

林健康,杨文伟,包超.竖向刚度不同的混合结构连续倒塌机制分析[J].地震工程学报,2018,40(4):713-720,840.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.713

LIN Jiankang, YANG Wenwei, BAO Chao. Progressive Collapse Mechanism of Hybrid Structures with Different Vertical Stiffness[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 713-720, 840. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.713

# 竖向刚度不同的混合结构连续倒塌机制分析

林健康, 杨文伟, 包超

(宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为了探究上部钢结构一下部混凝土结构这类竖向刚度不同的混合结构抗连续倒塌机制,利用拆除构件法,应用 ANSYS/LS-DYNA 对初始失效后的剩余结构进行非线性静力(Pushdown 方法)分析,研究其剩余结构的倒塌破坏模式、荷载变形关系,以及初始失效柱位置的不同和钢框架层数对结构抗连续倒塌性能的影响。结果表明:剩余结构的倒塌破坏模式带有典型的延性变形特征,且在倒塌过程中出现位移和应力分布不连续现象;除边柱失效后剩余结构的倒塌过程仅经历了梁机制外,其余剩余结构的倒塌过程均经历了梁机制、压拱机制和悬链线机制;剩余结构的竖向承载力与初始失效柱高度呈负相关,与钢框架层数呈正相关;为剩余结构提供足够的侧向约束作用以及提高结构冗余度和备用荷载路径数量,可以有效提高剩余结构的抗连续倒塌能力。

**关键词:** 竖向刚度不同; 混合结构; 连续倒塌; 非线性静力法

**中图分类号:** TU47; TU352.1+2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2018)04-0713-09

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.713

## Progressive Collapse Mechanism of Hybrid Structures with Different Vertical Stiffness

LIN Jiankang, YANG Wenwei, BAO Chao

(School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

**Abstract:** To investigate the antiprogressive collapse mechanism of hybrid structures with different vertical stiffness values, remaining structures with initial failure are subjected to nonlinear static analysis, also known as the Pushdown method, through the alternate path method with ANSYS/LS-DYNA. The collapse failure mode of remaining structures, the relationship between load and deformation, the influence of the different positions of the initial failure column, and the number of steel frame layers on the antiprogressive collapse performance of the structure are analyzed. Results show that the failure mode of the remaining structures during collapse is characterized by typical ductile deformation and discontinuous displacement and stress distribution. Only the collapse of the remaining structure with side column failure experiences the beam action

**收稿日期:** 2017-11-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51468054); 国家档案局科技项目(2017-X-43); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2016KJHM38); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BEG03009)

**第一作者简介:** 林健康(1993-), 男, 河南人, 在读硕士研究生, 主要从事新型结构抗震理论及减振控制分析。E-mail: linhealth@163.com。

**通信作者:** 杨文伟(1967-), 男, 宁夏海原人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新型结构抗震理论及应用研究。

E-mail: nxyangww@163.com。

mechanism. By contrast, all other remaining structures experience the beam action mechanism, compressive arch action, and catenary action. The vertical bearing capacity of the remaining structure is negatively correlated with the height of the initial failure column and is positively correlated with the number of steel frame layers. The antiprogressive collapse capability of the remaining structure can be effectively improved by providing sufficient lateral restraint and increasing the number of alternate load paths in the remaining structures.

**Keywords:** different vertical stiffness; hybrid structure; progressive collapse; Pushdown method

## 0 引言

连续性倒塌是指在正常条件下,由于突发事件(如撞击、爆炸、火灾、地震等)导致建筑结构局部构件破坏,这种损伤从结构初始破坏位置开始,沿着其他构件不断地传递和扩散,最终导致整个结构倒塌或者造成与初始破坏不成比例的倒塌<sup>[1]</sup>。由于自然灾害和突发事件的频繁性,建筑结构连续倒塌事故时有发生,如1968年Ronan Point公寓煤气爆炸倒塌事件、2001年9·11恐怖袭击倒塌事件以及2012年河北保定居民楼地下室爆炸倒塌事件等,使得建筑结构的连续性倒塌问题备受关注,成为学术界研究的热点。

国外学者对结构连续倒塌问题的研究起步较早并在理论、试验、仿真分析等方面取得了大量研究成果<sup>[2-5]</sup>,与此同时,许多欧美国家及地区也出台了相应的设计规范,如GSA 2003<sup>[6]</sup>、UFC2009<sup>[7]</sup>、DOD 2013<sup>[8]</sup>等对建筑结构抗连续倒塌的设计及注意事项进行了较为全面的阐述,为各国进行结构抗连续倒塌设计提供了参考。国内学者针对结构抗连续倒塌课题也进行了大量深入研究,胡晓斌等<sup>[9]</sup>利用ANSYS/LS-DYNA对底层柱失效的一榀多层钢框架进行了连续性倒塌分析,发现材料失效应变对剩余结构的抗连续倒塌能力有显著影响;易伟健等<sup>[10]</sup>提出一种拟静力试验方法并对一榀钢筋混凝土框架的抗连续倒塌机理进行试验研究;李易等<sup>[11]</sup>利用非线性静力Pushdown方法,对不同抗震设计防烈度下的钢筋混凝土非整体现浇板框架和整体现浇板框架的抗连续倒塌承载力进行了分析和对比;王少杰等<sup>[12]</sup>基于拆除构件法对一双层双向RC空间框架结构进行了拟静力倒塌试验,研究了底层边柱失效后剩余结构的竖向倒塌过程、倒塌机制和倒塌细节;于晓辉等<sup>[13]</sup>应用Open Sees建立可以考虑悬链线效应的RC框架宏模型,探讨了悬链线效应考虑是否对RC框架子结构抗连续倒塌性能有影响。

现有研究大都只是针对材料单一、形式规则的结构进行试验,而对于不规则结构,尤其是对上部钢结构一下部混凝土结构这类竖向刚度不同的混合结构抗连续倒塌研究还鲜有报道。由于该类结构上下部采用的材料不同,其刚度、质量均发生突变导致结构变形不连续,使得现有研究成果无法完全适用。因此,本文应用ANSYS/LS-DYNA对上述竖向刚度不同的混合结构进行非线性静力(Pushdown方法)分析,以探究其抗连续倒塌机制。

## 1 研究方法概述

### 1.1 理论基础

拆除构件法(又称变换路径法)是当前进行结构连续性倒塌分析的常用方法,该方法首先假定结构的某一个或多个主要承重构件失效,然后对剩余结构进行受力分析,进而判断其发生连续性倒塌的可能性。由于拆除构件法与引起建筑结构连续倒塌的初始破坏无关,所以此方法适用于各种偶然荷载作用下的结构倒塌分析<sup>[14]</sup>。根据是否考虑非线性和动力效应,拆除构件法又可分为线性静力分析、非线性静力分析、线性动力分析、非线性动力分析等。

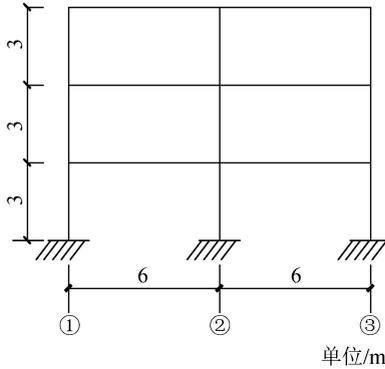
### 1.2 分析方法

非线性静力分析法又被称为Pushdown法,被广泛应用于对建筑结构抗连续倒塌性能的评估中<sup>[11]</sup>。该方法能够考虑材料的非线性和几何非线性,且能很好地反映结构弹性阶段、塑性阶段直至失效时的变形和承载力情况,并可以有效避免非线性动力分析方法在分析时不易准确获得结构承载能力和传力机制的变化以及耗时较多的问题<sup>[15]</sup>,故本文采用竖向加载的非线性静力法进行结构抗连续倒塌分析。其原理为:对发生初始失效后的剩余结构施加不断增加的竖向荷载力,直至剩余结构达到预定的破坏程度(竖向位移超限或者剩余结构倒塌),然后得到剩余结构荷载与位移响应的关系曲线(Pushdown曲线),进而对结构的抗倒塌性能进行有效评估。

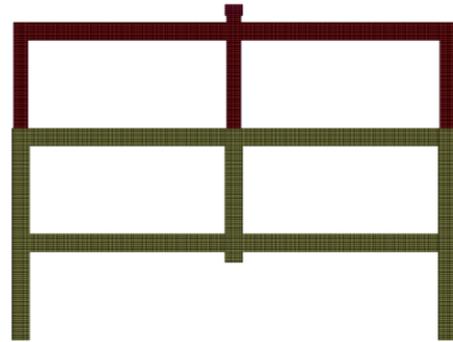
## 2 分析模型设计

### 2.1 模型概况

为了使结构形式简洁、减少计算时间,本文所选模型为忽略不重要的非结构构件的理想模型。研究对象为一个 3 层 2 跨平面框架,各层层高均为 3 m,各跨跨度均为 6 m,整个结构分为上下两个部分,其上部为钢框架结构,下部为钢筋混凝土框架结构,结



(a) 结构模型简图



(b) 有限元模型

图 1 结构模型图

Fig.1 Structural model

### 2.2 有限元分析模型

本文基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立有限元模型,其中型钢构件均采用 shell163 单元,钢柱与钢梁间的连接采用共节点的方式<sup>[16]</sup>;混凝土采用 solid164 单元,钢筋采用 beam161 单元,钢筋、混凝土采用分离式建模的方式,分析中未考虑钢筋和混凝土之间的相对滑移,采用共节点的方式模拟钢筋和混凝土之间的相互作用;通过定义关键字 \* CON-STRAINED\_NODAL\_RIGID\_BODY 来实现钢框架和钢筋混凝土框架之间的连接,使之一起运动<sup>[17]</sup>。特别的,为了防止施加荷载时出现应力集中问题,在加载柱头上方设置一个刚性加载块,通过关键字 \* MAT\_RIGID 实现。结构模型如图 1(b)所示。

### 2.3 材料模型

混凝土采用塑性损伤模型(MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3)<sup>[18]</sup>,是目前所有混凝土模型中最常用且能比较准确地表达混凝土的塑性和损伤的模型

之一,除应变率效应通过 K&C 模型<sup>[19]</sup>计算外,混凝土材料的其他参数由 LS-DYNA 自动生成,然后通过 k 文件进行修改,混凝土基本参数见表 1 所列。为了在几何模型中模拟混凝土破坏状态,定义失效准则 \* MAT\_ADD\_EROSION 设置失效主应变为 0.1<sup>[20]</sup>,当混凝土的应变大于设置值时删除该单元。

表 1 混凝土基本参数

Table 1 Basic parameters of concrete

密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\delta$	轴心抗压强度 $f_c$ /MPa
2 300	23	0.2	30

钢材(H 型钢、纵向钢筋和箍筋)采用随动强化双线性弹塑性模(MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC),其应变率通过 Cowper-Symonds 模型<sup>[18]</sup>考虑,钢材模型参数见表 2 所列,其中当等效塑性应变  $\epsilon^{\text{eff}}$  达到规定的极限值时,单元失效会被删除来模拟构件的破坏。

表 2 钢材材料参数

Table 2 Material parameters of steel

	密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\delta$	屈服强度 $f_y$ /MPa	剪切模量 $G$ /GPa	硬化 参数 $\beta$	常数		失效应变 $\epsilon^{\text{eff}}$
							$C$	$P$	
纵筋	7 800	210	0.3	335	2.0	0	40	5	0.12
箍筋	7 800	210	0.3	300	2.0	0	40	5	0.12
H 型钢	7 800	210	0.3	345	2.0	0	40	5	0.12

## 2.4 加载方式

隐式求解技术在对复杂模型进行分析时,需消耗大量的存储空间和求解时间,而采用显式求解技术可以有效解决上述问题提高计算效率。但 ANSYS/LS-DYNA 所采用的显式求解技术是一种动态求解过程,因此涉及到将显式动态求解过程应用于静力问题的准静态分析问题。樊建平等<sup>[21]</sup>基于显式求解技术,采用有限元软件对复杂结构进行准静态加载分析,得出在有限元数值分析中用显式求解技术模拟建筑结构的准静态加载是可行的;在此基础上,黄志辉等<sup>[22]</sup>对四种显式准静态加载方法进行讨论,得出在显示求解中使用正弦函数准静态加载方式效果较好,故本文采用正弦函数的加载方式施加竖向荷载,经多次模拟调整取正弦函数  $y = A \sin(T/\pi)$ ,图 2 所示为上述图 1 模型的加载曲线,其他模型通过调整幅值 A 来改变相应的加载曲线。

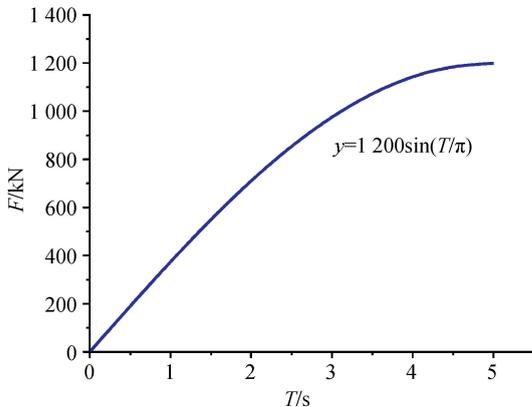


图 2 加载曲线

Fig.2 Loading curve

## 3 结构抗连续倒塌分析

### 3.1 破坏模式

在加载初期,首先在与失效柱相连的上部梁端受拉区混凝土发生开裂,随着竖向荷载的增加,下部各层钢筋混凝土框架梁端受拉区混凝土均出现开裂

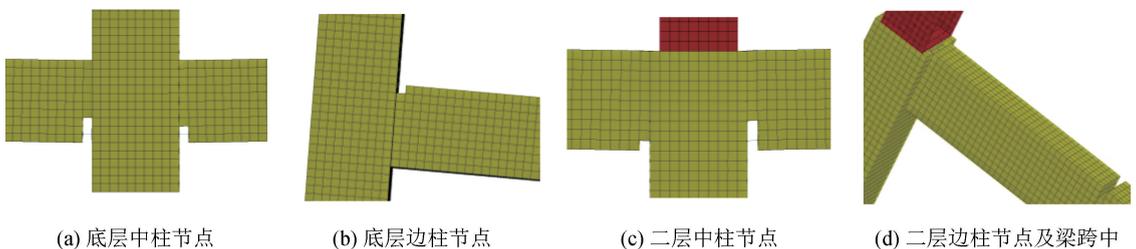


图 3 裂缝开展

Fig.3 Crack development

现象[如图 3(a)~(d)所示],且在二层框架梁跨中 1/3 处混凝土也发生开裂[如图 3(d)所示],此时受拉区钢筋开始发生屈服;而上部钢框架梁端仅发生轻微弯曲变形,无明显变化。受拉区钢筋发生屈服后,随着竖向荷载继续增加,下部钢筋混凝土框架梁端裂缝扩展迅速,梁端混凝土均出现较大裂缝;而在上部钢框架中,与中柱相连的梁端上翼缘有轻微压屈变形以及与钢梁相连的边柱腹板表面产生一定的塑性变形。在加载后期,剩余结构进入大变形阶段,随着荷载的增加,钢筋混凝土梁端受拉区钢筋发生径缩,当竖向荷载加载至 1 106.02 kN 时,大部分梁端受拉区钢筋出现断裂现象且受拉区混凝土出现严重损伤[如图 4(c)~(f)所示],受压区混凝土被压碎并剥落;而在上部钢框架中,与中柱相连的梁端上翼缘发生严重压屈破坏、下翼缘发生拉裂破坏[如图 4(a)所示],以及边柱腹板被拉裂[如图 4(b)所示],此时剩余结构备用荷载路径全部失效,整个结构的破坏出现明显的延性特征,结构局部损伤破坏见图 4,结构整体破坏见图 5。

图 5 为结构整体倒塌破坏图,从图中可以得出以下两点:

(1) 结构整体变形不连续,如图 5(a)所示在钢框架与钢筋混凝土框架连接点处水平位移不连续发生突变,在钢筋混凝土框架向内收缩时,上部钢框架有向外倾覆的现象。这是由于钢材的变形能力大于钢筋混凝土材料,故在水平内收量一定时,钢梁对边柱的内拉作用要小于钢筋混凝土梁对边柱的作用,所以钢筋混凝土边柱的内收量大于钢柱的内收量,正是这种相对量差,从而导致结构变形出现不连续现象。

(2) 结构应力分布不连续,如图 5(a)所示整体框架结构的应力主要分布于上部钢框架,而下部钢筋混凝土框架结构没有任何变化,但把各个框架结构的应力云图拿出来单独考虑会发现其均有应力分

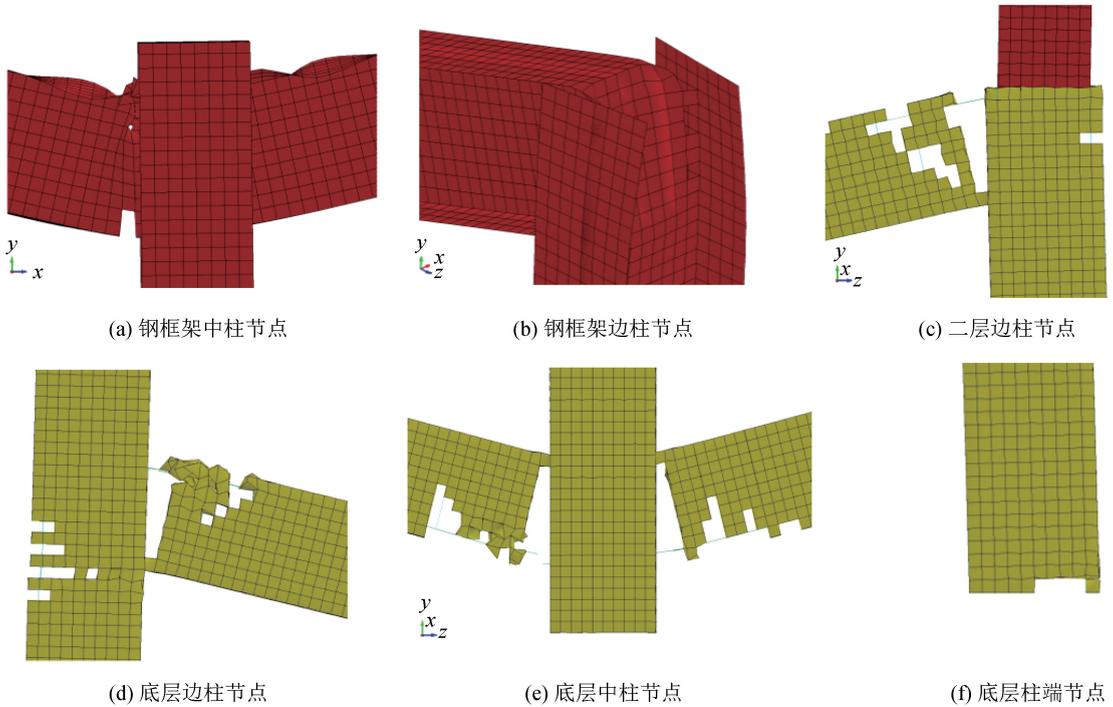


图 4 节点局部损伤破坏

Fig.4 Local damage of joints

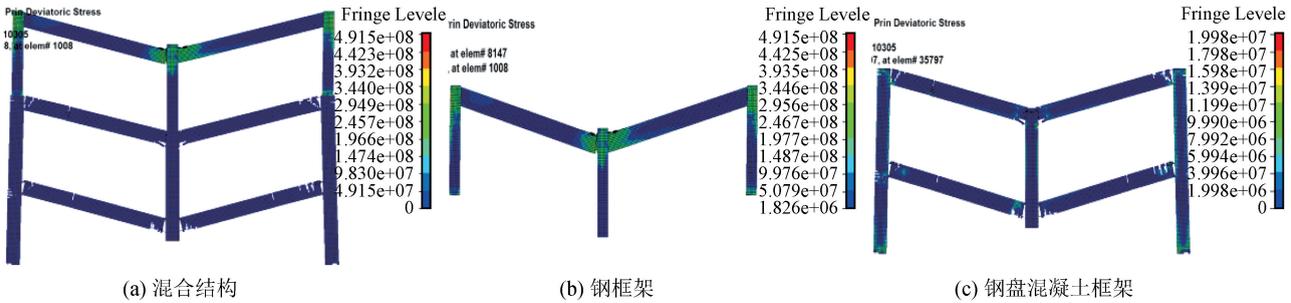


图 5 结构整体倒塌破坏

Fig.5 Overall collapse failure of the structure

布[如图 5(b)~(c)所示]。这是由于结构选用的材料不同,其力学性能也有所差异,故在同一荷载水平下各结构的应力水平不在一个量级,从而导致在整体结构中应力分布出现不连续现象。

### 3.2 剩余结构 Pushdown 曲线分析

对图 1(b)中模型进行非线性静力分析,得出其 Pushdown 曲线如图 6 所示,其中纵轴  $F$  表示施加于剩余结构的竖向荷载,横轴  $\Delta$  表示失效柱顶部节点竖向位移,同理下文中所有的 Pushdown 曲线坐标轴含义均相同,故不再赘述。从图中可以看出 Pushdown 曲线分为梁机制、压拱机制和悬链线机制三个阶段,其各阶段特征如下:

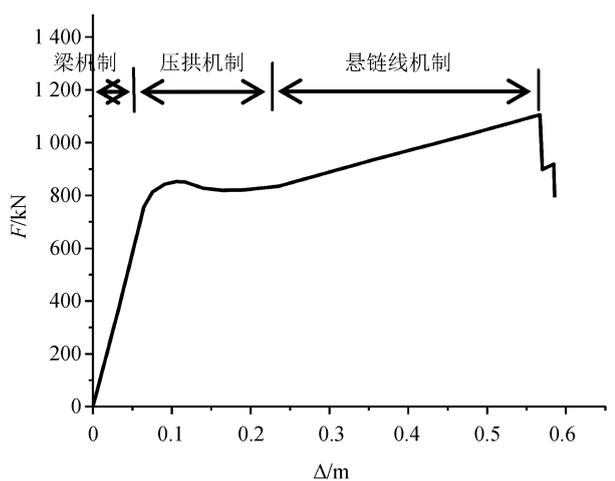


图 6 剩余结构 Pushdown 曲线

Fig.6 Pushdown curve of remaining structure

(1) 梁机制阶段,此阶段失效柱顶部节点竖向位移与竖向荷载呈线性增长关系,剩余结构梁端截

面均以受弯为主,轴力大小可忽略不计,随着荷载增加梁端受拉区混凝土截面开裂钢筋开始屈服,此时梁机制结束;

(2) 压拱机制阶段,当  $F = 756.12 \text{ kN}$ 、 $\Delta = 0.066 \text{ m}$  时剩余结构开始进入压拱机制阶段,此阶段失效柱顶部节点竖向位移与竖向荷载呈非线性关系,且竖向承载力出现先增大后减小现象,这是因为:①与中柱相连的梁端承受正弯矩,混凝土开裂后导致中和轴上移,与边柱相连的梁端承受负弯矩,混凝土开裂后导致中和轴下移,使梁处于压拱受力状态,这种现象称为压拱效应<sup>[23]</sup>,由于压拱效应的产生,剩余结构的竖向承载能力得到了一定程度的提高,竖向荷载达到压拱机制的峰值点,此时  $F = 852.7 \text{ kN}$ 、 $\Delta = 0.114 \text{ m}$ ;②当竖向荷载达到压拱机制的峰值点后,由于受压区混凝土开始局部压碎和钢梁端部上翼缘开始局部压屈,导致剩余结构竖向承载力开始减小,随着竖向变形增加,塑性铰区域受压混凝土发生严重压损破坏且与中柱相连的钢梁端部上翼缘发生较为严重的压屈,此时剩余结构梁截面开始从受压状态变为受拉状态,即压拱机制结束;

(3) 悬链线机制阶段,当  $F = 821.23 \text{ kN}$ 、 $\Delta = 0.238 \text{ m}$  时剩余结构开始进入悬链线机制阶段,此时剩余结构备用路径的承载力取决于受拉区钢筋和钢梁的抗拉强度,在此阶段曲线斜率再次增大,剩余结构的竖向承载力又再一次得到提高,这是由于悬链线机制的存在再一次提高了剩余结构的竖向承载力和变形能力,即抗倒塌能力。当  $F = 1\ 106.02 \text{ kN}$ 、 $\Delta = 0.567 \text{ m}$  时,剩余结构竖向承载力达到最大值,悬链线机制结束。

### 3.3 剩余结构水平侧移分析

图7为失效柱顶部节点竖向位移  $\Delta$  与底层边柱顶部水平位移  $\delta$  的关系曲线,其中  $\delta$  为负时,表示结构平面外侧移, $\delta$  为正时,表示结构平面内侧移。从图中可以看出,曲线分为外推阶段、内收阶段、倒塌阶段三个部分。对于外推阶段,其中  $A-B$  段竖向位移  $\Delta$  与底层边柱顶部水平位移  $\delta$  近似呈线性增长,这是由于压拱机制的作用,结构发生一定的平面外侧移,到达  $B$  点时  $\Delta = 238 \text{ mm}$ 、 $\delta = -6.24 \text{ mm}$ ,结构平面外侧移到达最大值;从  $B$  点开始,压拱机制结束剩余结构开始进入悬链线机制, $\delta$  开始从负的最大值向0过渡,到达  $C$  点时  $\Delta = 405 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0$ ,外推阶段结束;对于内收阶段,剩余结构仍处于悬链线机制,随着竖向位移  $\Delta$  的增加,底层边柱顶部水平位移  $\delta$  迅速增长,到达  $D$  点时  $\Delta = 567 \text{ mm}$ 、 $\delta =$

18.11 mm,结构平面内侧移到达最大值,内收阶段结束,即悬链线机制结束;对于倒塌阶段, $D$  点为剩余结构倒塌临界点,从  $D$  点开始剩余结构开始发生倒塌。

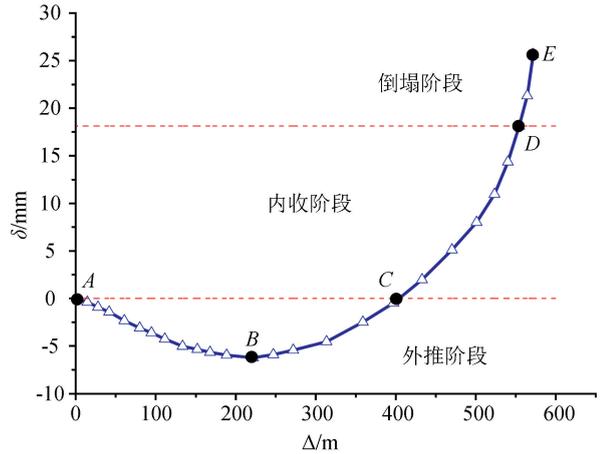


图7 底层柱顶水平位移与竖向位移关系曲线

Fig.7 Relation curve of horizontal displacement at the top of bottom column and vertical displacement

### 3.4 底层柱失效对剩余结构抗倒塌性能的影响

以底层中柱失效和底层边柱失效为研究对象,考查两种失效情况下对剩余结构抗连续倒塌性能的影响,其剩余结构的 Pushdown 曲线如图8所示。从图中可以看出,底层中柱失效后剩余结构的承载力大于底层边柱失效后剩余结构承载力。这是因为底层中柱失效后,上部框架梁除了能提供梁机制外还能提供压拱机制和悬链线机制,而底层边柱失效后,由于失效柱上部梁端缺少足够的侧向约束作用,上部框架梁不能提供压拱机制和悬链线机制,仅能

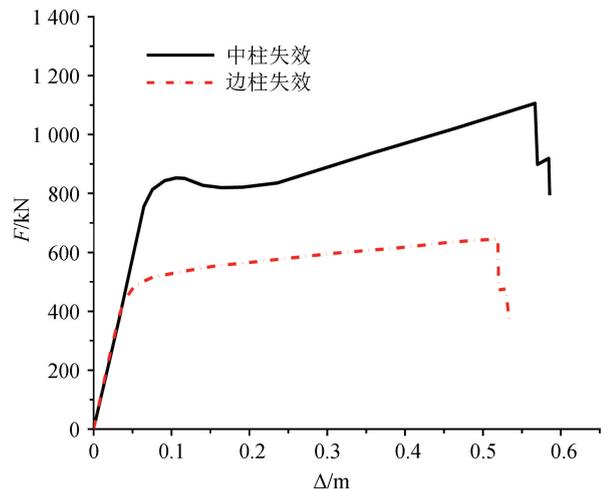


图8 底层不同柱失效的 Pushdown 曲线

Fig.8 Pushdown curves of failure of different columns at the first floor

提供梁机制,且悬链线机制的变形能力和承载能力均大于梁机制<sup>[24]</sup>,所以后者的承载能力小于前者,故说明边柱失效比中柱失效更加容易引起剩余结构发生连续倒塌。

### 3.5 不同层中柱失效对剩余结构抗倒塌性能的影响

以中柱失效为例,研究其在下部钢筋混凝土框架不同层处对剩余结构抗连续倒塌性能的影响,分别对中柱在底层失效和二层失效两种情况下的剩余结构进行非线性静力分析,得出其 Pushdown 曲线如图 9 所示。从图中可以得出,随着失效中柱位置的上升,剩余结构的承载力有所下降。这是因为虽然失效柱上部框架梁均能提供梁机制、压拱机制和悬链线机制,但是其上部参与剩余结构荷载传递的水平承重构件的数量有所不同,即备用荷载路径数量不同,所以其剩余结构承载能力也有所不同。故说明,其结构冗余度和备用荷载路径较少也会在一定程度上导致剩余结构承载力降低。

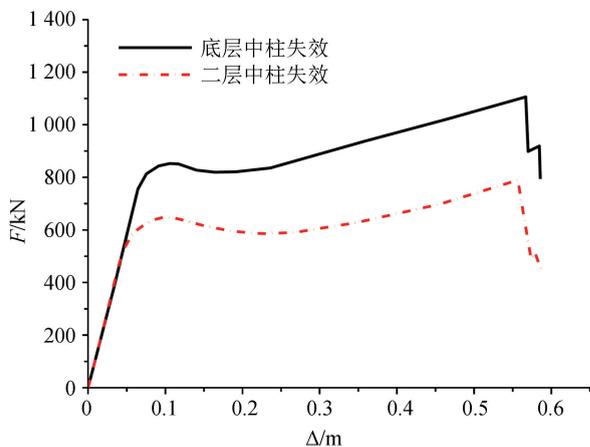


图 9 不同层中柱失效的 Pushdown 曲线  
Fig.9 Pushdown curves of failure of columns at different floors

### 3.6 上部钢框架层数对剩余结构抗倒塌性能的影响

以底层中柱失效为例,研究上部钢框架层数分别为 1、2、3 层情况下的剩余结构抗连续倒塌性能。分别对 3 种情况下的剩余结构进行非线性静力分析,得出其 Pushdown 曲线如下图 10 所示。从图中可以看出,随着上部钢框架层数的增加,剩余结构的承载力也得到明显的提高,这说明增加上部钢框架的层数可以在一定程度上提高剩余结构抗连续性倒塌的性能;剩余结构的承载力之所以会提高是因为随着上部钢框架层数的增加,参与剩余结构荷载传递的水平承重构件的数量也在增加,即备用荷载路

径数量在增加,所以剩余结构的承载力才得以提高,这也正好证明了提高结构冗余度和备用荷载路径数量能提高剩余结构抗连续倒塌能力。

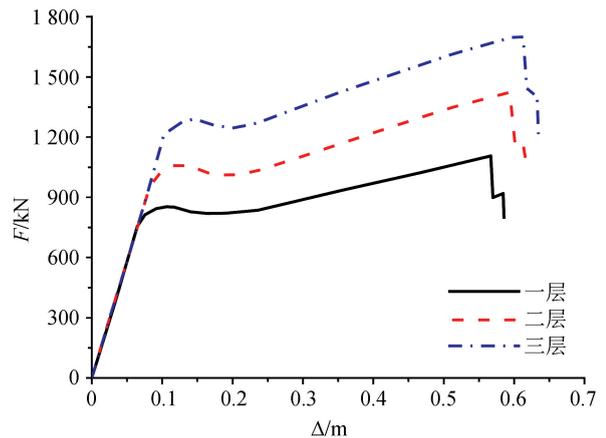


图 10 不同钢框架层数的 Pushdown 曲线

Fig.10 Pushdown curves of different steel frame layers

## 4 结论

本文利用非线性静力 Pushdown 法对竖向刚度不同的混合结构进行抗连续倒塌分析,得出如下主要结论:

(1) 剩余结构的最终破坏模式为下部钢筋混凝土框架中大部分梁端受拉区钢筋出现断裂且受拉区混凝土损伤严重,受压区混凝土被压碎并剥落;上部钢框架中与中柱相连的梁端上翼缘发生严重屈服破坏且梁端下翼缘出现一定程度的拉裂破坏,而与钢梁相连的边柱腹板也出现拉裂现象,剩余结构的破坏模式带有典型的延性变形特征。

(2) 由于钢-混凝土混合结构上下部分所采用的材料不同,从而导致整个建筑结构在倒塌过程中出现结构整体变形和结构应力分布不连续现象。

(3) 从剩余结构的 Pushdown 曲线可以得出,剩余结构的倒塌过程可分为梁机制、压拱机制和悬链线机制 3 个阶段,由于压拱机制和悬链线机制的存在,剩余结构在经历了梁机制后,其竖向承载力又得到了一定程度的提高。从框架侧移的变化情况来看,可将剩余结构倒塌过程主要分为外推阶段和内收阶段,其外推阶段中结构平面外侧移峰值点为压拱机制结束点,其内收阶段终点为悬链线机制结束点。

(4) 底层边柱失效比底层中柱失效更容易发生倒塌;而对于中柱失效后:随着失效中柱所处高度的

上升,剩余结构的竖向承载力有所下降,随着上部钢框架层数的增加,剩余结构的竖向承载力逐渐增大;为失效柱上部梁端提供足够的侧向约束作用,有利于剩余结构发挥压拱机制和悬链线机制,增加剩余结构冗余度和备用荷载路径数量均能有效提高剩余结构的抗连续倒塌能力。

## 参考文献(References)

- [1] Minimum Design Loads for Structures; ASCE 7-05[S]. Rseton Virginia; American Society of Civil Engineers, 2006.
- [2] PEARSON C, DELATTE N. Ronan Point Apartment Tower Collapse and Its Effect on Building Codes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172-177.
- [3] MARJANISHVILI S, AGNEW E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 365-374.
- [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 Structural Journal, 2008, 105(4): 433.
- [5] ADNAN A B, FARIDMEHR I, FARAMANBORDAR B, et al. Assessment the Behavior of Seismic Designed Steel Moment Frames Subjected to Progressive Collapse[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014, 7(10): 2135-2144.
- [6] GSA 2003. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S]. USA; General Services Administration, 2003.
- [7] UCF 4-023-03. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. USA; Department of Defense, 2005.
- [8] Design of Structures to Resist Progressive Collapse; DOD 2013[S]. Washing DC; Department of Defense, 2013.
- [9] 胡晓斌, 钱稼茹. 单层平面钢框架连续倒塌动力效应分析[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 38-43.  
HU Xiaobin, QIAN Jiaru. Dynamic Effect Analysis During Progressive Collapse of a Single-story Steel Plane Frame[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 38-43.
- [10] 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, 2007, 28(5): 104-109.  
YI Weijian, HE Qingfeng, XIAO Yan. Collapse Performance of RC Frame Structure[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104-109.
- [11] 李易, 陆新征, 叶列平, 等. 基于 Pushdown 分析的 RC 框架抗连续倒塌承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 10-18.  
LI Yi, LU Xinzheng, YE Lieping, et al. Study on Progressive-collapse Resistance Capacity of RC Frame Structures Based on Pushdown Analysis[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(1): 10-18.
- [12] 王少杰, 刘福胜, 徐赵东. RC 空间框架结构竖向倒塌全过程试验研究与理论分析[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 162-167.  
WANG Shaojie, LIU Fusheng, XU Zhaodong. Experimental and Theoretical Analysis on Entire Course of Vertical Progressive Collapse of RC Spatial Frame Structures[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5): 162-167.
- [13] 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 Xiaohui, QIAN Kai, LÜ Dagang. Progressive Collapse Capacity Analysis of Reinforced Concrete Frame Structure Considering Catenary Effect[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 28-34.
- [14] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析改变路径法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 8-13.  
HU Xiaobin, QIAN Jiaru. Study on Alternate Path Method of Structural Progressive Collapse Analysis[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(4): 8-13.
- [15] 宋子龙, 王文达, 王景玄, 等. 基于 Pushdown 方法的圆钢管混凝土柱-钢梁框架抗连续倒塌机制分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 123-132.  
SONG Zilong, WANG Wenda, WANG Jingxuan, et al. Progressive Collapse-resistance Mechanism Analysis of Composite Frame with CFST Columns and Steel Beams Based on Pushdown Method[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 123-132.
- [16] 丁阳, 汪明, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢框架结构连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 78-84.  
DING Yang, WANG Ming, LI Zhongxian. Numerical Analysis on Damage and Collapse Process of Steel Frame Structures under Blast Loads[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 78-84.
- [17] 尚晓江, 苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
SHANG Xiaojiang, SU Jianyu. ANSYS/LS-DYNA Dynamic Analysis Method and Engineering Example (Second Edition) [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.
- [18] HALLQUIST J O. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2012.
- [19] 程小卫, 李易, 陆新征, 等. 基于多尺度模型的 RC 框架撞击倒塌响应数值分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 82-88, 114.  
CHENG Xiaowei, LI Yi, LU Xinzheng, et al. Numerical Analysis for Collapse Response of a RC Frame Subjected to Impact Loading Base on Multi-scale Model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 82-88, 114.
- [20] 孟一. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的试验及数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. (下转第 840 页)

of Science and Technology, 2017, 33(4): 92-96.

- [14] HIMOTO K, SUZUKI K. Probabilistic Fire Risk Assessment of a Mid-Rise or High-rise Building with Fire Safety Equipment Systems Damaged by Seismic Shaking[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 81(728): 855-863.
- [15] 陈长云, 贺建明, 巴颜喀拉块体东部及邻区块体边界断裂变形

特征及其强震危险性分析[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(3): 448-462.

CHEN Changyun, HE Jianming. Seismic Risk and Deformation Characteristics of the Boundary Faults in the Eastern Bayan Har Block and its Adjacent Regions[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(3): 448-462.

\*\*\*\*\*  
(上接第 720 页)

MENG Yi. Experiment and Numerical Simulation Study on Reinforced Concrete Beam under Impact Loading[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

- [21] 樊建平, 章建军, 陈传尧. 用显格式技术对复杂结构准静态加载的有限元模拟[J]. 计算力学学报, 2002, 19(4): 431-437.
- FAN Jianping, ZHANG Jianjun, CHEN Chuanyao. Finite Element Simulation of Quasi-static Loading of Complex Structures by Explicit Technique[J]. Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(4): 431-437.
- [22] 黄志辉, 陈盛钊, 柏友运. 显式准静态几种加载方法的讨论[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 122-125.
- HUANG Zhihui, CHEN Shengzhao, BAI Youyun. Discussion of Explicit Quasi-static Loading Method[J]. Journal of Wuhan

University of Technology, 2011, 33(6): 122-125.

- [23] 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 Xianglin, LIN Feng. Vertical Bearing Capacity of RC Two-bay Beams Considering Compressive Arch Action[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 32-42.
- [24] 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 Xinzheng, YE Lieping. 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.