

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2018.04.023

RC 框架结构地震倒塌风险近似评价方法的精度对比^{*}

刘 艳¹, 张 磊², 顾栋炼², 陆新征²

(1. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 清华大学土木工程系土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 增量动力分析方法(IDA)是目前评价 RC 框架结构抗地震倒塌能力最精确的方法,但是计算量大、耗时长,在工程实际中难于应用。现阶段已经提出了多种简化评价方法,可显著提高工作效率,便于工程人员应用,但是对其精度缺乏合理评价。本文介绍了三种常用的简化评估方法,基于静力推覆分析和塑性需求曲线方法;基于静力推覆分析并利用抗倒塌储备系数(CMR)与位移安全储备系数关系方法;基于抗倒塌能力谱法,用这三种方法计算了 6 个 RC 框架结构在罕遇地震下的 CMR 和倒塌率,并与其 IDA 计算结果进行对比,分析了三种简化评估方法的精度。结果表明三种简化计算方法中基于静力推覆分析和塑性需求曲线方法精度最高,基于静力推覆分析并利用抗倒塌储备系数(CMR)与位移安全储备系数关系方法和基于抗倒塌能力谱法计算更简单快捷。

关键词: 增量动力分析;简化评价方法;倒塌安全储备系数;倒塌率;精度比较;

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2018)04-0768-05

Comparison Study on the Accuracy of Different Simplified Evaluation Methods for Seismic Collapse Risks of RC Frames

LIU Yan¹, ZHANG Lei², GU Donglian², LU Xinzheng²

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The incremental dynamic analysis (IDA) by now is the most accurate method among all prediction methods which are used to assess the seismic collapse risk of RC frames. However, the IDA is too time-consuming to be used in real engineering. Simplifying the seismic collapse risk assess process is studied recently so as to improve efficiency for application. But there is lack of evidences to ensure the accuracies of different simplified methods. This work introduced three published simplified methods. The method based on the pushover analysis and the capacity curve; The method based on the pushover analysis and using the correlated relations between the collapse margin ratio (CMR) and the displacement margin ratio; The method based on the collapse resistant capacity spectrum. The collapse margin ratio and collapse risks subjected to severe earthquakes of 6 reinforced concrete frames are evaluated using the simplified methods and compared with the results of IDA. The results indicate that the most accurate method of the three is

* 收稿日期:2018-01-23;修回日期:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51378299)、安徽省高校自然科学基金项目(KJ2017JD01)资助

作者简介:刘 艳(1972-),女,讲师,硕士。主要从事抗震研究。Email:whynot21@sina.com

the method based on the pushover analysis and the capacity curve, and the more simple and convenient methods are the method based on the pushover analysis and using the correlated relations between the collapse margin ratio (CMR) and the displacement margin ratio and the method based on the collapse resistant capacity spectrum.

Keywords: Incremental Dynamic Analysis(IDA); simplified evaluation method; Collapse Margin Ratio(CMR); collapse risk; accuracy comparison

引 言

我国现行的《建筑抗震设计规范》^[1]要求结构普遍达到“小震不坏,中震可修,大震不倒”的性能水准,但是对结构在罕遇地震下的倒塌风险没有给出明确的规定,使得“大震不倒”性能目标缺乏合适的量化评价手段。美国 ASCE 7-10 规范^[2]首次将结构在其 50 年设计基准期内地震倒塌的风险不得高于 1%作为抗震设防的目标,使得基于一致倒塌率的抗震设计方法成为未来地震工程的重要发展方向。我国《建筑结构抗倒塌设计规范》^[3]也明确规定,标准设防类(丙类)建筑在设计罕遇地震下的倒塌率不应高于 5%。然而,施炜等^[4]的研究表明,我国不同地区、不同设防烈度的 RC 框架结构的大震倒塌风险存在差异,难以满足一致倒塌率抗震设计的要求。因此需要进一步加强对结构抗地震倒塌机理和对策的研究。

衡量结构在罕遇地震下的倒塌风险,最准确的方法是采用增量动力分析(IDA)的方法^[5]。IDA 方法通过给结构输入一组选定的地震动,并逐步提高地震动的强度,进行大量的弹塑性时程分析,得到结构在不同强度地震动下的倒塌概率,进而评价结构的倒塌风险。国外学者基于增量动力分析的方法对其它类型的结构进行抗倒塌安全能力的研究。A. Gogus 等^[6]基于 IDA 分析剪力墙结构的抗倒塌安全储备系数,提出了剪力墙设计参数的调整。Y. Li 等^[7]运用 IDA 对木结构抗倒塌能力进行分析,认为抗震设计和施工方式对木结构抗震能力的影响。

表征结构抗倒塌能力的方法主要有两种,最直观的特征方法是给出结构在设计罕遇地震或其设计周期内的倒塌概率(图 1)。但是由于工程结构可接受的倒塌概率非常小(例如要求小于 5%或 1%),进而导致需要大量地震动的统计分析才能得到这样一个小概率数值(超过 100 条以上),操作难度较大。因此美国 FEMA P695^[8]又引入倒塌安全储备系数(CMR)的概念,即用 50%倒塌率的地震动强度除以设防罕遇地震动度,作为结构的抗倒塌安全储备。

显然,要得到 CMR,理论上需要的地震动数量就少得多(超过 10~20 条即可),因此操作上更简便。但是 CMR 和罕遇地震下的倒塌率之间的关系比较复杂,不够直观。

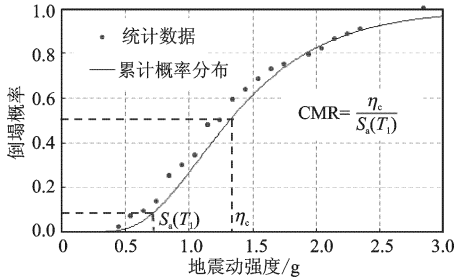


图 1 IDA 分析的得到的易损性曲线
Fig. 1 Fragility curve from IDA

由于 IDA 方法牵涉到地震动选取,以及大量弹塑性时程分析甚至倒塌分析,工作量大难度高,一般工程人员难于掌握。因此,发展适当的简化分析方法来确定结构的地震倒塌风险就具有重要的工程价值。与弹塑性时程分析方法相比,静力推覆分析相对而言难度和计算量都极大减少,因此如果能够通过静力推覆分析来确定结构的倒塌安全储备,则可以显著提升倒塌分析的效率。陆新征等^[9]研究了结构推覆曲线和 IDA 得到的倒塌风险之间的关系,其结论为结构的倒塌率和推覆曲线的位移安全储备间存在一定联系。并给出了通过推覆曲线的位移安全储备来估算结构大震倒塌风险的计算公式。但是该公式的经验成分较多,可能适用范围存在较大制约。

施炜等^[10]参考抗震研究中经典的 $R-\mu-T$ 关系,提出了“倒塌谱”的概念。倒塌谱首先通过 IDA 研究非线性单自由度体系的地震倒塌风险,在此基础上提出结构倒塌风险和非线性单自由度体系参数之间的定量关系^[11]。而后通过静力推覆分析,将实际结构的能力曲线转化为等效非线性单自由度体系,进而可以由倒塌谱确定结构的地震倒塌风险^[12]。相对于文献^[9],倒塌谱考虑的因素更全面,理论上适用性也更广泛。

何政等^[13]也提出基于静力推覆分析确定结构

倒塌安全储备的方法。文献[13]的特点是对于某条选定的地震动,通过不断调节其弹塑性需求谱的大小,找到和结构能力曲线上倒塌点相交的弹塑性需求谱曲线,进而由这条弹塑性需求谱曲线来计算对应的倒塌地震动强度。文献[13]通过选择多条地震动,采用上述方法推算出多条地震动下倒塌地震动强度的中位值,从而确定结构的倒塌安全储备。该方法不需要进行弹塑性时程分析,同时也可以考虑多条地震动随机性的影响。

综上所述,这些评价方法简化了结构倒塌风险评价计算,但是准确性如何还缺少必要的对比研究。因此,本文采用 PKPM 软件,设计了 6 个尺寸相同,抗震波防烈度不同的钢筋混凝土(RC)框架结构,用上述三种简化评价方法评价这 6 个 RC 框架结构,在罕遇地震作用下的倒塌风险,将三种评价的方法的结果进行对比,分析不同方法的精度,为选择合适的结构倒塌风险简化评价方法提供参考。

1 简化评价方法

1.1 抗倒塌能力谱方法

施炜等^[10-12]在经典的 $R-\mu-T$ 谱基础上考虑了结构进入倒塌状态时的特性,基于 IDA 分析等效单自由度体系的抗倒塌能力,提出了抗倒塌能力谱的概念。倒塌谱如图 2 所示。

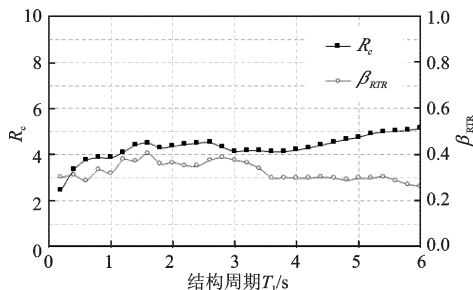


图 2 抗倒塌能力谱

Fig. 2 Collapse resistant capacity spectrum

图 2 中,横坐标为结构的基本周期 T_1 ,纵坐标为结构抗地震倒塌能力的中位值 R_c 和由于地震动随机性引起的不确定性 β_{RTR} ,不同曲线对应于不同的坐标值。使用该方法时,首先采用静力推覆分析,得到结构的骨架曲线,而后将骨架曲线等效为单自由度体系,并确定等效单自由度体系的周期、承载力和延性系数。根据得到的周期、承载力和延性系数,通过查阅图 2 中的倒塌谱,得到该等效单自由度体系的抗地震倒塌能力中位值 R_c 和对数标准差 β_{RTR}

曲线,进而由式(1)求出结构抗地震倒塌能力的中位值 η_c (即对应结构 50%倒塌率),由式(2)得到结构的倒塌易损性曲线,由此得到结构在地震动强度为 $S_a(T_1)$ 下的倒塌率。

$$\eta_c = \frac{F_y R_c}{m} \quad (1)$$

式中, F_y 为等效单自由度体系屈服承载力; R_c 为等效单自由度体系抗地震倒塌能力的中位值; m 为等效单自由度体系的振动质量。

$$P(\text{collapse} | S_a(T_1)) = \Phi\left(\frac{\ln S_a(T_1) - \ln \eta_c}{\beta_{RTR}}\right) \quad (2)$$

式中, $S_a(T_1)$ 为基本周期的拟加速度反应谱值。

1.2 基于推覆分析的位移安全储备系数法

文献[9]建议,通过推覆分析,可以得到结构的能力曲线和需求曲线(见图 3),采用能力-需求法(如 ATC-40^[14]建议的方法),找到能力曲线和需求曲线的交点,即结构在该地震动强度下的性能点。

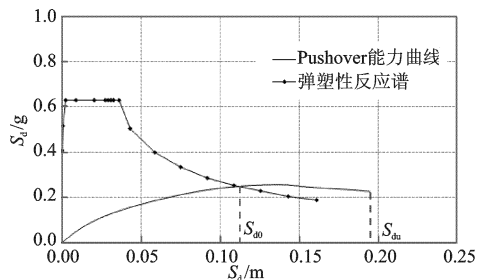


图 3 推覆计算曲线

Fig. 3 Pushover analysis curves

比较该性能点所对应的谱位移 S_{d0} 和结构推覆曲线的极限谱位移 S_{du} ,就可以求得结构推覆分析的位移安全储备系数 K_d 。这个系数在一定程度上反映了结构相对于性能点的抗倒塌储备大小。文献[9]通过 18 个算例分析,得到倒塌率和 K_d 的中位值关系见式(3)。

$$P_{\text{collapse}} | \text{MCE} = e^{-1.95K_d} \quad (3)$$

式中, MCE 为设计地震。

1.3 基于推覆分析的位移安全储备系数法

何政等^[13]也建议了一个通过推覆分析得到 CMR 的方法。其具体实现方法是:首先进行推覆分析得到能力曲线,确定结构的倒塌点;选取多条地震动并求出各条地震动的弹塑性需求谱;对一条需求谱进行调幅直到能力曲线上的倒塌点与需求谱重合,此时需求谱所对应的地震动强度为结构在该地震动作用下的倒塌强度(见图 4);依次求出各条地

震动作用下的倒塌强度,对数据进行对数正态分布拟合得到倒塌易损性曲线,求出地震强度的中位值确定结构的 CMR。

相比文献[9]而言,文献[13]直接采用多条地震动的需求谱来确定结构推覆分析的倒塌安全储备,而文献[9]采用规范反应谱来确定结构的倒塌安全储备。因此对于特定的地震动集合而言,由于其需求谱和规范反应谱之间存在差异,因此文献[13]准确性理论上应该更高一些。

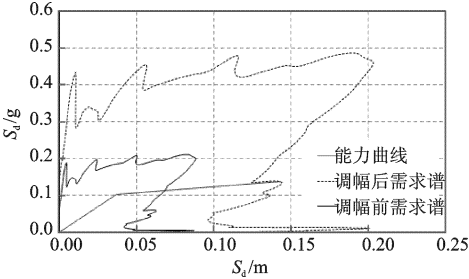


图 4 结构倒塌地震动强度的计算

Fig. 4 Calculation of collapse earthquake intensity of a RC frame

2 算例分析

本文研究的 6 个 RC 框架结构是采用 PKPM 软件设计,分别满足不同的抗震设防烈度要求。6 个框架所处的场地类别均为 II 类,设计地震分组第 1 组,建筑类别为丙类,设防烈度分别是 6 度,7 度(0.10g),7 度(0.15g),8 度(0.20g),8 度(0.30g),9 度(0.40g),层数均为 6 层,结构高度为 23.2 m,底层层高为 4.7 m,其他各层都为 3.7 m。纵向跨数 4 跨,跨度均为 8 m,横向跨数 3 跨,跨度分别为 6、3.6、6 m(图 5)。梁柱纵筋为 HRB400 级,箍筋为 HPB300 级,主要截面及混凝土强度等级见表 1。

采用清华大学开发的基于通用有限元软件 MSC. Marc 的 THUFIBER 程序^[15]建立分析模型。本文 IDA 倒塌易损性分析采用的地震动输入为

ATC-63^[16]建议选用地震集合中的 22 组(共 44 条水平分量)远场地震动记录。

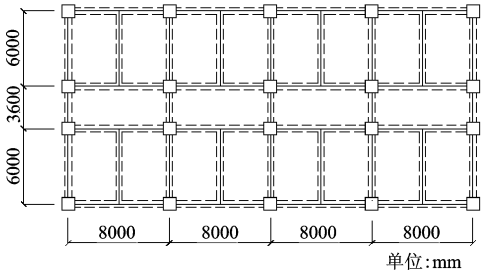


图 5 结构平面布置

Fig. 5 Plan layout of the frame structures

表 1 框架主要截面尺寸和混凝土强度等级

Table 1 Main section dimensions and concrete materials of RC frames

算例编号	梁、柱截面尺寸/mm	强度等级
6	梁 250×600;柱 500×500	梁 C30;柱 C30
7	梁 250×600;柱 500×500	梁 C30;柱 C30
7.5	梁 250×600;柱 500×500	梁 C30;柱 C30
8	梁 300×700;柱 600×600	梁 C30;柱 C40
8.5	梁 400×800;柱 900×900	梁 C30;柱 C40
9	梁 400×900;柱 1100×1100	梁 C30;柱 C40

3 结果对比

不同简化评价方法与 IDA 的计算结果对比见表 2 和表 3。可以看出不同简化评价方法的计算相差结果较大。文献[9]的结果和 IDA 结果差别相对较大;文献[13]CMR 的结果最精确但倒塌率的结果差别较大;文献[12]得到的倒塌率误差最小。由上述分析可以发现,由于倒塌易损性曲线在设防大震水准下的倒塌率很小,此时的倒塌率计算结果容易受到各种偶然因素的影响,因此相对误差容易变得很大。而 CMR 的计算结果则相对更稳定一些。但是从 CMR 推算结构的倒塌率需要知道倒塌易损性曲线的分布系数,这个系数如果取得不合适,也会影响倒塌率的计算结果。

表 2 CMR 计算结果

Table 2 The results of CMR of the different RC frames

算例 编号	IDA 的 CMR	文献[13]		文献[9]		文献[12]	
		CMR	与 IDA 相差比率	CMR	与 IDA 相差比率	CMR	与 IDA 相差比率
6 度	4.24	4.35	-3%	4.46	-5%	3.60	15%
7 度	3.27	3.33	-2%	2.74	16%	2.39	27%
7.5 度	2.78	2.90	-4%	1.46	47%	1.88	32%
8 度	3.42	3.07	10%	3.28	4%	1.98	42%
8.5 度	4.45	4.24	5%	7.57	-70%	2.52	43%
9 度	4.13	4.07	1%	9.24	-124%	2.27	45%

表 3 罕遇地震下倒塌率结果

Table 3 The results of the collapse risks of the different RC frames subjected to severe earthquake 单位: %

算例 编号	倒塌率			
	IDA 分析	文献[14]	文献[9]	文献[12]
6	0.75	0.03	0.65	0.07
7	3.05	0.19	4.54	1.56
7.5	4.11	0.54	19.18	3.62
8	2.80	0.16	2.46	0.68
8.5	0.30	0.00	0.02	0.02
9	0.01	0.00	0.00	0.21

4 结 论

本文研究了三种地震倒塌风险简化评估方法的计算精度,计算 6 层框架结构在不同抗震设防烈度下的倒塌率和 CMR,并与 IDA 结果比较得出:

(1)文献[13]确定框架结构的 CMR 具有较高的精度,但是该方法需要用到多条地震波参与计算,计算工作量较大;

(2)文献[12]在评估框架结构的倒塌率具有较好的精度,而且运用较方便;

(3)文献[9]计算过程更简化便于实际应用,与文献[1]的相关规定相联系,精度有待于提高。

需要说明的是,本文只对 6 层框架结构的计算结果进行了比较,故在模型样本在数量上和类别的多样性上是有限的,同时本文计算模型未考虑填充墙对主体结构的影响,故计算结果与实际情况难免出现偏差,这也是今后工作研究的方向。

参考文献:

[1] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of building: GB50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[2] American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7-10 [S]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2010.

[3] 建筑结构抗倒塌设计规范:CECS 392: 2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
Code for anti-collapse design of building structures: CECS 392: 2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)

[4] 施 炜,叶列平,陆新征,等. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力研究 [J]. 工程力学, 2011, 28(3):41-48.
Shi W, Ye L P, Lu X Zh, et al.. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3):41-48. (in Chinese)

[5] 施 炜,叶列平,陆新征. 基于一致倒塌风险的建筑抗震评价方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(6):1-7.
Shi W, Ye L P, Lu X Zh. Study on Uniform Collapse

Risk Evaluation Method for Building Structures under Earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2012,33(6):1-7. (in Chinese)

[6] Gogus A, Wallace J W. Seismic safety evaluation of reinforced concrete walls through FEMA P695 methodology [J]. Journal of Structural Engineering,2015, 141(10): 04015002-1-04015002-17.

[7] Li Y, Yin Y J, Ellingwood B R, et al. Uniform hazard versus uniform risk bases for performance-based earthquake engineering of light-frame wood construction [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics,2010,39: 1199-1217.

[8] Federal Emergency Management Agency. Quantification of Building Seismic Performance Factors: FEMA P695[S]. Washing D. C: Federal Emergency Management Agency, 2009.

[9] 陆新征,张万开,柳国环. 基于推覆分析的 RC 框架地震倒塌易损性预测 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4):1-6.
Lu X Zh, Zhang W K, Liu G H. Prediction of seismic collapse vulnerability of RC frame based on pushover analysis method [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4):1-6. (in Chinese)

[10] 施 炜,叶列平,陆新征. 抗倒塌能力谱研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(10):1-7.
Shi W, Ye L P, Lu X Zh. Study of collapse resistant capacity Spectrum [J]. Journal of Building Structure, 2012,33(10):1-7. (in Chinese)

[11] 施 炜,叶列平,陆新征. 单自由度结构体系抗地震倒塌能力研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(9):82-90.
Shi W, Ye L P, Lu X Zh. Study on seismic collapse capacity of single-degree-of-freedom structural system [J]. Journal of Building Structures,2014,35(9):82-90. (in Chinese)

[12] 施 炜,叶列平,陆新征. 基于单自由度体系的钢筋混凝土框架倒塌易损性预测方法研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(10):73-81.
Shi W, Ye L P, Lu X Zh. Study of seismic collapse fragility evaluation method for multiple-story RC frames based on single-degree-of freedom system[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (10): 73-81. (in Chinese)

[13] 何 政,欧晓英,程智慧. 基于推覆分析的结构倒塌安全储备系数[J]. 工程力学,2014,31(6):197-202.
He Zh, Ou X Y, Cheng Zh H. Determination of structural collapse margin ratio using pushover analysis [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (6): 197-202. (in Chinese)

[14] Applied Technology Council. Scismic evaluation and retrofit of concrete buildings: ATC-40[S]. California: Applied Technology Council,1996.

[15] 陆新征,叶列平,缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:37-104, 143-162,271-283.
Lu X Zh, Ye L P, Miao Zh W. Elasto-plastic analysis of building against earthquake[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009:37-104,143-162, 271-283. (in Chinese)

[16] Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors: ATC-63[S]. California: Applied Technology Council, 2009.