

基于 OpenSees 的钢筋混凝土平面框架 抗连续倒塌能力分析

易伟建[†], 邓茜

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 采用 Pushdown 方法对移除柱后的钢筋混凝土平面框架进行抗连续倒塌能力分析. 探究楼层层数对结构抗连续倒塌承载力的影响以及移柱后结构的空腹桁架效应, 同时提出一种计算移柱后钢筋混凝土框架结构体系可靠度的方法. 通过对约束梁、单层平面框架和多层平面框架的拟静力试验进行模拟, 验证基于 OpenSees 建立的有限元模型的正确性. 分别对 2 层、4 层、6 层及 8 层的 4 跨钢筋混凝土平面框架进行分析, 得到其 Pushdown 曲线及框架梁轴力曲线, 通过 Pushdown 曲线计算承载力放大系数, 利用框架梁钢筋应变的相对大小设定框架梁层间相关性. 结果表明: 随着楼层的增加, 单层平均承载力降低, 结构体系连续倒塌概率增大.

关键词: 非线性静力方法(Pushdown); 连续倒塌; 平面框架; 空腹桁架作用

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

Analysis of Progressive Collapse Resistance Capability of Reinforced Concrete Plane Frames Based on OpenSees

YI Weijian[†], DENG Qian

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The progressive collapse resistance of reinforced concrete plane frames removed post column was analyzed based on Pushdown method. The effect of the floor layers on the progressive collapse resistance capacity and the vierendeel action of the damage structure was investigated. At the same time, a method for calculating the system reliability of the reinforced concrete frame structure removed post column was proposed. By simulating static test of constrained beam, single-layer plane frame and multi-layer plane frame, the correctness of the finite element model based on OpenSees was verified. The 2, 4, 6 and 8-layer reinforced concrete frames were analyzed, and the Pushdown curve and the frame beam axis force curve were obtained. The bearing capacity enlargement coefficient was calculated by the Pushdown curve, and the correlation between the frame beams was set by the relative size of the strain of the frame beam. The results show that with the increase of storey, the average bearing capacity of single story decreases, and the probability of progressive collapse of structural system increases.

Key words: Pushdown; progressive collapse; plane frame; vierendeel action

* 收稿日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51338004), National Natural Science Foundation of China(51338004)

作者简介: 易伟建(1954—), 男, 湖南黔阳人, 湖南大学教授, 工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: wjyi@hnu.edu.cn

1968年Ronan Point公寓由于18层发生燃气爆炸造成结构的一部分整体垮塌,自此结构的抗连续倒塌开始引起工程界的关注.所谓连续倒塌破坏,是指由于偶然荷载使结构产生局部破坏,并且局部破坏向结构其他部位扩展而引起结构的大范围倒塌或整体倒塌^[1].50年来,国内外学者对钢筋混凝土框架结构的抗连续倒塌能力进行了大量试验与理论研究.如:Yu^[2]以及初明进等^[3]通过双跨梁对子结构的压拱机制和悬链线机制进行研究;易伟建等^[4]对缩尺框架结构进行抗连续倒塌试验研究;Sasani等^[5-6]对框架抗连续倒塌空腹桁架作用进行研究;李易等^[7-8]通过能量法对结构抗连续倒塌进行抗力需求分析;周育洸等^[9]提出了压拱机制计算模型等.

Pushdown分析与结构抗震中常采用的Pushover分析相似.Pushover分析主要针对结构侧向倒塌,而Pushdown分析主要针对结构竖向倒塌,在结构上逐渐加大竖向荷载,直到结构发生竖向倒塌,通过其荷载-位移曲线研究结构的竖向倒塌机制及竖向极限承载力.

本文采用有限元软件对钢筋混凝土(RC)框架结构进行非线性静力Pushdown分析,研究了RC框架结构的竖向倒塌机制承载力的变化以及损伤结构的空腹桁架效应,同时提出一种新的计算结构体系可靠度的方法.

1 OpenSees分析模型

选用OpenSees(OpenSystem for Earthquake Engineering Simulation)开源有限元软件进行数值分析,其具有强大的非线性模拟功能、丰富的材料库与单元库、开放的源代码以及多种高效的算法.本文选用Concrete02、Steel02材料,Beam With Hinges单元对框架结构进行模拟.

1.1 混凝土本构模型

混凝土选用Concrete02模型(修正的Kent-Park^[10]模型).该模型考虑了裂缝间混凝土的受拉强化作用,通过调整混凝土受压曲线的峰值应力应变和受压软化的斜率来考虑箍筋的横向约束作用.Concrete02本构模型的特点是能够较好地获得数值模拟的简化与精确之间的平衡.

1.2 钢筋本构模型

钢筋选用Steel02模型.该模型由Menegotto和Pinto^[11]提出,后经Spacone^[12]等修正.Steel02模型考

虑了钢筋等向应变硬化,并采用显函数表达应变,因此Steel02在计算上非常有效率.Steel02本构模型的特点是计算的高效性和准确性.

1.3 截面模型

截面模型选用纤维模型(Fiber Model),纤维模型是按一定的尺寸把钢筋混凝土梁、柱构件横截面分割成一定数目的离散纤维,每根纤维的力学特性用混凝土、钢筋的应力应变曲线分别表示.纤维模型的使用满足一定的假定,同时考虑了轴力与弯曲的耦合作用.纤维模型的特点是物理概念明确,对材料的真实反映,保证分析结构的可靠性.

1.4 单元模型

单元模型采用Beam With Hinges单元模型.Beam With Hinges单元的理论基础是有限单元法柔度理论,此单元模型是一种较为精细的塑性铰单元模型,构件的两端设定长度合理的塑性铰,通过Gauss-Radau积分模拟分析构件的非线性反应,而构件中间区段依然处于弹性阶段.

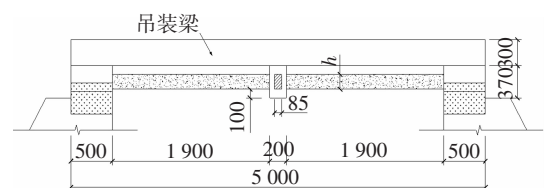
构件进入大挠度阶段,OpenSees基于协同转动方法(Corotational Transformation)^[13]进行分析,计算构件的大位移大转角.分析过程中设定单元节点达到某一特定位移表示单元失效,单元模型不考虑钢筋滑移效应.

2 试验验证

为了验证OpenSees对钢筋混凝土连续倒塌机制模拟的准确性,本文分别从梁构件、单层平面框架及多层平面框架层面对试验结果进行数值模拟.

2.1 梁构件试验对比

2015年周育洸等人完成了8个钢筋混凝土单向楼板子结构的抗连续倒塌试验,研究了截面尺寸、配筋率和有无楼板等参数对梁板子结构连续倒塌承载能力的影响^[3].本文的分析未考虑楼板作用,因此选取文献[3]中不带楼板的B2和B3子结构进行数值模拟.试件几何尺寸及截面配筋如图1所示,具体材料性能参数见文献[3],数值模拟与试验的对比如图2所示.



(a) 试件尺寸

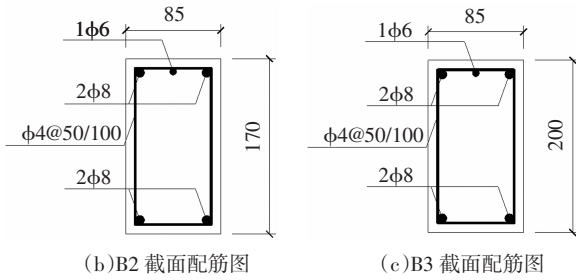
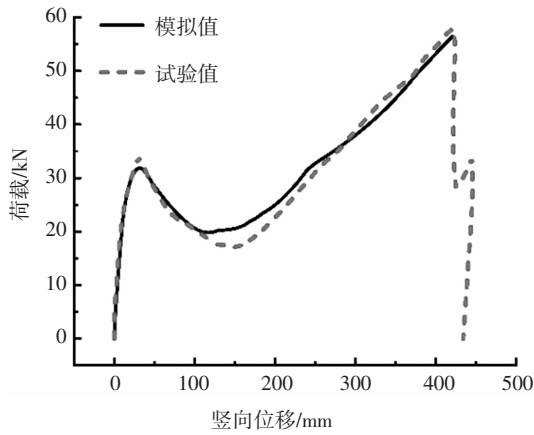
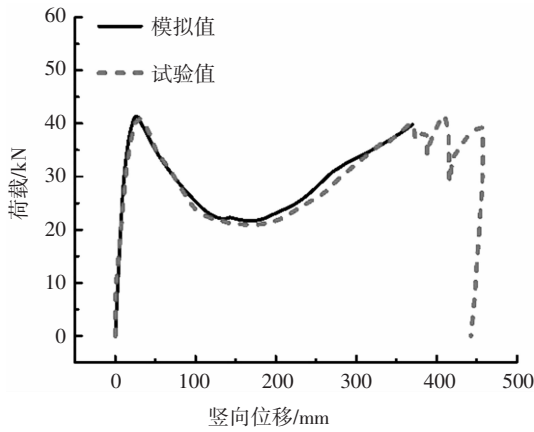


图 1 试件几何尺寸及截面配筋

Fig.1 Geometrical dimension and section reinforcement



(a) B2子结构



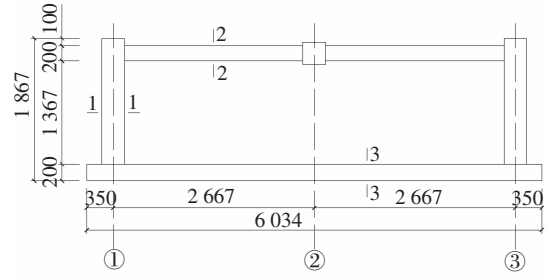
(b) B3子结构

图 2 梁荷载-位移曲线模拟与试验对比

Fig.2 Simulation and experiment comparison of beam load-displacement curve

2.2 单层平面框架试验对比

2015 年何庆峰等人完成了两榀两跨单层平面框架试验,研究了局部构件失效后的钢筋混凝土平面框架结构抗连续倒塌性能^[14].本文选取其中静力试验的平面框架进行数值模拟.试验框架尺寸及截面配筋如图 3 所示,具体材料性能参数见文献^[14],数值模拟与试验的对比如图 4 所示.



(a) 试验框架尺寸

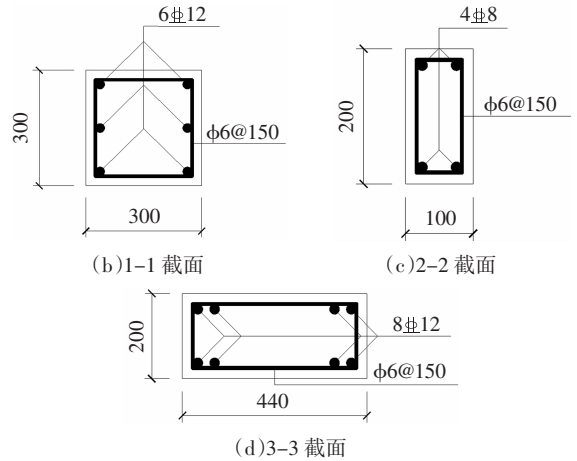
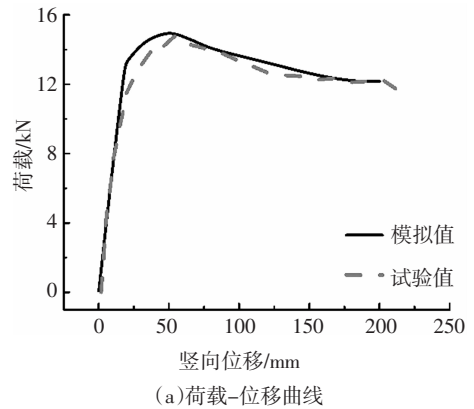
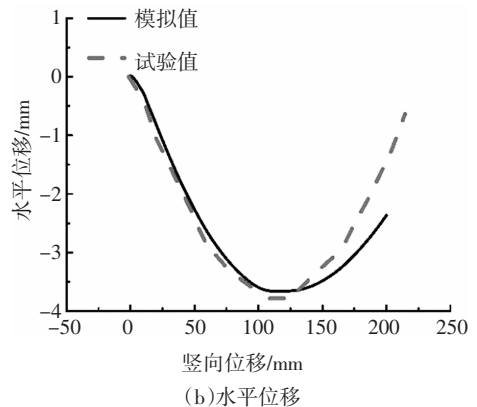


图 3 试验框架尺寸及截面配筋

Fig.3 Geometrical dimension and section reinforcement



(a) 荷载-位移曲线



(b) 水平位移

图 4 单层框架模拟与试验对比

Fig.4 Simulation and experiment comparison of single-layer frame

2.3 多层平面框架试验对比

2007年易伟建、何庆峰等人采用拟静力试验方法完成了三层四跨平面钢筋混凝土框架结构的抗倒塌性能试验,研究了框架结构在倒塌过程中的静力特性、破坏过程和受力特性^[4].本文采用前文所述的模型对其进行数值模拟分析.试件受力简图及截面配筋如图5所示,具体材料性能参数见文献[4],数值模拟与试验的对比如图6所示.

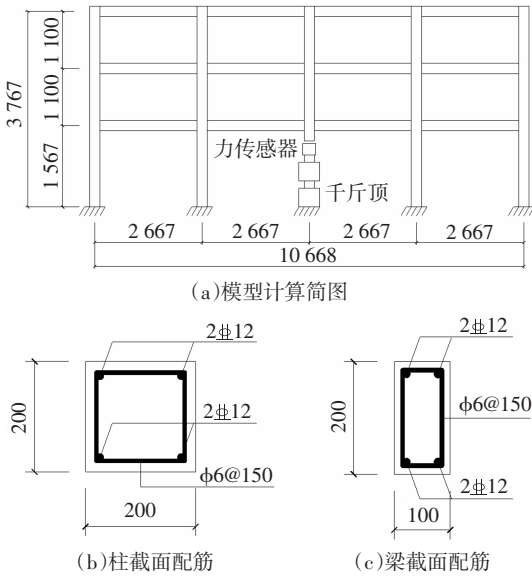


图5 试验计算简图及截面配筋

Fig.5 Test calculation diagram and section reinforcement

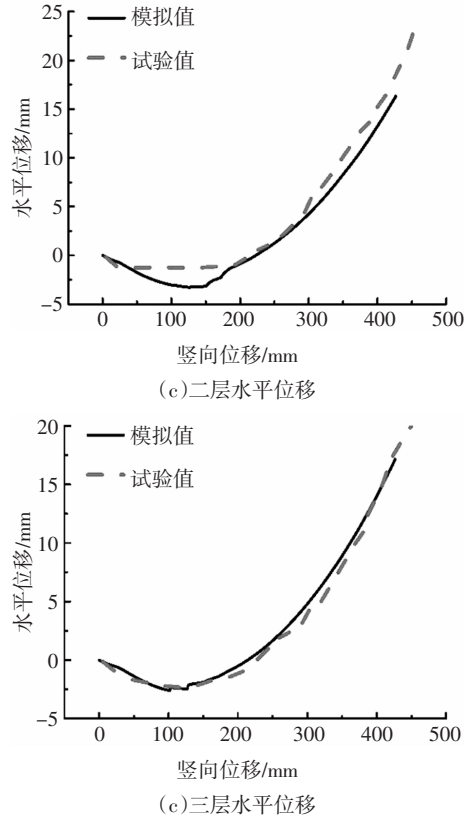
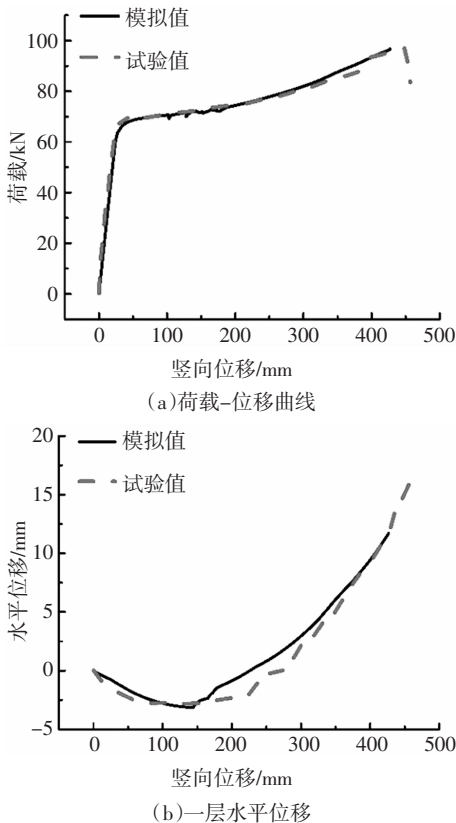


图6 三层框架模拟与试验对比

Fig.6 Simulation and experiment comparison of three-layer frame

2.4 分析结果的讨论

从图2、图4、图6可看出,本文建立的有限元模型能较好地模拟移柱后框架结构连续倒塌的过程.图2所示的曲线反映了两端水平位移受到约束的梁的压拱机制、转换机制以及悬链线机制;图4所示曲线以塑性铰机制为主.图6所示框架结构对移柱后结构可提供一定的约束,竖向位移和水平位移曲线都反映了有限的压拱机制和悬索机制.有限元分析结果与试验曲线良好吻合表明,可以采用本文建立的 OpenSees 有限元模型对钢筋混凝土平面框架抗连续倒塌性能进行进一步研究.

3 RC 框架连续倒塌分析

3.1 设计模型

按照现行规范^[15]设计一栋多层 n 榀 4 跨钢筋混凝土框架,结构平面图如图7所示.结构参数如下:结构底层层高为 4.7 m,其余层高为 3.3 m,横向跨度各为 8 m,纵向跨度各为 6 m,柱截面为 600 mm×600 mm,梁截面为 300 mm×600 mm.恒荷载标

准值取 3 kN/m^2 ,活荷载标准值取 2 kN/m^2 ,按照双向板导荷方式计算沿梁长分布的线荷载,即恒荷载为 13.88 kN/m ,活荷载取 9.25 kN/m .混凝土强度等级为 C30,钢筋等级为 HRB400,箍筋等级为 HPB300,结构配筋图如图 8 所示.取其中一榀框架做平面框架分析,为了研究结构楼层变化对连续倒塌承载力的影响,不改变构件尺寸及配筋,分别建立 2 层、4 层、6 层、8 层框架模型.

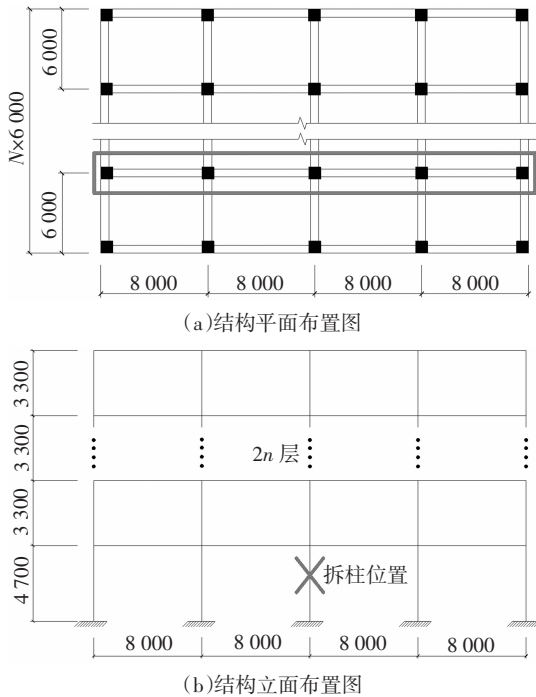


图 7 结构平立面布置图

Fig.7 Structure plan

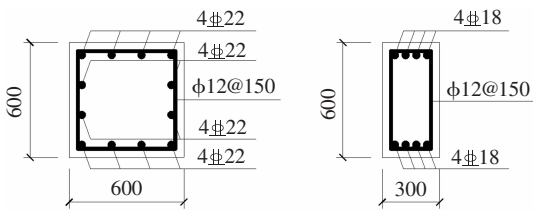


图 8 梁柱截面配筋图

Fig.8 Reinforcement diagram of beam-column section

3.2 非线性静力 Pushdown 分析

本文选用 Khandelwal^[16]等建议的 Pushdown 分析加载模式进行加载:满跨加载,即在结构的每一跨包括非损伤跨内均匀地增加竖向荷载.通过 Pushdown 方法分析移除中柱后框架结构楼层数对结构抗连续倒塌承载力的影响以及验证空腹梁作用的影响.

在 Pushdown 分析过程中考虑实际构件变形能力的限制,参考 DoD 2013^[17]的规定,将框架梁失效

准则设定为:拆除柱所在支承节点的竖向位移达到与节点连接的最短梁跨度的 18%,即 $0.18l$.

3.3 不同层数框架结构承载力分析

图 9 给出了不同层数框架结构在中柱移除后的 Pushdown 曲线.从图中可看出,不同楼层数的框架移柱后的荷载-挠度曲线相差不大,压拱机制不十分明显.2 层框架移柱后的荷载-位移曲线表现出一定的压拱机制、转换机制以及悬链线机制.图 10 给出了不同楼层框架结构梁轴力的变化情况.不同楼层框架结构对应的结构压拱机制承载力和悬链线机制承载力计算见表 1.

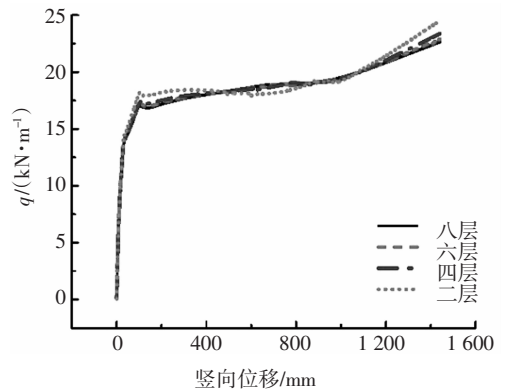
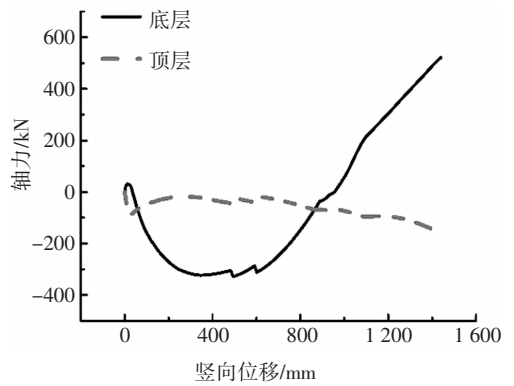
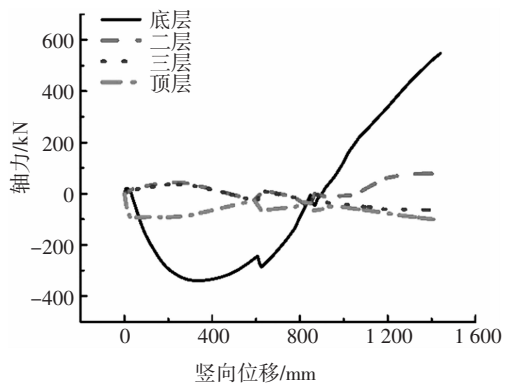


图 9 不同层数荷载-位移曲线

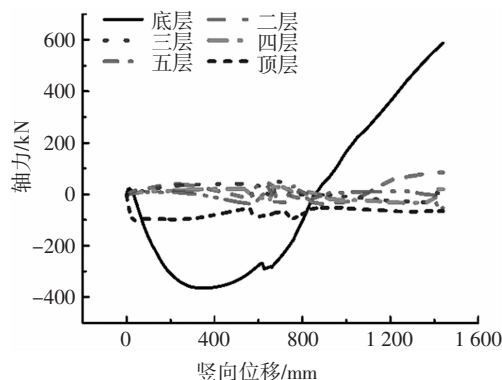
Fig.9 Load-displacement curve of different layers



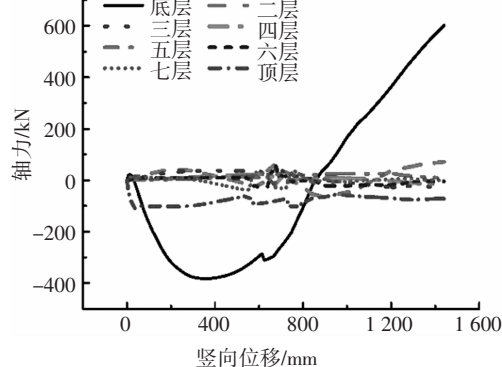
(a) 2 层框架



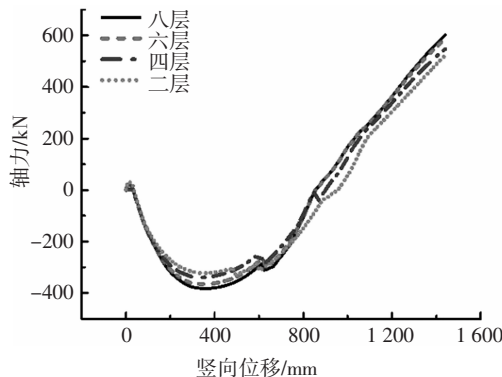
(b) 4 层框架



(c) 6层框架



(d) 8层框架



(e) 各框架底层梁轴力对比图

图 10 不同层数框架梁轴力-位移图

Fig.10 Frame-beam axial force-displacement diagram of different layers

表 1 不同楼层平面框架承载力计算结果

Tab.1 Calculation results of bearing capacity of different floor plane frames

结构层数	压拱机制		悬链线机制	
	竖向位移 /mm	承载力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	竖向位移 /mm	承载力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
2层	329.7	18.42	1 440	24.49
4层	336.0	18.00	1 440	23.37
6层	351.2	17.91	1 440	22.88
8层	356.9	17.87	1 440	22.63

图 9 及表 1 均表明随着楼层的增加,压拱机制和悬链线机制承载力均有所降低. 在压拱机制阶段,框架梁中轴压力的存在能显著提高梁的承载力. 在多层框架结构中,只有轴压力大的楼层才能获得更大的压拱承载力. 如图 10 所示,随着楼层层数的增加,有较大轴压力的楼层层数并未相应地增加,同时移柱位置上方框架梁中轴压力值也没有大幅度增加,因此由于轴压力产生的压拱承载力随着楼层的增加被不断稀释,导致这一阶段单层平均承载力不断减小. 在悬链线机制阶段,移柱后底层梁的轴力由受压变为受拉. 从图 10 也可看出,框架顶层梁始终受压,悬链线机制将导致底层梁产生轴向拉力,移柱上方第二层梁也产生轴拉力,越往上走,内力的转化越滞后. 因此与压拱机制阶段类似,随着楼层层数的增加,单层平均悬链线机制承载力也降低.

3.4 拆除不同楼层位置中柱框架结构承载力分析

对 8 层平面框架结构进行拆除中柱分析,分别拆除结构的第 1 层、第 3 层、第 5 层、第 7 层中柱,图 11 显示了各框架结构的 Pushdown 曲线. 图中第 X 层表示 8 层框架结构中拆除第 X 层的中柱后框架结构的 Pushdown 曲线. 图 12 给出了拆除不同楼层位置中柱框架结构梁轴力的变化情况. 拆除不同楼层中柱的框架结构对应的压拱机制承载力和悬链线机制承载力计算见表 2.

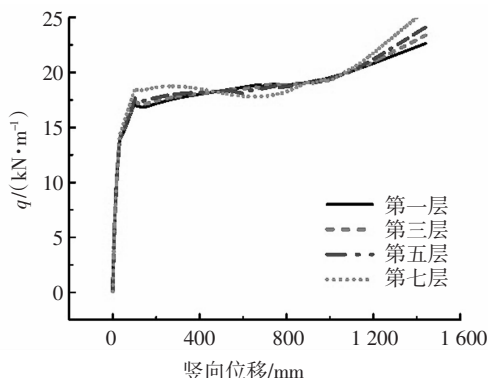
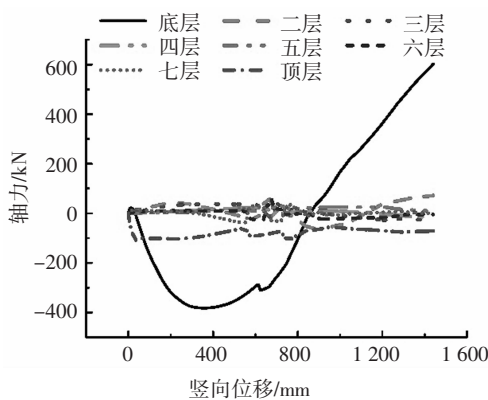


图 11 不同移柱位置荷载-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curve with column with different layers being removed



(a) 拆除一层中柱

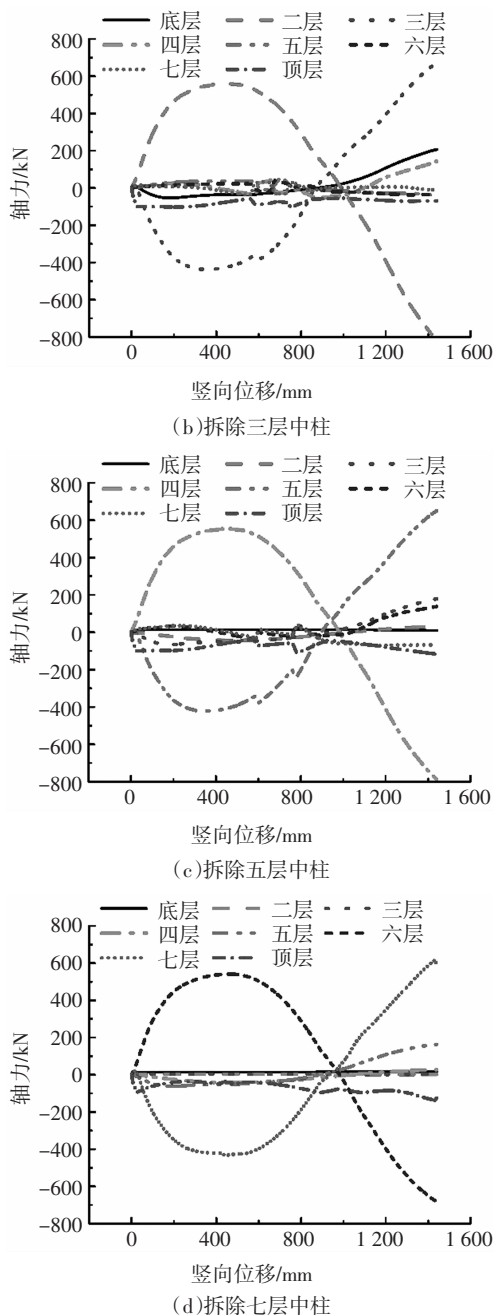


图 12 不同移柱位置框架梁轴力-位移图

Fig.12 Frame-beam axial force-displacement diagram with column of different layers being removed

表 2 拆除不同楼层中柱平面框架承载力计算结果

Tab.2 Calculation results of bearing capacity of plane frames with demolition of columns in different floors

拆除楼层	压拱机制		悬链线机制	
	竖向位移 /mm	承载力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	竖向位移 /mm	承载力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
第 1 层	356.9	17.87	1 440	22.63
第 3 层	360.8	17.99	1 440	23.37
第 5 层	349.2	18.13	1 440	24.10
第 7 层	261.6	18.75	1 440	25.17

从图 11 及表 2 可看出, 拆除不同楼层中柱的框架结构的承载力变化规律与楼层层数不同拆除底层中柱的框架结构 Pushdown 曲线相似. 拆除第 7 层中柱后框架结构的荷载-挠度曲线表现出明显的压拱机制以及悬链线机制. 拆除其余楼层的中柱, 压拱机制并不十分明显, 且拆除中柱所在层数越低, 压拱机制越不明显. 随着拆除中柱所在层数的逐渐降低, 框架结构的压拱机制承载力和悬链线机制承载力也逐渐减小.

3.5 空腹梁作用

图 10 以及图 12 显示了框架梁在整个 Push-down 过程中梁轴力的变化情况, 在压拱机制阶段 (位移不大于 400 mm), 顶层梁和紧挨移除柱的上层梁轴力均为压力; 进入悬链线阶段 (位移大于 900 mm) 后, 顶层梁轴力仍保持为压力, 而紧挨移除柱的上层梁轴力由受压转化为受拉. 中间各层框架梁内力在一个较小的范围内随位移变化而波动. 移除柱的上两层梁的轴力始终为拉力, 临近破坏时增长稍快. 移除柱的框架部分空腹梁作用表现为: 顶层和紧挨移除柱的上层梁相当于空腹梁的受压区和受拉区, 中间各层接近中性轴. 空腹作用实际上也反映了楼层间的轴力传递的滞后效应, 当紧挨移除柱上层梁处于悬链线受拉状态但不发生钢筋拉断破坏时, 随着加载的持续进行, 轴拉力逐渐地向上传递.

空腹作用的两大特点: 1) 梁端存在相对垂直位移; 2) 梁柱存在双曲率变形. 空腹作用被认为移柱后框架结构进行荷载重新分布的主要机制之一.^[5-6] 即, 连接移柱处节点与相邻支承点的梁产生了双曲率变形, 从而形成足够的剪切力导致荷载重新分配. 荷载重新分布的两个表现, 一个是框架梁的弯曲轴力的改变; 另一个是柱荷载通过空腹框架的作用转移到远离受损区域的框架柱上.

图 10 以及图 12 给出的各框架梁轴力变化很好地说明了移柱后框架结构连续倒塌的机制. 按照本文的分析结果, 多层框架结构任意一层的中柱拆除后, 最可能破坏的楼层就是紧靠移除柱的上层梁. 若该梁能够有效地发挥替换的荷载路径作用, 则不会发生连续倒塌, 否则, 框架结构可能发生由下而上的逐层连续倒塌.

4 损伤结构可靠度分析

基于上述对钢筋混凝土平面框架的 Pushdown

分析,对比不同层数框架结构的空腹梁作用,发现框架结构中柱移除后,紧靠该柱的上层梁结构将是结构的重要构件.但从可靠度角度出发,除该层框架梁结构可能发生破坏外,其他层框架梁结构也有可能发生破坏而引起结构倒塌.基于此,本文从可靠度方面对框架结构进行进一步分析,并提出以下假定:

1) 本文计算偶然事件发生后损伤结构的条件失效概率,不考虑偶然荷载作用出现的概率.

2) 损伤结构后续破坏只发生在框架梁上,不考虑相邻框架柱的失效概率.这是因为一般情况下,合理的设计使结构在地震作用下呈现出强柱弱梁的失效模式,柱的失效概率远小于梁的失效概率.

3) 移柱后框架结构层与层之间为串联体系,即若某一层发生破坏丧失承载能力,则视为整个框架结构发生破坏.

4) 框架结构各楼层的材料强度、构件尺寸等随机变量的分布为独立同分布.

5) 框架结构各楼层之间的相关性为确定性相关,采用与结构受力性能相关的系数对结构各楼层荷载效应进行调整.

4.1 极限状态方程

对于每层框架梁,按照单层固支梁塑性计算模式建立极限状态方程:

$$Z = CR - \alpha S. \quad (1)$$

式中:抗力 R 为按照固支梁计算的塑性机制承载力; C 为考虑框架整体性能后(压拱机制和悬链线机制等)的承载力放大系数; α 为层间相关系数;作用效应 S 为结构的荷载作用.

承载力放大系数为有限元分析后得到的确定性参数,为了确定承载力放大系数 C ,取:

$$C = \frac{\max[P_a \cdot P_u]}{P_p}. \quad (2)$$

式中: P_p 为按照固支梁计算的塑性机制承载力; P_a 、 P_u 分别为通过 Pushdown 分析得到的框架结构压拱机制和悬链线机制承载力模拟值.

放大系数 C 通过 Pushdown 曲线得到的承载力进行计算,一方面体现了框架作用的整体效应,通过结构承载力的相对大小体现楼层层数的影响;另一方面考虑对比了压拱机制承载力以及悬链线机制承载力的大小.在本文有限元模拟中,将结构的失效准则确定为:拆除柱所在支承节点的竖向位移达到与节点连接的最短梁跨度 18%,即 $0.18l$.放大系数 C 的计算结果见表 3.

表 3 承载力放大系数计算结果

Tab.3 Calculation result of bearing capacity magnification coefficient

结构层数	$P_p/(kN \cdot m^{-1})$	C	结构层数	$P_p/(kN \cdot m^{-1})$	C
2	15.81	1.549	6	15.81	1.447
4	15.81	1.478	8	15.81	1.431

4.2 相关性假定

通过 Pushdown 分析,得到了移柱后损伤结构各层轴力的对比图.由于空腹作用的影响,框架结构层与层之间发生了荷载的重新分布,轴力的相对大小能明显体现出荷载重新分布的规律.在悬链线阶段,底层框架梁轴拉力最大,是引发连续倒塌最薄弱的环节;顶层框架梁承受轴向压力,没有达到全截面受拉的状态,最不容易发生破坏.从宏观上看轴力的相对大小可体现结构发生破坏概率的相对大小.但结构进入悬链线阶段后,结构发生破坏与否取决于钢筋的强度及伸长率,轴力本身对结构破坏与否并不是决定性因素.比较而言钢筋的应力和应变状态能更为直观地比较各层框架梁破坏概率的相对大小.因此本文将通过钢筋应变的相对大小确定框架结构楼层之间破坏概率的相关性,通过相关性系数对结构各楼层的荷载作用进行调整.

通过本文建立的 OpenSees 有限元模型计算,可得到不同层数框架各楼层框架梁跨中底部钢筋应变情况.当拆除柱所在支承节点的竖向位移达到极限位移 $0.18l(1.44\text{ m})$ 时,框架结构中底层梁纵向受拉钢筋最大应变为 0.1544 ,其他各框架的各层梁相应部位受拉钢筋拉应变的最小值为 0.1496 ,结构底层框架梁受拉钢筋应变与其他层框架梁受拉钢筋应变相差约 3%.以 8 层框架结构为例,顶层钢筋拉应变为 0.1496 ,7 层钢筋拉应变为 0.1497 ,其他各层受拉钢筋应变差值的数量级为 10^{-4} ,相对差值小于 1‰.因此本文忽略这种差别,不做详细区分,对除底层以外的其他层框架梁底部受拉钢筋应变统一按照顶层框架梁底部受拉钢筋应变进行结果输出,用于后续计算,各框架梁钢筋应变见表 4.

从受力机理分析,框架梁中钢筋拉应变的产生主要来自于两个方面,一是移柱后损伤结构由于空腹梁作用在竖向荷载作用下产生双曲率变形,跨中部位的弯曲变形使得框架梁底部钢筋产生很大的拉应变;另一方面则是因为框架梁中产生的轴向力对钢筋作用,底层梁的受压区混凝土压碎后,钢筋

承担的拉力使梁截面处于偏心受拉状态,这也是底层框架梁和其他层框架梁钢筋拉应变差异的主要原因.因此通过钢筋拉应变的相对大小能有效地反映框架梁发生破坏概率的相对大小.

表4 钢筋应变及相关性系数

框架层数	ε_{ul}	ε_{ui}	α_1	α_i
2层	0.152 3	0.150 0	1.0	0.985
4层	0.154 4	0.150 0	1.0	0.972
6层	0.154 4	0.149 9	1.0	0.971
8层	0.154 4	0.149 6	1.0	0.969

注: ε_{ul} 表示底层框架梁底部受拉钢筋应变; ε_{ui} 表示第*i*($1 < i \leq n$)层框架梁底部受拉钢筋应变; α_1 表示底层相关性系数; α_i ($1 < i \leq n$)表示第*i*层的相关性系数.

为了简化计算,同时又考虑框架结构底层和其他楼层的差异,假设钢筋应变与外荷载之间的关系为线性相关.因此对本文计算的各个框架,以底层框架梁作为基准,底层相关性系数 $\alpha_1=1$,其余各楼层的相关性系数 α_i ($1 < i \leq n$, n 为楼层层数)按照钢筋应变的相对大小对楼层分布荷载取值做线性折减.

4.3 随机变量分布及荷载组合效应

抗力*R*为固支梁塑性机制承载力,其影响因素包括:材料性能、构件几何尺寸以及计算模型.抗力*R*作为随机变量,各因素均存在一定的不确定性,对本文模型按照《建筑设计统一标准》^[8]查取材料、尺寸及计算模型相关参数.

荷载作用按照其分布特点可分为两大类:一类是永久荷载即恒载,其服从正态分布;另一类是可变荷载及楼面活荷载(本文不考虑风荷载),包括持续性活荷载和临时性活荷载,均服从极值I分布.规范^[8]规定:楼面活荷载由任意时点持续性活荷载与设计基准期最大临时性活荷载相组合.本文按照住宅楼面活荷载进行计算分析,荷载参数按照《建筑设计统一标准》查取.

对柱移除后的剩余结构进行条件失效概率分析,按照偶然组合的效应规则进行组合:

$$S_d = S_{Gk} + \psi_{fi} S_{Qk} \quad (3)$$

式中: ψ_{fi} 为第一个可变荷载的频遇值系数,按照规范^[9]取值.

4.4 结构条件失效概率

采用 Monte-Carlo 方法对基本抗力变量和荷载变量进行随机抽样(2×10^9 次),计算单层框架梁失效概率及可靠度指标.结构为串联体系,则结构体

系条件失效概率为 $p = 1 - \prod_i (1 - p_i)$, p_i 为底层中柱移除后第*i*层框架梁的失效概率,则单层梁及体系失效概率计算结果见表5.

表5 各框架条件失效概率

Tab.5 Conditional probability of failure of each frame

框架层数	p_1	p_i	p	β
2层	5.28e-3	3.68e-3	8.94e-3	2.37
4层	1.51e-2	8.18e-3	3.91e-2	1.76
6层	2.32e-2	1.27e-2	8.37e-2	1.38
8层	2.88e-2	1.53e-2	1.28e-1	1.14

从以上计算结果可看出,随着楼层的增加,移柱后框架结构失效概率增大,结构体系可靠度逐渐减小.一个原因是移柱位置框架梁受力特征随上部楼层增加而变化:从图10(e)各框架底层轴力对比图可看出,结构在达到极限位移0.18l(1.44 m)时,底层框架梁轴拉力因空腹作用而随着楼层层数的增加而增大,因此框架结构达到相同的极限位移条件下,8层框架底层梁更容易出现钢筋拉断而发生结构破坏.另一原因则是移柱后框架结构各层梁之间的受力接近串联体系,随着楼层层数的增加,任意楼层的失效都将导致结构体系失效,从而使得结构体系失效概率相应增大.

5 结论

1) 本文采用 OpenSees 软件建立有限元分析模型,对钢筋混凝土约束梁、单层框架结构和多层框架结构连续倒塌试验进行数值模拟,利用试验获取的竖向位移和水平位移数据验证本文所建立的有限元模型,结果表明数值模拟结果与试验结果吻合良好.说明本文的有限元模型能够较好地模拟平面框架结构抗连续倒塌过程中的压拱机制、转换机制和悬链线机制.

2) 通过非线性静力 Pushdown 分析方法对不同层数的移柱后框架结构进行分析,研究了楼层层数对移柱后框架结构抵抗连续倒塌能力的影响.发现随着楼层层数的增加,压拱机制和悬链线机制承载力均有所降低.

3) 移柱后损伤框架在荷载作用下将形成空腹梁作用,顶层框架梁和紧靠移除柱的上层框架梁相当于空腹梁的受压区和受拉区,中间各层接近中性轴.空腹梁作用造成框架梁轴力的改变,紧靠移除

柱的上层梁结构成为结构的重要构件.若该梁能有效地发挥替换的荷载路径作用,则结构不会发生连续倒塌.

4)本文采用数值模拟与理论分析结合的方法,提出一种新的计算损伤框架体系可靠度的办法.对移柱后损伤框架建立单层框架梁连续倒塌极限状态方程,在方程中比较压拱机制与极限状态悬链线机制的承载力,设定承载力放大系数,并考虑影响连续倒塌的各个因素;采用串联体系计算体系条件失效概率,选取钢筋应变作为楼层相关性系数对结构各楼层荷载效应进行调整.

5)对比不同层数损伤结构体系可靠度的差异,在本文算例中,拆除框架结构底层中柱,随着框架楼层层数的增加,结构体系的可靠度逐渐减小.

本文仅针对一个算例进行分析,分析结果的一般性意义受到算例本身的限制.今后的研究将运用本文方法对受力条件不同的框架结构展开研究,得到更具普遍意义的框架结构连续倒塌概率分析结果.

参考文献

- [1] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10) [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 559(3):996.
- [2] YU J, TAN K H. Structural behavior of RC beam-column sub-assemblages under a middle column removal scenario [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(2):233-250.
- [3] 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 M J, ZHOU Y L, LU X Z, 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. (In Chinese)
- [4] 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 W J, HE Q F, XIAO Y. Collapse performance of RC frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5):104-109. (In Chinese)
- [5] SASANI M, KAZEMI A, SAGIROGLU S, et al. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to severe initial damage [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(9):893-902.
- [6] SASANI M, SAGIROGLU S. Progressive collapse resistance of hotel san Diego [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(3):478-488.
- [7] 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 Y, YE L P, LU X Z. 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. (In Chinese)
- [8] 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 Y, LU X Z, YE L P. 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. (In Chinese)
- [9] 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 Y L, LI Y, LU X Z, et al. An analytical model of compressive arch action of reinforcement concrete frames to resist progressive collapse [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):34-42. (In Chinese)
- [10] SCOTT B D. Stress-strain behavior of concrete by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79(1):13-27.
- [11] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of analysis for cyclically loaded R. C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]// Proceedings of the IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures. Lisbon, 1973:15-22.
- [12] SPACONE E, FILIPPOU F C, TAUCER F F. Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: part I. formulation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 25(7):711-725.
- [13] 李忠学.采用矢量型转动变量的二维协同转动梁元法[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(7):1219-1223.
LI Z X. Advanced co-rotational procedure for large displacement analysis of 2D beam element using vectorial rotational variables [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(7):1219-1223. (In Chinese)
- [14] 何庆锋,刘义仁,蒋曲翀,等.锤击作用下钢筋混凝土框架倒塌性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):40-46.
HE Q F, LIU Y R, JIANG Q C, et al. Experimental study of the collapse performance of RC frame under hammer load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(1):40-46. (In Chinese)
- [15] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:54-64.
GB 50010-2010 Code for design of concrete structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010:54-64. (In Chinese)
- [16] KHANDELWAL K, EL-TAWIL S. Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis [J]. Engineering Structures, 2011, 33(9):2653-2661.
- [17] DoD 2013 Design of structures to resist progressive collapse [S]. Washington DC: Department of Defense, 2013:3-1-4-8.
- [18] GB J68-84 建筑结构设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,1984:32-34.
GB J68-84 Unified standard for structural design [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1984:32-34. (In Chinese)
- [19] GB 50009-2012 建筑结构设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2012:8-14.
GB 50009-2012 Load code for design of building structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:8-14. (In Chinese)