的影响

为研究不同楼层构件失效对结构整体性的影响,我们将 B 轴处的柱逐层进行移除,以分析结构的倒塌失效模式。本节暂不考虑失效时长的影响,统一将构件在瞬间移除。模型的单元编号及柱移除的示意图 5。

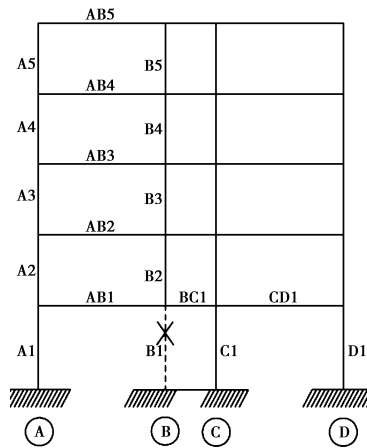


图 5 单元编号及移柱示意图

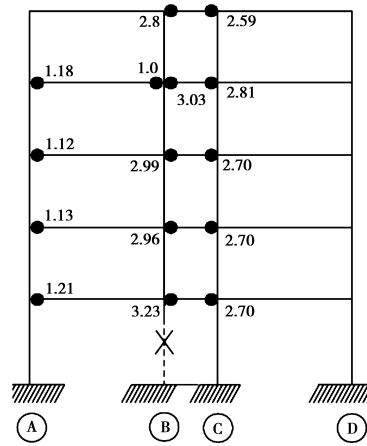


图 6 移除柱 B1 塑性铰分布

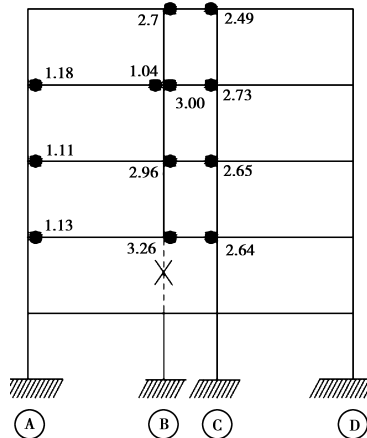


图 7 移除柱 B2 塑性铰分布

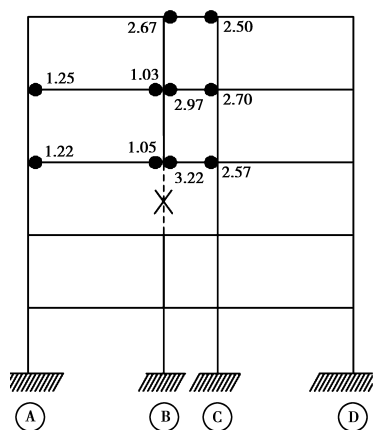


图8 移除柱B3塑性铰分布

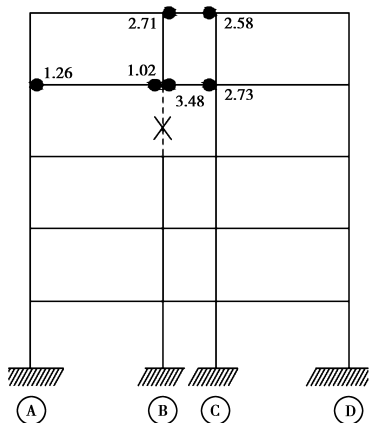


图9 移除柱B4塑性铰分布

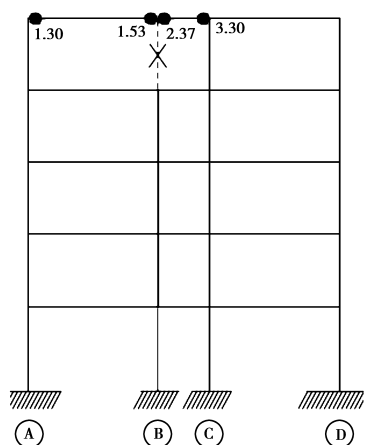


图10 移除柱B5塑性铰分布

从图6~图10可以看出,B轴处不同楼层柱失效模式下塑性铰的分布可见,结构的破坏集中在失效柱以上所有楼层的受损跨内,并且失效柱以上同轴线的所有楼层的框架柱均失去承载功能,各层的运动状态也趋于一致,整个结构不发生连续倒塌。表现为强柱弱梁破坏模式,从追逐到的截面塑性铰发展顺序发现,在 $0.25T$ 时结构处于动力平衡位置,短跨(BC跨)梁两端出现了塑性铰;在 $0.5T$ 时结构竖向位移首次达到最大值,长跨(AB)梁在远端(A端)出现了塑性铰。

BC跨梁端,最大转角与屈服转角的比值在3.0左右;而AB跨梁端,最大转角与屈服转角的比值在1.0左右,梁端最大转角和屈服转角很接近。这主要是因为,BC跨梁的线刚度大于AB跨梁的线刚度,致使分配的弯矩大,同时跨度的不同造成了转角的差异。

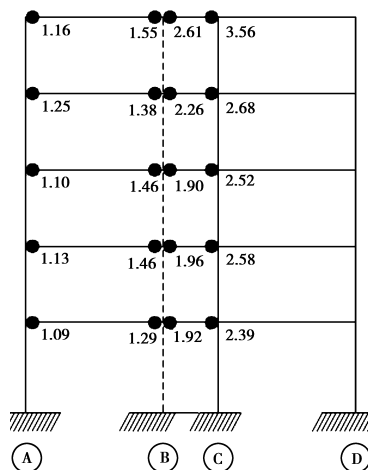


图11 移除B轴线处所有柱时的塑性铰分布

### 3.3 移除同一轴线处所有柱对倒塌模式的影响

为更深入地研究跨中竖向构件同时失效对结构倒塌模式的影响,重力加载完成后在同一时刻将B轴线处的所有柱瞬间移除。

从图6与图11对比可以看出,同时移除B轴线处所有柱与仅移除B轴线处底层柱的情况相似,但AB跨梁的两端都出现了塑性铰,发展并不严重,最大转角与屈服转角比小于1.6,而且AB跨梁铰的出现大大减轻了BC跨梁上塑性铰的发展。从图12可以看出,相对仅仅移除底层柱移除B轴线处所有柱后,结构的竖向位移有所减少,移除B轴线处的底层柱后底层柱以上的柱某种程度上削弱了结构的抗连续倒塌能力。

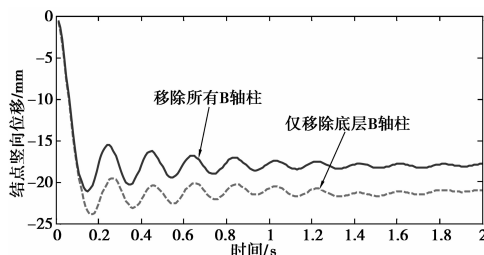


图12 移除B轴所有柱与移除柱B1结点竖向位移对比

### 3.4 失效时长对动力响应的影响

选取柱B1失效的工况,探讨构件失效时长对结构的动力响应的影响。在分析中,失效时长分别选取相应于移除单元后结构竖向第一自振周期( $T=0.218\text{ s}$ )的0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、1.0、1.5倍进行分析。结构的自振周期见表1。

由分析结果得知,随着失效时长的增大,结构的反应越来越逼近静力作用下的平衡位置。当失效时长小于 $0.2T$ 时,失效时长对结构的破坏模式和响应影响很小;当失效时

长大于  $0.4T$  时,结构的长跨没有塑性铰产生;当失效时长大于  $1.0T$  时,结构短跨的第五层梁端也没有塑性铰的产生。这基本上与结点竖向位移随失效时长的变化规律一致,失效时长的增加很大程度上削弱动力效应。当失效时长大于等于振动方向的自振周期时,结构响应的动力平衡位置跟响应的静力平衡位置基本一致,振动的幅值很小远远小于  $2$  倍的静力作用下的位移。

表 1 结构的自振周期

振动方向	移除单元后			移除单元前		
	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
Y	0.218	0.057	0.056	0.059	0.055	0.053
X	1.097	0.309	0.149	0.945	0.265	0.124

GSA 要求在进行竖向连续倒塌分析时,构件失效时长至少应该小于剩余结构的自振周期的  $1/10$ 。所谓的自振周期是侧向的自振周期还是竖向的自振周期? 如果自振周期指的是结构实际振动方向的周期,此时的研究对象是结构的竖向连续倒塌,自振周期指的是结构竖向的自振周期,由图 13 得知,失效时长为  $0.1T$  时结构的破坏模式和响应跟瞬间失效的情况基本一致,规范再给出一个限值,实际上已经没有意义,倒不如认为构件瞬间失效不考虑失效时长的影响。所以本文认为 GSA 中的自振周期是指结构整体的振动周期,这样结构的水平方向的自振周期是主要的。由表 1 可知,对于一根柱失效的情况,构件失效前后结构的整体振动周期改变并不大;而且 GSA 主要考虑的也是一个柱子失效的情况,从这个意义上,可以近似采用失效前完整结构的自振周期。以本文算例结构为例,完整结构整体自振周期为  $0.945\text{ s}$ ,当结构失效时长小于  $0.0945\text{ s}$  时,结构的动力响应很明显,而且跟瞬间失效之间还有一定的差距,这就给设计和分析者提供了一个可选的范围,很好地反映了规范的指导性作用而不是强制性作用。基于此,可得知 GSA 提供的构件失效时长至少应该小于剩余结构的自振周期的  $1/10$ 。剩余结构的自振周期指的是构件失效后的剩余结构整体主周期,但可用完整结构的周期来近似。

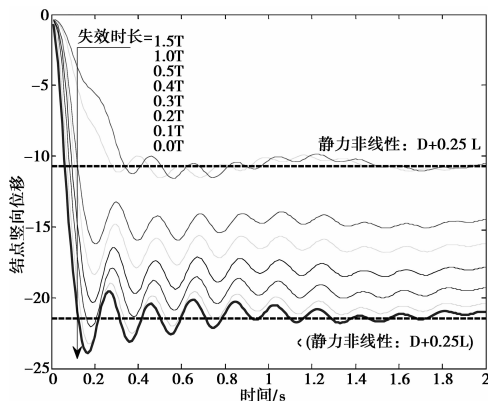


图 13 结点竖向位移随失效时长的变化

竖向非线性动力分析方法,对钢筋混凝土平面框架结构进行了竖向连续倒塌分析,直观地再现了某些构件失效后的剩余结构的响应情况,得到如下结论。

1) 将同一轴线不同楼层的框架柱分别移除时,结构仅在失效柱以上所有楼层的受损跨内发生破坏,并且失效柱以上同轴线的所有楼层的框架柱均失去承载功能,各层的运动状态也趋于一致,整个结构不发生连续倒塌。

2) 将同一轴线所有楼层的框架柱同时移除时,并不会导致结构的反应相对仅移除底层柱的反应削弱很多。

3) 剩余结构的反应量对构件的失效时长很敏感,随着失效时长的增加,结构的反应越来越接近静力平衡位置。

#### 参考文献:

- [1] Nair R S. Preventing disproportionate collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE. 2006, 20(4): 309-314.
- [2] Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE. 2006, 20(4): 315-323.
- [3] Ellingwood B R, Dusenberry D O. Building design for abnormal loads and progressive collapse[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2005, 20(3): 194-205.
- [4] Pearson C, Delatte N. Ronan Point apartment tower collapse and its effect on building codes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE. 2005, 19(2): 172-177.
- [5] England J, Agarwal J, Blockley D. The vulnerability of structures to unforeseen events[J]. Computers & Structures. 2008, 86(10): 1042-1051.
- [6] Gurley C. Progressive collapse and earthquake resistance[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE. 2008, 13(1): 19-23.
- [7] Kaewkulchai G, Williamson E B. Modeling the impact of failed members for progressive collapse analysis of frame structures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE. 2006, 20(4): 375-383.
- [8] Khandelwal K, El-Tawil S. Assessment of progressive collapse residual capacity using pushdown analysis. 2008, ASCE Structures Congress: Crossing Borders, Vancouver, BC, Canada.
- [9] Kim J K, Park J H. Design of steel moment frames considering progressive collapse[J]. Steel and Composite Structures. 8(1): 85-98.
- [10] General Services Administration (GSA). Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. USA, 2003.
- [11] Unified Facilities Criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse. Department of defense, USA, 2005.
- [12] 陆新征. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J]. 工程力学, 2008(25): 151-152.
- [13] Marjanishvili M. Progressive analysis procedure for progressive collapse. ASCE. 2004, 18(2): 81-83.
- [14] 陈志恒. 钢筋混凝土框架结构的倒塌失效模式、风险与鲁棒性分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.

## 4 结论

本文基于备用荷载路径原理,采用考虑构件失效时长的