

孟丽.基于增量动力分析方法的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估[J].地震工程学报,2020,42(1):52-56.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.052

MENG Li.Anti-collapse Reliability Evaluation with Respect to the High-Rise Building Frame Structures Based on Incremental Dynamic Analysis[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(1):52-56.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.052

# 基于增量动力分析方法的高层建筑 框架结构抗倒塌可靠性评估

孟 丽<sup>1,2</sup>

(1. 郑州理工职业学院 建筑工程系, 河南 郑州 451152; 2. 天津理工大学, 天津 300000)

**摘要:**传统方法对高层建筑框架结构抗倒塌可靠性进行评估时,只是单纯的从整体角度进行分析,导致得到的结果不够精确,无法准确反映出高层建筑框架结构的抗倒塌能力。文章提出了基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法,对高层建筑框架结构安全储备进行详细分析,获取建筑框架结构倒塌储备系数;在此基础上,采用增量动力分析法设定高层建筑框架结构抗倒塌能力系数,并根据该系数得到高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估流程。测试结果表明,所提方法得出的评估结果可信度较高,实现了高层建筑框架结构抗倒塌的准确评估。

**关键词:**高层建筑; 框架结构; 抗倒塌; 可靠性; 评估

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0052-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.052

## Anti-collapse Reliability Evaluation with Respect to the High-Rise Building Frame Structures Based on Incremental Dynamic Analysis

MENG Li<sup>1,2</sup>

(1. Department of Architectural Engineering, Zhengzhou Polytechnic Vocational College, Zhengzhou 451152, Henan, China;

2. Tianjin University of Technology, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** The traditional methods used to evaluate the anti-collapse reliability of the high-rise building frame structures simply analyze the structures from the overall point of view, resulting in inaccurate results and inaccurate reflection of the collapse resistance of high-rise building frame structures. In this study, a method is proposed to evaluate the anti-collapse reliability of the high-rise building frame structures based on incremental dynamic analysis (IDA). Further, the safety reserve of a high-rise building frame structure is subjected to detailed analysis, and the collapse reserve coefficient of the building frame structure is obtained. The IDA method is used to set the collapse resistance capacity ratio of the high-rise building frame structure, and the anti-collapse reliability of the structure is evaluated according to the coefficient. The test results denote that the evaluation results obtained using the proposed method exhibits considerable reliability and

收稿日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(71001011)

第一作者简介: 孟 丽(1987-), 女, 河南郑州人, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 工程管理。E-mail: lanmeng12002@163.com。

that the collapse resistance of the high-rise building frame structures can be accurately evaluated.

**Keywords:** high-rise building; frame structure; anti-collapse; reliability; evaluation

## 0 引言

在我国经济快速发展,城市化进程不断推进的背景下,建筑领域的发展也迅猛,尤其是高层建筑量不断增加。为了保证人们生命和财产的安全,对高层建筑框架结构抗倒塌可靠度评估成为当下研究的重点<sup>[1-2]</sup>。目前,已经有很多专家学者们对其进行研究,并取得了一些研究成果<sup>[3]</sup>。

例如,基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法。该方法将地震剪力转换成一种平行力作用在高层建筑框架结构上,以此来实现对高层建筑的抗倒塌性能分析,完成评估。虽然该方法实施步骤比较简单,但是存在评估不准确的现象。基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估,该方法充分考虑高层建筑结构在地震评估中的不确定性,利用概率的方式来计算出高层建筑结构的抗倒塌性能,并对其进行评估。该方法评估效率较高,但是也存在着评估准确度较低的问题<sup>[4]</sup>。

针对这种情况,提出了基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法。测试结果表明,所提方法实现了高层建筑框架结构抗倒塌的准确评估。

## 1 获取高层建筑框架结构倒塌储备系数

对高层建筑框架结构(目标建筑框架整体结构)安全储备系数进行全面的分析,并将其分成高层建筑构件和框架结构体系的安全储备两个方面,利用固体力学求出地震发生时对高层建筑框架结构整体安全储备的影响。

目标建筑框架整体结构是利用多种建筑构件组成的架构,为此,目标建筑框架整体结构的安全储备可以分为目标建筑框架整体结构构件的安全储备和目标建筑框架整体结构体系的安全储备。

在目标建筑框架整体结构抗倒塌可靠度评估的过程中,利用下式给出目标建筑框架整体结构的构件层次安全储备表达式:

$$\gamma_L S \leq \varphi R \left[ \frac{f_m}{\gamma_m} \right] \quad (1)$$

式中: $S$  为目标建筑框架整体结构抗强震的作用效应; $\gamma_L$  为目标建筑框架整体结构抗强震作用的效应系数; $R$  为目标建筑框架整体结构构件抗倒塌函数; $\gamma_m$  为目标建筑框架整体结构的建筑使用材料系数;

$\varphi$  为目标建筑框架整体结构强度系数; $f_m$  为建筑使用材料的强度系数。

在目标建筑框架整体结构抗倒塌可靠性评估的过程中,目标建筑框架整体结构构件层次的安全储备中包括  $\gamma_L$ 、 $\gamma_m$  和  $\varphi$ 。并且它主要取决于目标建筑框架整体结构的承载力储备,利用  $R$  来表示目标建筑框架整体结构的强度折减系数,利用  $Cd$  表示目标建筑框架整体结构的失效机制,利用下式表示为:

$$Cd = (R_{(stoy1)} \cup \Omega_{(stoy2)}) \quad (2)$$

如果想得到目标建筑框架整体结构中最薄弱的连结结构与合理建筑结构一样的破坏概率,就要提高目标建筑框架整体结构的全局承载力<sup>[5]</sup>,利用式(3)给出其表达式:

$$Cd = (R_{(stoy1)} \cap \Omega_{(stoy2)}) \quad (3)$$

在对目标建筑框架整体结构可靠性评估的过程中,在不考虑竖向强震时,利用式(4)给出地震反应的表达式:

$$E = pE_h \quad (4)$$

式中: $p$  为目标建筑框架整体结构冗余度系数; $E_h$  为目标建筑框架整体结构根据反应谱得到的水平地震作用。

利用上述目标建筑框架整体结构冗余度系数得到目标建筑框架整体结构体系层次的安全储备,则目标建筑框架整体结构冗余度系数的表达式:

$$p = 2 - \frac{6.1}{r_{\max} \sqrt{A}} \quad (1.0 \leq p \leq 1.5) \quad (5)$$

式中: $A$  为目标建筑框架整体结构的楼层面积; $r_{\max}$  为目标建筑框架整体结构最大地震层剪力分担系数。

当目标建筑框架整体结构中的地震层剪力比重较大时,也就是  $r_{\max}$  较大时,说明目标建筑框架整体结构的冗余度会发生不同程度的降低,也可以看成是目标建筑框架整体结构构件被损坏,则目标建筑框架整体结构倒塌的几率就会变大,所以,当  $p$  所代表的目标建筑框架整体结构冗余度系数也就会相对应的变大,以此来提高目标建筑框架整体结构承载力储备,增强目标建筑框架整体结构抗倒塌的能力<sup>[6]</sup>。

将目标建筑框架整体结构的地面运动强度和目标建筑框架整体结构设计的地震强度相比,可以得到目标建筑框架整体结构的抗倒塌储备系数:

$$CMR = S_a(T_1)_{50\%} / S_a(T_1) \quad (6)$$

式中:  $S_a(T_1)_{50\%}$  为当有 50% 地震输入时出现倒塌所对应的目标建筑框架整体结构的地面运动强度 ( $S_a(T_1)$ )。

## 2 高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估的实现

在获取高层建筑框架结构倒塌储备系数的基础上,对框架结构的抗倒塌可靠性进行评估。由于地震波振动带具有任意性,并且震源和传播路径等因素都会对它造成一定影响<sup>[7-8]</sup>,所以在多条地震波作用下,目标建筑框架整体结构的抗倒塌表达式为:

$$P_{\text{倒塌}} = n_{\text{倒塌}} / N < [P_{\text{倒塌}}] \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{倒塌}}$  为目标建筑框架整体结构在  $N$  条地震波作用下实现倒塌极限状态的概率;  $n_{\text{倒塌}}$  为目标建筑框架整体结构实现倒塌破坏的地震波数;  $[P_{\text{倒塌}}]$  代表目标建筑框架整体结构倒塌概率,该值在一般情况下都可以进行设定。在多条地震波作用下,当目标建筑框架整体结构倒塌频率比  $[P_{\text{倒塌}}]$  还要高,这也就是说目标建筑框架整体结构达到了倒塌极限。

增量动力分析是指对相关强度地震进行记录,对目标建筑框架整体结构的弹塑性进行研究,得到目标建筑框架整体结构在不同强度地震动作用下的状态<sup>[9-10]</sup>。文中引入增量动力分析法设定目标建筑框架整体结构抗倒塌能力系数  $R$ ,利用  $R$  对目标建筑框架整体结构抗倒塌可靠性进行评估,则:

$$R = IM_c / IM_{MCF} \quad (8)$$

式中:  $IM_c$  为在多条地震波作用下目标建筑框架整体结构没有倒塌的极限情况下所能承受的最大地震动强度;  $IM_{MCF}$  为强地震下地震波波动的强度。

当  $R \geq 1$  时,说明目标建筑框架整体结构在强地震下倒塌概率不大于  $[P_{\text{倒塌}}]$ ,  $R$  越大,目标建筑框架整体结构在强地震下的抗倒塌的可靠性能越好;当  $R < 1$  时,这时目标建筑框架整体结构在强震下的倒塌概率远远大于  $[P_{\text{倒塌}}]$ ,则目标建筑框架整体结构抗倒塌可靠性就越差<sup>[11]</sup>。

将强震动峰值加速度的反应谱值当作是地震动强度指标  $IM$ 。

根据倒塌性能系数  $R$  得到强震下目标建筑框架整体结构抗倒塌可靠性评估流程,如图 1 所示。

综上所述,完成对强震下高层建筑框架结构抗倒塌可靠性的评估。

## 3 实验与仿真证明

为了验证所提基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法的综合有效性,需要

进行一次测试,测试环境为 intelCore3-530 8G 内存,操作系统为 Windows7。分别采用所提方法和基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法对高层建筑框架结构进行抗倒塌可靠性评估分析。

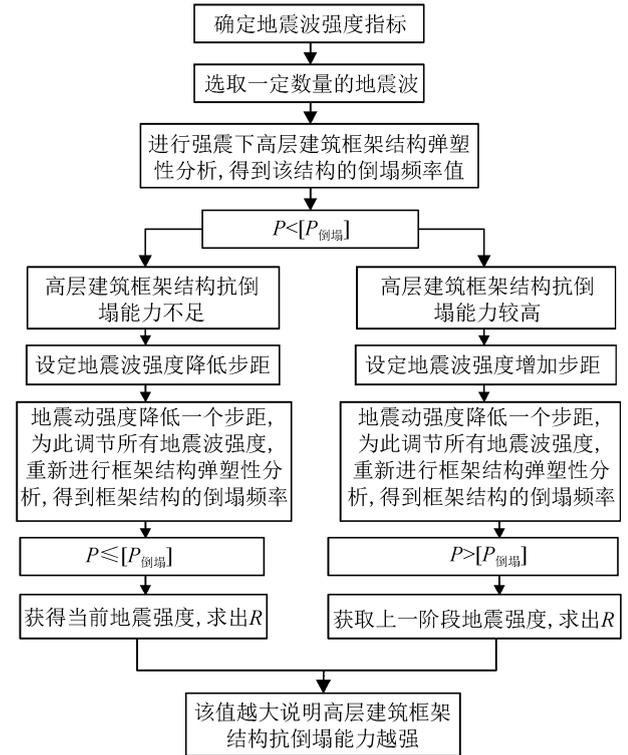


图 1 高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估流程

Fig.1 Anti-collapse reliability evaluation process of high-rise building frame structures

根据前文所述的基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法,构造球面均匀分布生成的随机点(星形数据点),分析得到的高层建筑框架结构的倒塌概率(图 2 中的数据点),按照对数正态分布进行拟合,以此获取倒塌概率曲线(图 2 中的曲线),也可以称作为结构易损性曲线。

基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法是在大量计算次数基础之上完成的,文中对高层建筑框架结构,进行一万次随机抗倒塌分析,认为该结果具有足够的可靠度,绘制出高层建筑框架结构的倒塌易损性曲线如图 3 所示。图 3 中,方法 1 代表基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法;方法 2 代表所提方法。

由图 3 可知,所提方法与基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法两条易损性曲线非常相近,说明所提的基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法和基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法得到的结果基本一致,因

为基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法具有较高的可信度,所以所提出基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法也具有较高的可信度,可用于高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估。

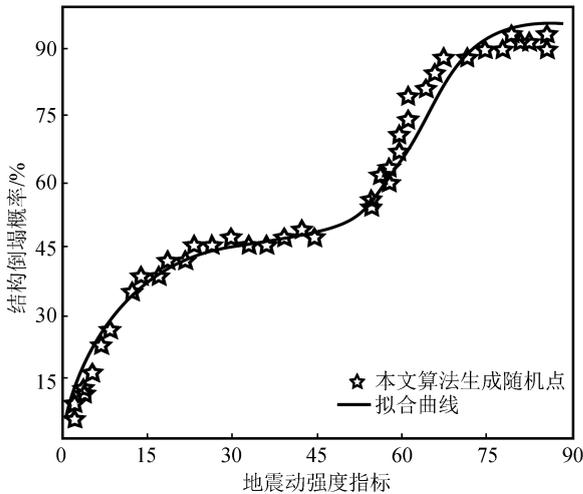


图 2 高层建筑框架结构倒塌易损性曲线

Fig.2 Collapse fragility curve of the high-rise building frame structure

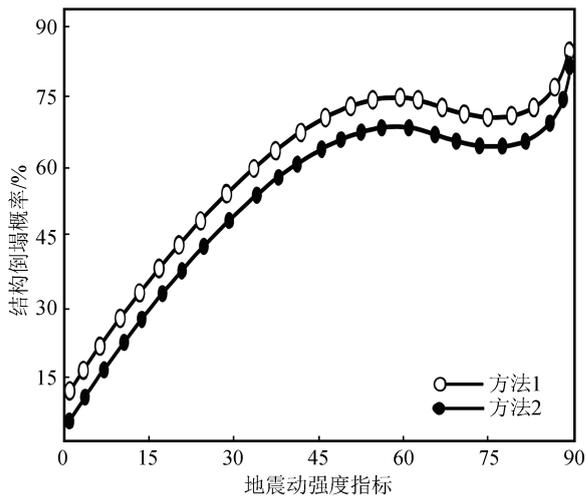


图 3 不同方法易损性曲线对比

Fig.3 Comparison of vulnerability curves for different methods

将所提方法与基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法和基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法进行评估准确度(%)对比实验,实验结果如图 4 所示,图 4 中,方法 1 代表所提方法;方法 2 代表基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法;方法 3 代表基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法。

表 1 高层建筑框架结构抗倒塌性能指标

Table 1 Anti-collapse performance indexes of the high-rise building frame structure

地震类别	性能指标/%	计算结果
罕见地震	地面运动强度	4.46
	倒塌率	0.13
	倒塌储备系数	7.11
	可靠指标	2.48
增加一级罕见地震	地面运动强度	8.14
	倒塌率	1.11
	倒塌储备系数	4.21
	可靠指标	2.12
强地震	地面运动强度	11.21
	倒塌率	2.80
	倒塌储备系数	2.45
	可靠指标	1.35

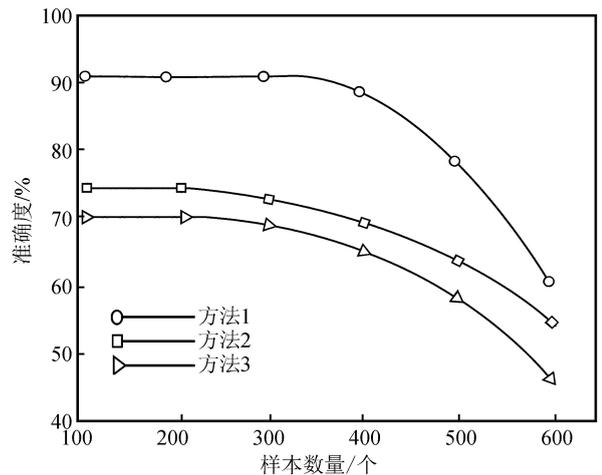


图 4 不同方法评估准确度对比实验

Fig.4 Comparative experiment for evaluating accuracy of different methods

分析图 4 可知,3 种方法随着样本数量的不断增加,抗倒塌可靠性评估准确度都发生一定程度的改变。所提方法随着样本数量的不断增加,抗倒塌可靠性评估准确度大约处于 90%~62% 区间范围内进行浮动;基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法随着样本数量的不断增加,抗倒塌可靠性评估准确度大约处于 85%~55% 区间范围内进行浮动;基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法随着样本数量的不断增加,抗倒塌可靠性评估准确度大约处于 70%~46% 区间范围内进行浮动,通过对比可知,所提方法抗倒塌可靠性评估准确度明显高于基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法和基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法抗倒塌可靠性评估的准确度,说明所提方法评估准确度较高,具有一定的应用价值。

将所提方法和基于振型分解的高层建筑结构抗

倒塌评估方法与基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法进行评估时间消耗(s)对比实验,实验结果如表2所示。表2中,方法1代表基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法;方法2代表基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法;方法3代表所提方法。

表2 不同方法评估时间消耗对比实验

Table 2 Comparative experiment for evaluating time consumption of different methods

方法	样本数量 /个	时间消耗 /s	样本数量 /个	时间消耗 /s
方法1	100	38	300	49
方法2	100	26	300	36
方法3	100	12	300	17

分析表2可知,当样本数量为100个和300个时,所提方法评估时间消耗都远远小于基于振型分解的高层建筑结构抗倒塌评估方法和基于概率的高层建筑结构抗倒塌评估方法评估的时间消耗,说明所提方法具有较高的评估效率。原因在于所提方法对高层建筑框架结构安全储备进行详细分析,获取建筑框架结构倒塌储备系数,大大的节省了高层建筑结构抗倒塌可靠性评估的时间消耗。

## 4 结语

提出基于增量动力分析的高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估方法。该方法对高层建筑框架结构安全储备进行详细分析,得到建筑框架结构倒塌储备系数,采用增量动力分析法设定高层建筑框架结构抗倒塌能力系数,并根据该系数来得到高层建筑框架结构抗倒塌可靠性评估流程。测试结果表明,所提方法实现了高层建筑框架结构抗倒塌的准确评估,可以为相关研究提供一定的参考价值。

## 参考文献(References)

[1] 裴兴旺,李慧民,孟海,等.既有建筑结构安全性检测过程质量脆弱性评价[J].中国安全生产科学技术,2017,31(1):181-186. PEI Xingwang, LI Huimin, MENG Hai, et al. Quality Vulnerability Assessment on Safety Testing Process of Existing Building Structure[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 31(1): 181-186.

[2] 朱亚明.基于大数据的建筑火灾风险预测[J].消防科学与技术,2017,36(7):1011-1013. ZHU Yaming. Data-driven Fire Risk Prediction System[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(7): 1011-1013.

[3] 陈骥,邹树梁,唐德文,等.基于灰色关联度的集对分析方法在高层建筑火灾危险性评价中的应用[J].中国安全生产科学技

术,2015,23(5):138-143.

CHEN Yi, ZOU Shuliang, TANG Dewen, et al. Application of Set Pair Analysis Method Based on Gray Correlation in Fire Risk Assessment of High-rise Buildings[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 23(5): 138-143.

- [4] 李沛豪,刘崇奇.基于改进蚁群算法的结构抗震优化设计[J].空间结构,2017,23(2):42-47. LI Peihao, LIU Chongqi. Seismic Optimal Design of Structure Based on Improved ant Colony Algorithm[J]. Spatial Structures, 2017, 23(2): 42-47.
- [5] 杨理臣,卢宁,樊光洁,等.青海玉树7.1级地震灾后重建地区房屋地震易损性研究[J].地震工程学报,2016,38(2):314-318. YANG Lichen, LU Ning, FAN Guangjie, et al. The Analysis of Vulnerability of Reconstruction Buildings in the Area Stricken by Yushu 7.1 Earthquake, Qinghai[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 314-318.
- [6] 付建.随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J].地震工程学报,2018,40(2):54-58. FU Jian. Research on Seismic Performance Testing Method of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Random Vibrations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 54-58.
- [7] 余相明.火灾中无明显征兆建筑倒塌分析及启示[J].消防科学与技术,2015,237(9):113-115. YU Xiangming. Analysis and Enlightenment of Building Collapse with No Obvious Premonition[J]. Fire Science and Technology, 2015, 237(9): 113-115.
- [8] 赵杰,孙晓艳,霍林生.运用防屈曲支撑的混凝土框架结构的抗震性能研究[J].地震工程学报,2015,24(1):100-105. ZHAO Jie, SUN Xiaoyan, HUO Linsheng. Seismic Performance of Concrete Frame Structures with Buckling-restrained Braces[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 24(1): 100-105.
- [9] 靳海亮,李留磊,袁松鹤,等.一种用于三维城市建筑物的可视域分析算法[J].测绘通报,2018,490(1):103-106. JIN Hailiang, LI Liulei, YUAN Songhe, et al. A Viewshed Analysis Algorithm for 3D Urban Buildings[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, 490(1): 103-106.
- [10] 徐照,李苏豪,陈楠,等.基于点云的建筑物表面损伤三维重建与属性提取方法[J].土木工程与管理学报,2018,35(03):32-37+55. XU Zhao, LI Suhao, CHEN Nan, et al. 3D Reconstruction and Attribute Extraction of Building Superficial Defects Based on Point-cloud[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(03): 32-37+55.
- [11] 邓传军,欧阳斌,陈艳红.一种基于PSO-BP神经网络的建筑物沉降预测模型[J].测绘科学,2018,240(6):30-34,41. DENG Chuanjun, OUYANG Bin, CHEN Yanhong. A Building Settlement Prediction Model Based on PSO-BP Neural Network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 240(6): 30-34, 41.