

王会. 地震波冲击下高层建筑震害危险性评估模型分析[J]. 华南地震, 2020, 40(4): 146-151. [WANG Hui. Analysis of Seismic Hazard Assessment Model of High-rise buildings under Seismic Wave Impact[J]. South China journal of seismology, 2020, 40(4): 146-151]

# 地震波冲击下高层建筑震害危险性评估模型分析

王 会

(连云港职业技术学院, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 震害危险性评估是城市抗震防灾规划的主要工作之一, 设计地震波冲击下高层建筑震害危险性评估模型。选取上海市某 27 层建筑物为评估对象, 获取建筑详细信息; 以加速度峰值为输入地震波的地震动无量纲化指标, 利用地震反应谱计算有效峰值加速度等地震动峰值参数。将评估对象的详细信息和不同工况条件下地震波组合输入 Abaqus 软件中, 利用震害危险性指数定性描述高层建筑在地震波冲击下的破坏程度。优化主震、余震地震波下高层建筑结构震害危险性指数和主震、余震峰值加速度之间相关性的回归模型, 构建震害危险性评估模型, 并分析主震地震烈度、主震地震波冲击下高层建筑破坏指数等四个模型影响因子。将震害危险性指数与震害危险等级相结合, 用无危险、轻度危险、中度危险、重度危险和极度危险五个等级描述地震波冲击下高层建筑震害危险性。实验结果显示该模型评估精度与评估效率均优于对比模型。

**关键词:** 地震波冲击; 高层建筑; 震害; 危险性评估; 峰值加速度; 破坏指数

**中图分类号:** P315.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662(2020)04-00146-006

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2020.04.020

## Analysis of Seismic Hazard Assessment Model of High-rise buildings under Seismic Wave Impact

WANG Hui

(Lianyungang Technical College, lianyungang 222000, China)

**Abstract:** Seismic hazard assessment is one of the main tasks in urban seismic disaster prevention planning. A 27-story building in Shanghai was selected as the evaluation object to obtain the detailed information of the building. Taking the peak acceleration as the dimensionless index of the input seismic wave, the effective peak acceleration and other peak parameters of the ground motion are calculated by using the response spectrum of the ground motion. The detailed information of the evaluation object and the seismic wave combination under different working conditions were input into Abaqus software, and the seismic hazard index was used to qualitatively describe the damage degree of high-rise buildings under the seismic wave impact. The regression model of the correlation between the seismic hazard index of high-rise buildings under main earthquake and aftershock seismic waves and the peak acceleration of main earthquake and aftershock was optimized, the seismic hazard assessment model was constructed, and the influence factors of the four models, including the intensity of main earthquake and the damage index of high-rise buildings under main earthquake waves, were analyzed. Combining the risk index of earthquake damage with the risk level of earthquake damage, five levels of no risk, mild risk, moderate risk, severe risk and extreme risk were used to describe the risk of earthquake damage of

收稿日期: 2019-05-10

作者简介: 王会(1982-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事建筑结构, 建筑信息化 BIM 技术研究。

E-mail: wh0603@126.com

high-rise buildings under the impact of seismic waves. Experimental results show that the accuracy and efficiency of the model are better than the comparison model.

**Keywords:** Seismic wave impact; High-rise buildings; Earthquake damage; Risk assessment; Peak acceleration; Damage index

0 引言

随着社会经济的高速发展和科学技术的进步，建筑材料性能与建筑工艺的提升使高层建筑结构体系得到快速发展，高层建筑在城市中所占比例越来越大<sup>[1]</sup>，成为城市建设不可或缺的主要元素和靓丽风景。通常情况下高层建筑主要用于银行、电力、医院、企业等办公建筑，其中聚集着大量人员与经济财富，其安全性对于城市的稳定与发展具有极为重要的影响<sup>[2]</sup>。过去几十年中，高层建筑在地震波冲击下产生严重破坏的案例层出不穷<sup>[3]</sup>，如 2018 年 9 月 28 日印度尼西亚发生 7.4 级地震，震源深度 10 km，大量高层建筑受到毁坏，共造成 2256 人死亡，2019 年 6 月 17 日四川宜宾市发生 6.0 级地震，震源深度 16 km，造成大量高层建筑在下部折断，无法继续使用被迫拆除。

由此可知，准确评估地震波冲击下高层建筑震害危险对预测城市地震损失、快速恢复城市运行产生重要作用<sup>[4]</sup>。

当前评估震害危险性的主要方法有基于变形和累积耗能的评估方法和基于 LM-BP 神经网络的评估模型<sup>[5,6]</sup>，前者将层间位移角作为震害危险性评估指标，优化 Park-Ang 震害模型，计算构建单调荷载条件下的极限位移；后者选取建筑层数、柱面积率以及建筑高度等振害危险性影响因子，构建基于 LM 算法的 BP 神经网络震害危险性评估模型。但上述方法只考虑一次性地震波对建筑的影响，而实际地震中，大部分强地震都伴随着强余震<sup>[7]</sup>，余震对于高层建筑的震害危险性不容忽视。基于此设计地震波冲击下高层建筑震害危险性评估模型，考虑余震对于高层建筑的震害危险性，实现高层建筑震害危险性准确评估。

1 高层建筑震害危险性评估

1.1 选取评估对象

评估对象选取上海市一座集商业、办公为

一体的高层建筑，如图 1 所示。该建筑采用钢筋混凝土结构，建筑共 27 层，地下 2 层，地上 25 层。评估对象具体信息如表 1 所示。

表 1 评估对象具体信息  
Table 1 Specific information of evaluation objects

属性	数据
所在城市	上海
层数	27 层
高度	86.3m
修建年代	2012 年
场地类型	II 类第二组
设防烈度	7 度
抗震设防类别	丙类
结构类型	钢筋混凝土框架剪力墙结构



图 1 评估对象  
Fig.1 Evaluation object

## 1.2 设定地震动及其反应谱峰值参数

评估过程中输入地震波的地震动无量纲化指标为地震波加速度峰值<sup>[8]</sup>, 规范处理, 描述为 0.1 g。利用地震动反应谱计算地震动峰值参数<sup>[9]</sup>: 有效峰值加速度、有效峰值速度、优化有效峰值加速度和优化有效峰值速度, 各参数计算公式为:

$$A = \frac{W_a}{2.5} \quad (1)$$

$$V = \frac{W_v}{2.5} \quad (2)$$

$$IA = \frac{W'_a(T_{PA}-0.2s, T_{PA}+0.2s)}{2.5} \quad (3)$$

$$IA = \frac{W'_v(T_{PV}-0.2s, T_{PV}+0.2s)}{2.5} \quad (4)$$

式(1)~(4)中,  $W_a$  为地震动时间  $T$  为  $0.3 \pm 0.2$  s 内的加速度反应谱平均值,  $W_v$  为地震动时间  $T$  为  $1.6 \pm 0.8$  s 内的速度反应谱平均值,  $W'_a$  和  $T_{PA}$  分别表示地震动  $T_1 \sim T_2$  段加速度反应谱均值和加速度与速度反应谱峰值对应的周期,  $W'_v$  和  $T_{PV}$  分别表示地震动  $T_2 \sim T_3$  段加速度反应谱均值和加速度与速度反应谱峰值对应的周期。

## 1.3 震害危险性评估模型

在 Abaqus 分析软件中输入评估对象具体信息和不同工况条件下的地震波组合。由于强烈地震发生后通常伴随着强烈余震, 因此, 在评估过程中考虑余震地震波对高层建筑的震害。利用震害危险性指数定性描述高层建筑在地震波冲击下的危险程度<sup>[10]</sup>。式(5)描述主震地震波下高层建筑结构震害危险性指数、余震地震波下高层建筑结构震害危险性指数、主震峰值加速度、余震峰值加速度之间的相关性:

$$\phi = \phi_0 + k \frac{A_g^1}{A_h^m} \phi_0 + \gamma_i \quad (5)$$

式(5)中,  $\phi$  和  $\phi_0$  分别表示余震下高层建筑整体结构震害危险性指数和主震下高层建筑结构震害危险性指数;  $A_g$  和  $A_h$  分别表示余震峰值加速度和主震峰值加速度;  $k$ 、 $l$ 、 $m$  和  $\gamma_i$  分别表示统计回归系数和随机变量。

对式(5)的回归模型进行优化, 得到:

$$G = \left[ R_2 k + \frac{R_3^1}{R_3^m} R_2 + n \right] \cdot a \quad (6)$$

式(6)中,  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  分别表示主震地震烈度、

主震地震波冲击下破坏指数和余震地震烈度;  $n$  和  $a$  分别表示回归系数和高层建筑修建年份修正系数。

## 1.4 震害危险性评估模型影响因子分析

震害危险性评估模型对于城市地震损失预测与城市运行恢复的作用主要通过判断高层建筑是否可继续使用, 是否需要修缮, 是否需要拆除来体现。因此在选取评估模型影响因子时需以时效性为标准<sup>[11]</sup>, 通过对影响因子的权重分析后, 确定主震地震烈度、主震地震波冲击下高层建筑破坏指数、余震地震烈度、修建年代修正系数为震害危险评估模型的影响因子。

四个影响因子中, 高层建筑结构受主震地震烈度影响显著, 相关抗震标准大多针对结构受主震地震烈度影响而制定。

主震地震波冲击下高层建筑破坏指数对于高层建筑的破坏程度发挥决定性影响<sup>[12]</sup>, 主震地震波冲击下高层建筑破坏指数计算过程如下:

$$R_A = \text{MAX}\{R_1, R_2, \dots, R_S\} \quad (7)$$

式(7)中,  $R_i$  ( $1, 2, \dots, S$ ) 和  $R_A$  分别表示主震地震波冲击下高层建筑第  $i$  个细部破坏程度评估系数和评估系数最大值。

$$F_j = R_A + \beta \log_a \left( \sum_{i=1, j \neq A}^S R_i + 1 \right) \quad (8)$$

式(8)中,  $F_j$  和  $a$ 、 $\beta$  分别表示主震地震波冲击下高层建筑第  $j$  个细部破坏指数和修正系数。

$$F_h = \{F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_m\} \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m\}^T \quad (9)$$

式(9)中,  $F_h$  和  $v_j$  分别表示主震地震波冲击下高层建筑整体破坏指数和第  $j$  个细部的权重值。

大量震害相关资料显示, 高层建筑在主震地震波冲击下并未出现折断、倒塌等情况; 余震地震波冲击后, 高层建筑震害危险性叠加提升, 可能出现折断、倒塌等情况。

随着建筑科学与建筑技术的不断发展, 越来越多的高层建筑抗震性能影响因素被发觉研究, 高层建筑设计规范也随之不断完善。因此, 不同年代修建的高层建筑抗震性能也有所差异<sup>[13]</sup>, 震害危险性评估模型中利用高层建筑年代修正系数优化高层建筑震害危险性指数, 表2所示为不同修建年代的修正系数。

表 2 不同修建年代的修正系数	
Table 2 Correction factors for different construction years	
规范标准出台年代	修正系数
1989 年规范标准	1
2001 年规范标准	0.89
2008 年规范标准	0.79
2010 年规范标准	0.77

1.5 高层建筑震害危险性等级划分

地震结束后通常利用震害危险性等级描述地震波冲击下高层建筑破坏程度，依照高层建筑结构建设相关法律法规的要求，将地震波冲击下高层建筑震害危险性划分成五个等级<sup>[14]</sup>，分别是：无危险、轻度危险、中度危险、重度危险和极度危险。地震工程学与建筑学领域的相关学者将震害危险性等级与震害危险性指数相结合，每一个震害危险性等级分别对应着相应的震害危险性指数区间<sup>[15]</sup>，两者之间的对应关系如表 3 所示。

表 3 震害危险性等级与震害危险性指数间的对应关系	
Table 3 Correspondence between earthquake damage risk level and earthquake damage risk index	
震害危险性等级	震害危险性指数区间
无危险	0~0.1
轻度危险	0.1~0.4
中度危险	0.4~0.6
重度危险	0.6~0.9
极度危险	0.9~1

2 实验分析

2.1 评估测试

2012 年 9 月，贵州省云贵交界处发生双震型地震，主震震级达到 5.7 级，余震震级达到 5.5 级，地震波如图 2 所示。

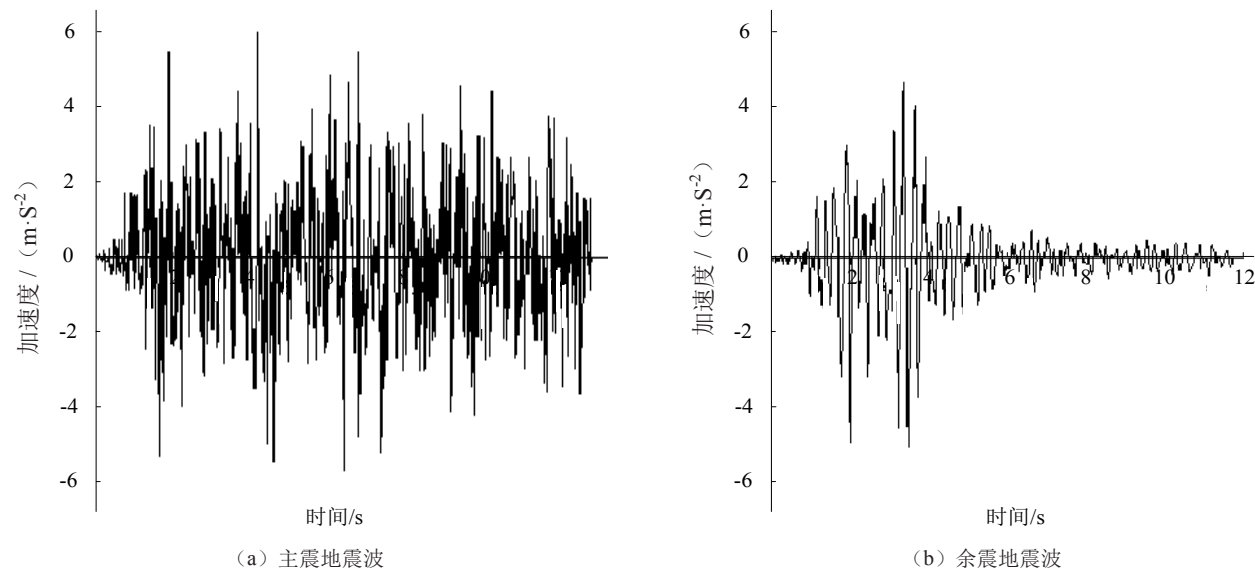


图 2 云贵交界处双震型地震波  
Fig.2 Double seismic waves at the junction of Yunnan and Guizhou

此次地震导致震源中心多处高层建筑形成震害破坏，因此本文以此次地震为例，利用此次地震后相关部门采集的震害危险性数据检验本文模型评估结果的可靠性。相关部门震后分析资料显示此次地震中主震与余震烈度均为 7

度，在出现震害破坏的高层建筑中选取 10 栋作为评估对象，将评估对象的相关数据输入 Abaqus 分析软件中，利用本文模型评估所选对象的震害危险性，结果如表 4 和表 5 所示。



表 4 本文模型评估结果  
Table 4 Evaluation results of this model

高层建筑序号	1	2	3	4	5
主震地震烈度	7	7	7	7	7
主震地震波冲击下高层建筑破坏指数	0.06	0.13	0.15	0.22	0.25
余震地震烈度	7	7	7	7	7
本文模型震害危险指数评估结果	0.21	0.34	0.37	0.47	0.52
本文模型震害危险等级评估结果	轻度危险	轻度危险	轻度危险	中度危险	中度危险
高层建筑序号	6	7	8	9	10
主震地震烈度	7	7	7	7	7
主震地震波冲击下高层建筑破坏指数	0.19	0.17	0.33	0.36	0.27
余震地震烈度	7	7	7	7	7
本文模型震害危险指数评估结果	0.43	0.39	0.63	0.68	0.45
本文模型震害危险等级评估结果	中度危险	轻度危险	重度危险	重度危险	中度危险

表 5 本文模型评估结果与实际结果的对比  
Table 5 Comparison of model evaluation results in this paper and actual results

高层建筑序号	1	2	3	4	5
本文模型震害危险指数评估结果	0.21	0.34	0.37	0.47	0.52
本文模型震害危险等级评估结果	轻度危险	轻度危险	轻度危险	中度危险	中度危险
实际震害危险指数	0.19	0.35	0.34	0.46	0.54
实际震害危险等级	轻度危险	轻度危险	轻度危险	中度危险	中度危险
高层建筑序号	6	7	8	9	10
本文模型震害危险指数评估结果	0.43	0.39	0.63	0.68	0.45
本文模型震害危险等级评估结果	中度危险	轻度危险	重度危险	重度危险	中度危险
实际震害危险指数	0.41	0.39	0.64	0.70	0.48
实际震害危险等级	中度危险	轻度危险	重度危险	重度危险	中度危险

分析表 4 和表 5 能够得到，本文模型评估实验对象震害危险指数与实际震害危险指数最大差异为 0.03，震害危险性等级评估结果与实际震害危险情况基本一致，由此验证本文模型的可靠性。

2.2 对比测试

2.2.1 评估精度对比

基于 2.1 评估测试实验结果，对比本文模型的评估结果与基于 LM-BP 神经网络的评估模型和基于 BIM 的评估模型的评估结果同实际震害危险性情况间的拟合程度，结果如图 3 所示。

分析图 3 可知，三个不同评估模型对实验对象的评估精度对比结果中本文模型评估结果与实际情况拟合度最高，基于 BIM 的评估模型

评估结果与实际情况拟合度最低，由此可知，本文模型具有较高的评估精度。

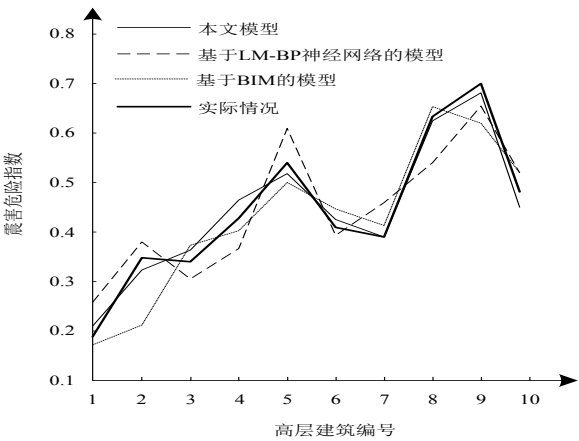


图 3 不同模型评估结果对比

Fig.3 Comparison of evaluation results of different models

## 2.2.2 评估效率对比

震害危险性评估模型需要在地震现场以最快的速度评估建筑地震波冲击后高层建筑的震害危险性，判定建筑破坏程度，避免因建筑震害损伤造成更大的人员伤亡与经济损失，因此时效性是判断震害危险性评估模型使用性能的重要指标。基于此对比上述三个模型对评估对象的评估效率，结果如图4所示。

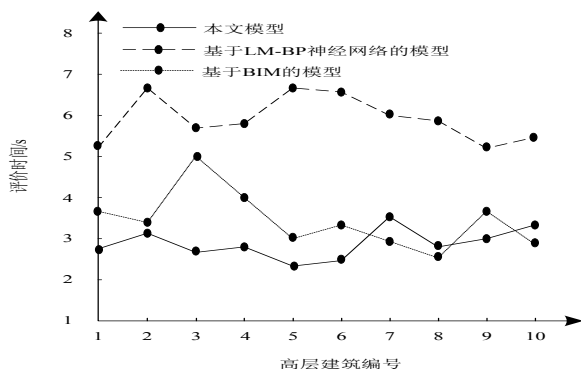


图4 不同模型评估效率对比

Fig.4 Comparison of evaluation efficiency of different models

由图4可知，三个评估模型中，基于LM-BP神经网络的模型评估高层建筑地震危险性所需时间最长，基于BIM的模型评估高层建筑地震危险性所需时间波动幅度最大，相比之下本文模型评价所需时间较短，且不同对象评价时间波动幅度平缓，说明本文模型的评估效率高对比模型，这是由于本文模型在选取影响因子时以时效性为标准。

## 3 结论

城市建筑系统中，高层建筑是不可或缺的组成部分，现有基于LM-BP神经网络的震害危险性评估模型无法精确获取城市高层建筑震害危险性评估结果。基于此本文设计地震波冲击下高层建筑震害危险性评估模型，考虑实际地震条件下强余震对于高层建筑的二次破坏程度，利用震害危险性指数定性描述高层建筑在地震波冲击下的危险程度。实验从评估测试和对比测试两方面出发，结果显示本文模型评估结果与实际震害危险情况基本一致，验证本文模型评估结果的可靠性，且本文模型影响因子选取时以时效性为标准，因此本文模型的评估效率

优于对比模型。

## 参考文献

- [1] 薛启超, 张井财, 何建, 等. 地震作用下PTMD对高层钢结构的减振效果[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(3):412-418.
- [2] 徐怀兵, 欧进萍. 设置混合调谐质量阻尼器的高层建筑风振控制实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6):144-154.
- [3] 翟凌雨, 杨坤. 基于最小二乘支持向量机算法的高层建筑结构的强震抗毁性估计模型[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4):895-900.
- [4] 赵全斌, 师煜, 邹秋元, 等. 基于BIM的建筑地震受损程度评估模型设计[J]. 地震工程学报, 2019, 41(01):227-232.
- [5] 马辉, 郭婷婷, 薛建阳, 等. 基于变形和累积耗能的型钢再生混凝土柱地震损伤模型研究[J]. 实验力学, 2017, 32(4):525-534.
- [6] 张令心, 戴静涵, 沈俊凯, 等. 基于LM-BP神经网络的钢筋混凝土框架结构震害快速预测模型[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(02):001-9.
- [7] 沈超, 钱德玲. 基于小波包能量的地基土对框筒结构地震损伤影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16):174-180.
- [8] Vladimir Sokolov, Hani Mahmoud Zahran, Salah El-Hadidy Youssef, et al. Probabilistic seismic hazard assessment for Saudi Arabia using spatially smoothed seismicity and analysis of hazard uncertainty[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(7):2695-2735.
- [9] 刘莹, 陶超, 闫培, 等. 图割能量驱动的高分辨率遥感影像震害损毁建筑物检测[J]. 测绘学报, 2017, 46(7):910-917.
- [10] Jiyuan Hu, Jiming Guo, Lv Zhou, et al. Dynamic vibration characteristics monitoring of high-rise buildings by interferometric real-aperture radar technique: laboratory and full-scale tests[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, PP(99):1-1.
- [11] 周阳, 张云生, 陈斯飏, 等. 基于DCNN特征的建筑物震害损毁区域检测[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(02):44-50.
- [12] 缪逸飞, 郭明珠, 吕欣欣, 等. 基于设定地震群体建筑物震害预测方法研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(02):136-141+128.
- [13] 张桂欣, 孙柏涛, 陈相兆, 等. 北京市建筑抗震能力分类及地震灾害风险分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3):223-229.
- [14] Mohamad, M, Liew, M.S, Danyaro, K.U, et al. Implementation of attenuation equations for seismic hazard assessment in Malaysian water[J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoscience, 2017, 23(2):1361-1365.
- [15] 孙楚津, 程庆乐, 曾翔, 等. 不同地震下的校园建筑震害与经济损失对比[J]. 工程力学, 2019, 36(S1):111-117+130.