

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.006

# 影响 RC 框架结构抗地震倒塌能力的因素研究

杨小卫, 许君风, 胡江春

(中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 基于有限元方法, 采用“纤维梁模型 + 分层壳”模型, 用增量动力时程方法, 对 RC 框架结构抗地震倒塌能力的因素进行研究, 可以得到如下结论: 设计时尽量降低框架柱的最大轴压比, 做到结构层间抗侧刚度均匀; 并对多个设计模型比较, 找到最优的最大层间位移角, 使得结构设计的承载力、刚度、延性达到最佳匹配, 增大倒塌储备系数  $C_{\text{cmr}}$ , 达到提高抗地震倒塌能力的目的。

**关键词:** RC 框架结构; 增量动力时程分析; 轴压比; 层间抗侧刚度比; 最大弹性层间位移角; 倒塌储备系数  
**中图分类号:** TU375.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1144(2016)06-0030-05

## Seismic Collapse Resistance Influencing Factors of RC Frame Structures

YANG Xiaowei, XU Junfeng, HU Jiangchun

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, He'nan 450007, China)

**Abstract:** The collapse of structures is an important earthquakes disaster. Analyzing reasons and damage process of typical structures could lead to new aseismatic measures and improve the overall structure of the ability to resist collapse. Based on the finite element method and fiber beam and layered shell model, by adopting incremental dynamic analysis method, the seismic collapse resistance influencing factors of the RC frame structure was revealed. The conclusions are the maximum axial compression ratio of frame column should be reduced, the maximum interlayer displacement angle should be determined which could make the structure design of the bearing capacity, stiffness, ductility achieve the best match, increasing the CMR collapsed reserve coefficient and achieve the goal of improving the ability to resist earthquake collapse.

**Keywords:** RC frame structures; incremental dynamic analysis; axial compression ratio of columns; inter-story drift stiffness ratio; the maximum value of elastic story drift; collapse margin ratio

倒塌破坏是结构抗大震灾害能力的一个重要极限状态。因此通过深入研究一些影响典型结构形式倒塌破坏的相关因素, 揭示结构倒塌破坏的原因和过程, 采取相应的抗震措施予以加强就成为提高和改善结构整体抗地震倒塌能力的重要依据。国内外很多学者在该问题上进行了大量的研究<sup>[1-13]</sup>, 但很少看到针对地震作用下影响 RC 框架结构抗大震倒塌能力的因素如“底层柱的轴压比、结构层间抗侧刚度比以及最大弹性层间位移角”的研究。在我国多、高层建筑结构设计中, RC 框架结构以其平面布置灵活, 且具有足够强度、良好延性和较强整体性的优点而被广泛应用。然而 RC 框架结构仍会在地

震作用下产生较为严重的震害, 甚至倒塌(如图 1 所示)。因此探究在大震作用下 RC 框架结构倒塌的影响因素, 改进抗震措施, 增强其抗大震倒塌能力具有重要的现实意义。

## 1 数值模型及抗倒塌能力评价方法

### 1.1 数值模型

为实现大震作用下 RC 框架结构的连续倒塌模拟, 基于有限元方法, 采用“纤维梁 + 分层壳”弹塑性分析模型<sup>[14-15]</sup>。模型中梁、柱在 MSC.MARC 软件采用图 2 的铁木辛柯纤维梁 98 号单元, 分层壳单元在该软件中采用考虑实际配筋并可赋予其复合材

料特性的 75 号壳单元,如图 3 所示,用以模拟楼板内混凝土及钢筋的组合力学特性。在 MSC. MARC 软件中钢筋膜(Rebar Layer)厚度的计算公式见下式<sup>[16]</sup>。



图 1 某中学框架教学楼整体倒塌

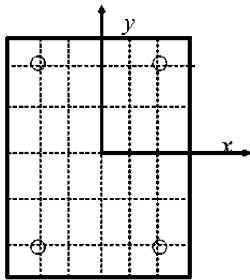


图 2 纤维模型截面划分示意

$$t = \frac{(E_s - E_c) A_s}{E_s S} \quad (1)$$

式中: $t$  为钢筋膜的厚度; $E_s$ 、 $E_c$  分别为钢筋和混凝土

的弹性模量; $A_s$  为钢筋的截面面积; $S$  为楼板的厚度或壳单元的厚度。

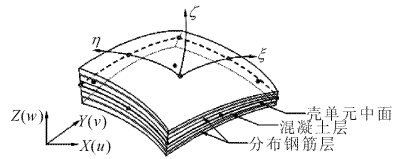


图 3 分层壳单元

### 1.2 抗倒塌能力评价方法

对于评价结构抗倒塌能力的方法,FEMA P695<sup>[17]</sup>提出倒塌储备系数  $C_{cmr}$  (Collapse Margin Ratio) 的概念,即在地震作用下结构的实际抗倒塌能力和设防要求之间的比值。通过输入逐步增大峰值的地震时程曲线直至计算至结构倒塌破坏的方法,该方法即叫 IDA (Incremental Dynamic Analysis) 法,而把结构倒塌时地震强度作为结构抗地震倒塌能力的评价指标。考虑到地震动的不确定性,用单一地震动的分析结果来评价结构抗倒塌能力缺乏规律性,因此该文献建议通过大量强地面运动记录( $\geq 20$  条)进行计算,来考虑不同强地面运动输入差异的影响,用所有输入强地面运动下分析结果的平均值作为结构抗倒塌能力的评价标准。从文献[18]的强地面运动数据库内选择震动特性相近的地震记录,如表 1 所示。

表 1 21 条地震动记录汇总表<sup>[17-18]</sup>

序号	震级	发生年份	名称	地震台	分量
1	7.8	1970	LIMA, PERU	INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU, LIMA, PERU	270
2	7.9	1976	TANGSHAN, CHINA	BEIJING HOTEL, BEIJING, CHINA; BSMT	180
3	6.2	1976	LONG LING AFTERSHOCK	LONGLIN, YUNAN, CHINA: GND	NS
4	6.0	1951	NORTHWEST CALIFORNIA	CITY HALL, FERNDALE, CA	N46W
5	7.7	1952	KERN COUNTY CALIFORNIA	TAFT LINCOLN SCHOOL, CA: TUNNEL	90
6	6.0	1935	HELENA MONTANA	HELENA, MONTANA CARROLL COLLEGE	S90W
7	6.6	1971	SAN FERNANDO	JET PROPULSION LAB., PASADENA, CA; BSMT	S08W
8	6.6	1971	SAN FERNANDO	15250 VENTURA BLVD, LOS ANGELES, CA; BSMT	140
9	6.0	1960	NORTHERN CALIFORNIA	CITY HALL, FERNDALE, CA	N46W
10	6.9	1979	IMPERIAL VALLEY	EL CENTRO DIFF. ARRAY, EL CENTRO, CA	360
11	6.9	1979	IMPERIAL VALLEY	EL CENTRO ARRAY 13, STROBEL RESIDENCE, EL CENTRO, CA	140
12	6.1	1980	MAMMOTH LAKES	LONG VALLEY DAM, CA; UPPER LEFT ABUT	90
13	6.0	1980	MAMMOTH LAKES	CONVICT CREEK	180
14	6.1	1984	MORGAN HILL	GILROY # 3	90
15	6.7	1989	LOMA PRIETA	ANDERSON DAM CRA - 1; TOE	180
16	6.7	1994	NORTHRIDGE	NORWALK, 12400 IMPERIAL HIGHWAY; GND	90
17	6.7	1994	NORTHRIDGE	6850 COLDWATER CANYON AVE, NORTH HOLLYWOOD, CA	S90W
18	6.7	1994	NORTHRIDGE	23536 CATSKILL AVE, CARSON, CA	S90E
19	6.7	1994	NORTHRIDGE	14801 OSAGE AVE, LAWNSDALE, CA	S02W
20	6.7	1994	NORTHRIDGE	11338 FAIRVIEW AVE, EL MONTE, CA	S85E
21	6.7	1994	NORTHRIDGE	180 CAMPUS DR., ARCADIA, CA	N09E

综合各条强地面运动的 IDA 分析结果,得到结构倒塌易损性曲线,即结构倒塌率与强地面运动的关系曲线<sup>[19-20]</sup>,如图 4 所示。如果结构在以基本周期  $T_1$  的地震作用影响系数  $S_a(T_1)$  作为地面运动强度的指标下,有 50% 的强地面运动输入发生了倒塌,则该地面运动强度就是结构体系的平均抗倒塌能力<sup>[19]</sup>。将此地面运动强度和结构的设计大震强度比较,就可得出倒塌储备系数  $C_{cmr}$ ,即

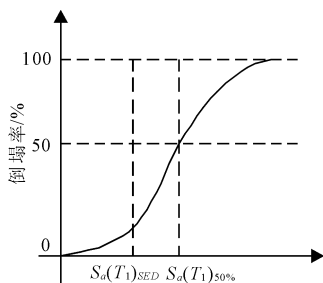


图 4 结构倒塌易损性曲线

$$C_{cmr} = \frac{S_a(T_1)_{50\%}}{S_a(T_1)_{red}} \quad (2)$$

式中:  $S_a(T_1)_{50\%}$  为有 50% 强地面运动输入出现倒塌时对应的地面运动强度  $S_a(T_1)$ ;  $S_a(T_1)_{red}$  为规范<sup>[21]</sup> 规定的大震(Rare Earthquake Design, RED) 所对应的地面运动强度  $S_a(T_1)$ 。依据规范<sup>[21]</sup>,  $S_a(T_1)_{red}$  可以按下式计算:

$$S_a(T_1)_{red} = \frac{\alpha_{T_1} \cdot g \cdot G_{red}}{G_{fed}} \quad (3)$$

其中:  $\alpha_{T_1}$  为结构基本周期  $T_1$  的水平地震影响系数;  $g$  为重力加速度;  $G_{red}$  为规范<sup>[21]</sup> 规定的大震下的地面峰值加速度,对于 7 度设防地震时为  $220 \text{ cm/s}^2$ ;  $G_{fed}$  为规范<sup>[21]</sup> 建议小震(Frequent Earthquake Design, FED) 下的地面峰值加速度,对于 7 度设防地震时为  $35 \text{ cm/s}^2$ 。

根据结构倒塌率随  $C_{cmr}$  呈对数正态分布<sup>[19-20]</sup>, 即可求得结构的倒塌概率。

## 2 模型设计

某六层 RC 框架结构,层高均为 3 m;结构安全等级为二级。抗震设防烈度为 7 度( $0.1g$ ),设计地震分组为第一组,场地类别为 II 类。楼面恒荷载取  $5.2 \text{ kN/m}^2$ ,活荷载取  $2.0 \text{ kN/m}^2$ 。结构平面布置如图 5 所示,其中板厚为 110 mm,楼板钢筋等级为 HPB300,框架梁、柱钢筋等级为 HRB400。

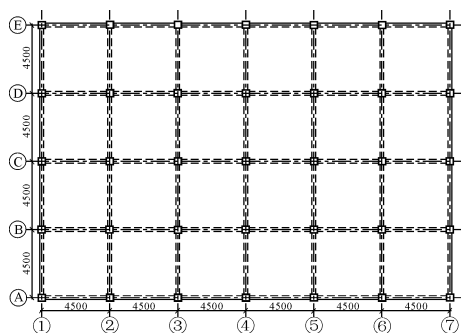


图 5 结构平面布置图

影响因素的变化调整如表 2 所示。框架梁、柱截面尺寸不变,通过改变混凝土强度等级来调整底层柱的轴压比( $\mu_N$ );框架梁、柱截面尺寸及混凝土强度等级不变,通过改变底层的层高来调整结构底部两层的层间抗侧刚度比( $K_1/K_2$ );混凝土强度等级及层高不变,通过改变框架柱的截面尺寸(改变楼面荷载保证柱的轴压比不变)来调整层间最大位移角( $\theta_{emax}$ )。根据以上调整分别用 PKPM 系列软件按照现行设计规范<sup>[21-22]</sup> 进行配筋设计,每种影响因素分别建立 3 个计算模型,共计 9 个设计计算模型。

表 2 模型参数设计表

影响因素	截面尺寸		混凝土等级	层高	楼面荷载
	梁	柱			
$\mu_N$	不变	不变	改变	不变	不变
$K_1/K_2$	不变	不变	不变	改变	不变
$\theta_{emax}$	不变	改变	不变	不变	改变

采用 1.1 节中的方法,建立如图 6 所示的弹塑性有限元模型。

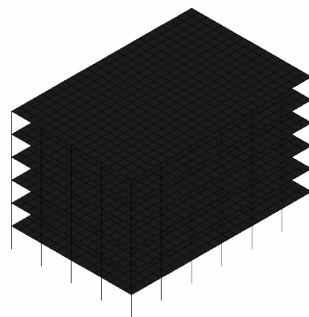


图 6 有限元分析模型

## 3 结构倒塌易损性分析结果

### 3.1 底层框架柱轴压比的影响

由图 7 可知,在相同地面运动强度的作用下,结构的抗倒塌能力随底层柱的轴压比增大而降低;倒

塌概率从“大震不倒”增加到 0.26%,倒塌储备系数  $C_{cmr}$  从 10.77 降到 6.17,如表 3 所示。说明框架柱的轴压比过大不利于结构抗震,设计时尽量降低框架柱的最大轴压比,增加倒塌储备系数  $C_{cmr}$ ,提高抗地震倒塌能力。

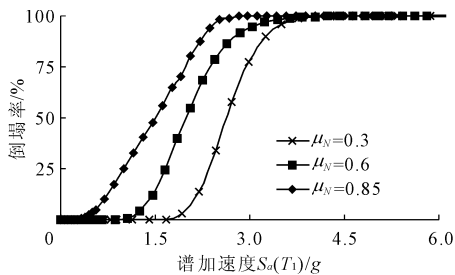


图 7 不同轴压比下的结构倒塌易损性曲线

表 3 倒塌储备系数  $C_{cmr}$

$\mu_N$	$S_a(T_1)_{50\%}/g$	$S_a(T_1)_{sed}/g$	$C_{cmr}$	大震倒塌概率/%
0.30	2.7170	0.25237	10.77	0.00
0.60	2.0487	0.25665	7.98	0.00
0.85	1.6094	0.26105	6.17	0.26

### 3.2 结构层间抗侧刚度比的影响

由图 8 可知,在相同地面运动强度的作用下,在结构层间抗侧刚度均匀时,整体结构的抗倒塌能力达到最优;倒塌概率也满足“大震不倒”的目标,倒塌储备系数  $C_{cmr}$  达到 10.93,如表 4 所示。表明结构层间抗侧刚度相差较大时,不利于结构抗震,设计时尽量做到结构层间抗侧刚度均匀,以增加倒塌储备系数  $C_{cmr}$ ,提高抗地震倒塌能力。

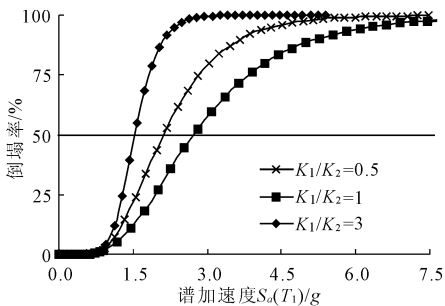


图 8 不同抗侧刚度比下的结构倒塌易损性曲线

表 4 倒塌储备系数

$K_1/K_2$	$S_a(T_1)_{50\%}/g$	$S_a(T_1)_{sed}/g$	$C_{cmr}$	大震倒塌概率/%
0.5	2.1842	0.31366	6.96	0.002
1.0	2.8145	0.25759	10.93	0.000
3.0	1.5748	0.27839	5.66	0.003

### 3.3 最大层间位移角的影响

由图 9 可知,在相同地面运动强度的作用下,在

结构设计中存在一个最优的最大层间位移角(文中算例为 1/950),使得抗地震倒塌能力达到最优;倒塌概率也满足“大震不倒”的目标,倒塌储备系数  $C_{cmr}$  达到最大(9.84),如表 4 所示。表明结构设计时尽量多做设计模型对比,找到梁、柱构件的最佳尺寸搭配,得到最优的最大层间位移角,以增加倒塌储备系数  $C_{cmr}$ ,提高抗地震倒塌能力。

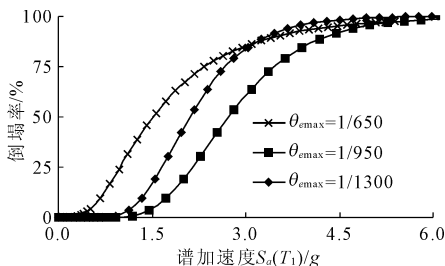


图 9 不同最大层间位移角下的结构倒塌易损性曲线

表 5 倒塌储备系数

$\theta_{max}$	$S_a(T_1)_{50\%}/g$	$S_a(T_1)_{sed}/g$	$C_{cmr}$	大震倒塌概率/%
1/650	1.5749	0.03545	7.07	2.8
1/950	2.8149	0.04549	9.84	0.0
1/1300	2.1842	0.05675	6.12	0.1

## 4 结 论

对地震作用下影响 RC 框架结构抗倒塌能力的因素进行研究,可以得到如下结论:

- (1) 在相同地面运动强度的作用下,结构的抗倒塌能力随底层柱的轴压比增大而降低。
- (2) 在相同地面运动强度的作用下,在结构层间抗侧刚度均匀时,整体结构的抗倒塌能力最优。
- (3) 在结构设计中存在一个最优的最大层间位移角,使得抗地震倒塌能力达到最优。
- (4) 设计时尽量降低框架柱的最大轴压比,做到结构层间抗侧刚度均匀;并对多个设计模型比较,找到最优的最大层间位移角,使得结构设计的承载力、刚度、延性达到最佳匹配,增大倒塌储备系数  $C_{cmr}$ ,达到提高抗地震倒塌能力的目的。

### 参考文献:

[1] 陆新征,林旭川,叶列平,等.地震下高层建筑连续倒塌数值模型研究[J].工程力学,2010,27(11):64-70.  
 [2] 吕剑勇,郭瑞东.两种托墙转换结构静力弹塑性抗震分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):164-167.  
 [3] 黄鹏云,杨 鹏,陈杰平,等.柱顶隔震结构首层柱子设计及动力弹塑性分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):95-98.

- [4] 林旭川, 陆新征, 缪志伟. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 49-54.
- [5] 陆新征, 叶列平. 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13-18.
- [6] 陆新征, 施 炜, 张万开. 三维地震动输入对 IDA 倒塌易损性分析的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(6): 1-7.
- [7] Lynn K M, Isobe D. Structural collapse analysis of framed structures under impact loads using ASI - Gauss finite element method[J]. International Journal of Impact Engineer, 2007, 34(9): 1500-1516.
- [8] Lynn K M. Finite element code for impact collapse problems of framed structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(12): 2538-2563.
- [9] Pekau O A, Cui Y. Progressive collapse simulation of precast panel shear walls during earthquakes[J]. Computers & Structures, 2006, 84(5/6): 400-412.
- [10] Khandelwal K, El-Tawil S. Multiscale computational simulation of progressive collapse of steel frames[C]//Proceedings of the ASCE Structures Congress, 2005.
- [11] Kaewkulchai G, Williamson E B. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis[J]. Computers & Structures, 2004, 82(7/8): 639-651.
- [12] Isobe D, Tsuda M. Seismic collapse analysis of reinforced concrete framed structures using the finite element method [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(13): 2027-2046.
- [13] 宣 纲, 顾祥林, 吕西林. 强震作用下混凝土框架结构倒塌过程的数值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(6): 24-30.
- [14] 叶列平, 陆新征, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(S2): 131-140.
- [15] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析—原理、模型与在 ABAQUS, MSC. MARC 和 SAP2000 上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] FEMA P695. Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors[S]. Federal Emergency Management Agency. Prepared by Applied Technology Council, 2008.
- [18] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database[EB/OL]. <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>. California: Berkley, 2005.
- [19] 林旭川. 基于系统方法的 RC 框架结构抗震性能优化设计[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [20] Farzin Zareian, Helmut Krawinkler. Assessment of probability and design for collapse safety[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1901-1914.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011 - 2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010 - 2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(上接第 24 页)

- [15] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, 120(1): 25-42.
- [16] 王振宇, 刘晶波. 成层地基非线性波动问题人工边界与波动输入研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1169-1173.
- [17] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.
- [18] 潘旦光, 楼梦麟, 董 聪. 土层地震行波反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 308-312.
- [19] 刘晶波, 谷 音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
- [20] 杜修力, 赵 密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 49-56.
- [21] 卢华喜, 梁平英, 尚守平. 地基非线性波动问题中黏 - 弹性人工边界研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1911-1916.
- [22] 张 波, 李术才, 杨学英, 等. 三维黏弹性介质人工边界研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3469-3475.