

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.009

# 多层钢框架结构的区域震害模拟多自由度模型\*

孙楚津<sup>1</sup>, 陆新征<sup>1</sup>, 程庆乐<sup>1</sup>, 许 镇<sup>2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:**传统的易损性分析方法难以满足城市区域震害预测的需求。基于非线性多自由度层模型和动力时程分析的城市抗震弹塑性分析方法近年来得到快速发展。为了进一步丰富区域震害模拟的可模拟结构类型,基于城市抗震弹塑性分析方法的流程框架,建立了多层钢框架结构的多自由度剪切模型。通过统计规范中的公式参数和文献中的钢框架推覆结果,对模型的周期、阻尼比、骨架线参数和滞回曲线参数进行了标定,并根据文献和美国HAZUS报告给出了多层钢框架结构的损伤判别准则。最后,分别使用文献中的试验结果和文献中设计实例的推覆分析结果对模型进行了验证。结果表明:(1)建立了多层钢框架结构的多自由度剪切模型并进行了参数标定,为区域震害模拟提供了可用模型;(2)对多层钢框架结构的损伤判别准则进行了标定,可以根据区域震害模拟结果评价其破坏状态;(3)在考虑骨架线参数不确定性的情况下,模型精度满足区域震害模拟的要求。

**关键词:**多层钢框架; 区域震害模拟; 多自由度剪切模型; 推覆分析

**中图分类号:** P315.9; TU311.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0749-08

## A Multi-Degree-of-Freedom Model for Regional Seismic Damage Simulation of Multi-Story Steel Frame Structures

SUN Chujin<sup>1</sup>, LU Xinzheng<sup>1</sup>, CHENG Qingle<sup>1</sup>, XU Zhen<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Civil Engineering and Resource Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Urban seismic damage is difficult to predict using traditional vulnerability analysis method. The cityscape nonlinear time-history analysis of urban buildings based on nonlinear multi-degree-of-freedom (MDOF) models and the time-history analysis have been developed rapidly in recent years. In order to include more structural types in the simulation using the regional seismic damage simulation method, the MDOF shear model of multi-story steel frame structures is established based on the simulation framework of the cityscape nonlinear time-history analysis. In this work, formulas and parameters in the design code are investigated, and the pushover results of steel frames in literatures are collected. Subsequently, the period, damping ratio, backbone curve parameters and hysteretic curve parameters are determined. Furthermore, the damage criteria of multi-story steel frame structures are determined according to literatures and the HAZUS report. Finally, the model is validated through experiment results in literatures and the pushover analysis results of the designs in literatures, respective-

\* 收稿日期:2018-08-29;修回日期:2018-11-07

基金项目:国家重点研发计划(No. 2017YFC0702902)资助

作者简介:孙楚津(1996-),男,博士研究生。主要从事城市防灾减灾研究。Email: scj18@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:陆新征(1978-),男,教授,博士。主要从事结构非线性仿真及防灾减灾研究。Email: luxz@tsinghua.edu.cn

ly. The main conclusions are as follows: (1) The MDOF shear model of multi-story steel frame structures is established and the parameters are determined, which provides a useful model for regional seismic damage simulation of steel frame structures. (2) The damage criteria of multi-story steel frame structures are determined, and the damage state can be evaluated according to the simulation results subsequently. (3) The validation result shows that the model can satisfy the accuracy demand of regional seismic damage simulation considering the uncertainty of backbone curve parameters.

**Keywords:** multi-story steel frame; regional seismic damage simulation; MDOF shear model; push-over analysis

## 引言

传统的易损性分析方法难以满足城市区域震害预测的需求。基于非线性多自由度层模型和动力时程分析的城市抗震弹塑性分析方法近年来得到快速发展。非线性多自由度层模型将建筑简化为多自由度质量弹簧体系,模拟建筑在侧向荷载作用下的响应,可以保证合适的计算精度和计算效率。

C.Xiong等<sup>[1]</sup>针对在地震作用下表现为剪切变形形态的RC(钢筋混凝土)框架结构与砌体结构提出了多自由度集中质量剪切层模型(以下称MDOF剪切模型);针对在地震作用下表现为弯曲剪切变形形态的RC高层建筑提出了多自由度集中质量弯剪耦合模型(以下称MDOF弯剪模型)<sup>[2]</sup>,如图1所示。

为了进一步丰富区域震害模拟的可模拟结构类型,满足目标区域不同类型结构的模拟需求,本文在上述模拟框架基础上,通过文献统计建立了多层钢框架结构的MDOF剪切模型和相应损伤判别准则,并对模型进行了验证。

## 1 MDOF剪切模型建立

由图1(a)所示,MDOF剪切模型将建筑简化为质点-剪切弹簧体系,质点模拟集中后的楼层质量,剪切弹簧模拟建筑层间刚度,仅考虑楼层的平动位移。使用MDOF剪切模型可以模拟多层框架结构在水平地震荷载作用下的剪切型位移模式,且相比弯剪模型所需参数更少,计算效率更高,故多层钢框架采用MDOF剪切模型作为骨架线模型。

美国HAZUS报告<sup>[3]</sup>建议采用三线性建筑能力曲线(推覆曲线),该曲线基于工程设计参数统计得到,由屈服点、峰值点和极限点三个控制点唯一确定。J.S.Steelman等<sup>[4]</sup>建议采用单个耗能参数 $\tau$ 衡量滞回曲线的退化程度,以综合考虑滞回行为模拟精度和区域分析简化性的需求。 $\tau$ 的定义为:

$$\tau = \frac{\text{退化捏拢的滞回曲线包络面积}}{\text{理想弹塑性的滞回曲线包络面积}} \quad (1)$$

本文采用熊琛提出的三线性骨架线和单参数滞回模型<sup>[5]</sup>模拟多层钢框架结构弹塑性性能,如图2所示。

## 2 结构参数标定方法

### 2.1 周期和阻尼比

在对骨架线参数和滞回曲线参数进行标定之前,首先需要确定结构的周期和阻尼比。城市抗震弹塑性分析的第一步是获取建筑高度、建筑面积和结构类型等宏观建筑属性,再进一步确定MDOF模型时程分析所需的各项参数,结构周期即可根据宏观参数得到。获得结构周期后,即可根据楼层质量和建筑面积反算出结构的层间剪切弹簧刚度,作为MDOF模型的弹性参数<sup>[5]</sup>。对于多层钢框架结构,基本自振周期按我国《建筑结构荷载规范》<sup>[6]</sup>中建议

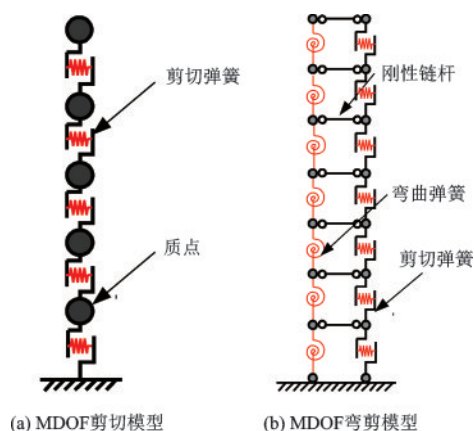
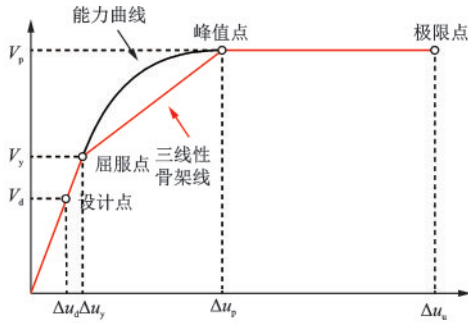
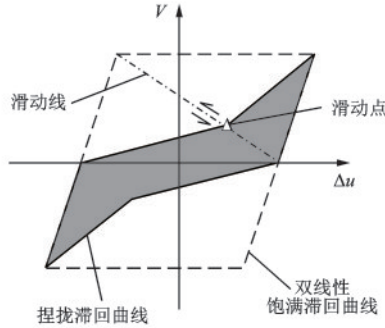


图1 多自由度集中质量模型

Fig.1 MDOF concentrated-mass models



(a) 多层钢框架三线性骨架线模型



(b) 单参数滞回模型

图2 多层钢框架结构MDOF剪切模型

Fig.2 MDOF shear model of multi-story steel frame structures

的经验公式取值:

$$T_1 = (0.10 \sim 0.15)n \quad (2)$$

式中,  $n$  为建筑层数。

阻尼比除了影响用于计算设计承载力的设计加速度反应谱形状, 也影响结构弹塑性分析过程的耗能行为, 进而影响结构响应的计算结果。多层钢框架结构高度一般不大于 50 m, 根据我国《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup>, 阻尼比取为 0.04。

## 2.2 骨架线参数

为了唯一确定多层钢框架结构的骨架线形状, 需要对骨架线的 3 个控制点: 屈服点、峰值点和极限点进行参数标定。本文统计了 59 个钢框架的推覆结果<sup>[8-33]</sup>, 包括 8 个试验推覆样本和 51 个有限元模拟推覆样本。

### 2.2.1 屈服点确定

钢框架强度参数以设计承载力  $V_d$  作为基准值,  $V_d$  在按照 2.1 节方法获得结构基本自振周期后可以通过底部剪力法计算得到则屈服承载力  $V_y$  为:

$$V_y = \Omega_y V_d \quad (3)$$

式中,  $\Omega_y$  为屈服超强系数。

在统计屈服超强系数  $\Omega_y$  时, 需要确定上述样本

中推覆曲线的设计点和屈服点, 其中前者由统计结果直接给出, 后者按照 ATC-40<sup>[34]</sup> 建议的方法进行确定, 如图 3 所示。该方法将推覆曲线等效为双折线, 第一段折线的斜率为曲线初始刚度, 第二段折线的终点为峰值点, 使双折线与横轴包络的面积和推覆曲线与横轴包络的面积相等, 双折线的拐点即为等效屈服点。

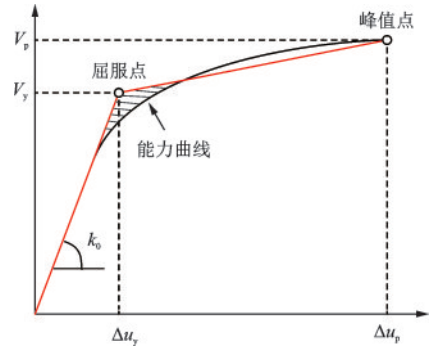


图3 ATC-40屈服点确定方法

Fig.3 Determination method of yield point in ATC-40

对 59 个钢框架样本中 8 个给出设计值的样本进行统计, 考虑到超强系数应大于 1, 假设  $\Omega_y - 1$  服从对数正态分布, 得到其分布如图 4 和式 (4) 所示。

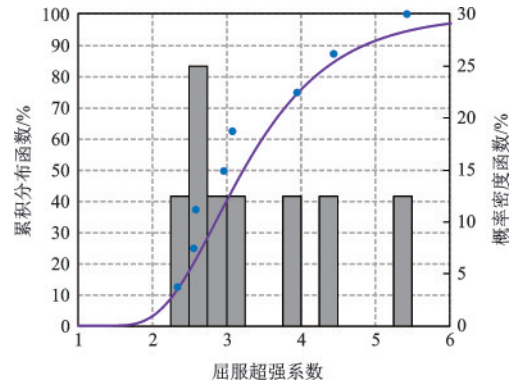


图4 多层钢框架结构骨架线屈服超强系数分布

Fig.4 Distribution of yield over strength ratio of backbone curve for multi-story steel frame structures

屈服点对应的位移可以由式 (5) 得到, 其中  $k_0$  为初始层间刚度, 可由结构基本自振周期求得。

$$\ln(\Omega_y - 1) \sim N(0.7997, 0.4252^2) \quad (4)$$

$$\Delta u_y = \frac{V_y}{k_0} \quad (5)$$

### 2.2.2 峰值点确定

确定骨架线的屈服点之后, 峰值承载力  $V_p$  可以由屈服承载力  $V_y$  乘以峰值超强系数  $\Omega_p$  得到, 再得到

屈服点到峰值点之间折减后的切线刚度  $k_1$ , 即可确定三线性骨架线的第二段。  $k_1$  为:

$$k_1 = \eta k_0 \quad (6)$$

式中,  $\eta$  为弹性阶段进入弹塑性阶段后的刚度折减系数。

对 59 个钢框架样本进行统计, 假设  $\Omega_p - 1$  和  $\eta$  均服从对数正态分布, 得到其分布如图 5、6 和式 (7) ~ (8) 所示。

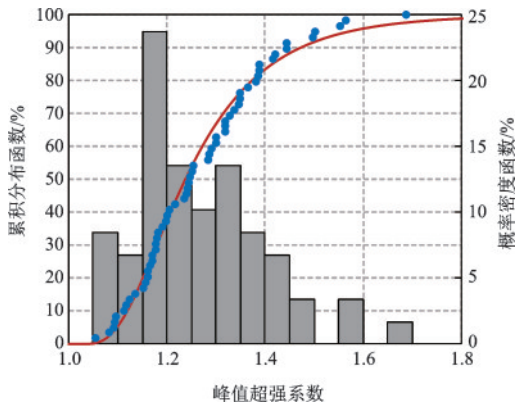


图 5 多层钢框架结构骨架线峰值超强系数分布

Fig.5 Distribution of peak overstrength ratio of backbone curve for multi-story steel frame structures

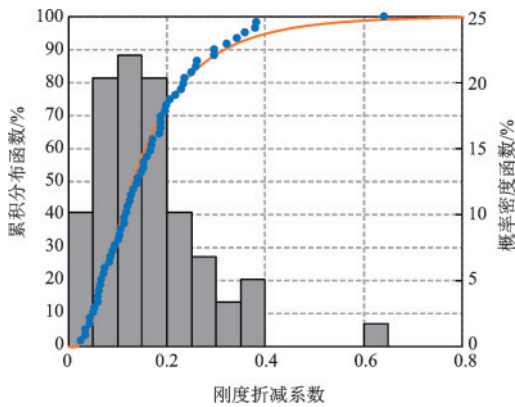


图 6 多层钢框架结构骨架线刚度折减系数分布

Fig.6 Distribution of stiffness reduction factors of backbone curve for multi-story steel frame structures

$$\ln(\Omega_p - 1) \sim N(-1.4352, 0.5356^2) \quad (7)$$

$$\ln(\eta) \sim N(-2.0347, 0.6976^2) \quad (8)$$

结合上述结果可计算峰值点对应的位移为:

$$\Delta u_p = \Delta u_y + \frac{V_p - V_y}{k_1} \quad (9)$$

### 2.2.3 极限点确定

考虑到钢框架一般延性较好, 因此本文不考虑骨架线的软化, 取极限承载力  $V_u$  与峰值承载力  $V_p$

相等, 这也与 HAZUS 报告<sup>[3]</sup>建议的三线性骨架线形状一致。

在峰值点和软化段刚度已经确定的情况下, 极限位移不影响动力弹塑性时程分析的结果。考虑到结构骨架线的极限点对应结构倒塌的破坏状态, 本文参照熊琛<sup>[5]</sup>根据破坏状态对应的层间位移角限值  $\delta_{complete}$  确定极限点对应的位移的方法, 即:

$$\Delta u_u = \delta_{complete} h \quad (10)$$

式中,  $h$  为结构层高;  $\delta_{complete}$  的取值在第 3 节予以介绍。

### 2.3 滞回曲线参数

如前所述, 滞回曲线采用单参数模型, 以单个滞回耗能参数  $\tau$  衡量滞回曲线的退化程度。根据 HAZUS 报告<sup>[3]</sup>, 考虑到城市抗震弹塑性分析应用过程中不一定能详细获知地震动记录的震级数据, 多层钢框架取未知震级情况对应的参数值  $\tau = 0.4$ 。

## 3 结构损伤判别准则

多层钢框架结构损伤判别采用基于力的损伤限值和基于位移的损伤限值相结合的方法。当层间位移角较小时, 结构层间刚度相对较大, 小变形将引起层间剪力的较大变化, 此时采用基于力的损伤限值; 当层间位移角较大时, 结构层间刚度显著减小, 较小的层间剪力会引起较大的变形, 此时采用基于位移的损伤限值。两种损伤限值结合使用可以使结构的损伤判别更加准确。

本文以屈服承载力  $V_y$  作为进入轻微破坏状态限值, 以屈服承载力和峰值承载力的平均值作为进入中等破坏状态限值, 使用 HAZUS 报告中“extensive”状态和“complete”状态对应的层间位移角分别作为严重破坏和毁灭的限值。表 1 给出了 HAZUS 报告建议的不同规范等级下的层间位移角限值的均值, 其中 S1L、S1M 和 S1H 分别对应 1-3 层、4-7 层和 8 层及以上的钢框架。HAZUS 报告中的规范等级对应于中国建筑与建筑年代(规范版本)和建筑设防烈度相关, S.B.Lin 等<sup>[35]</sup>给出了二者之间的关系, 见表 2。损伤判别准同样具有不确定性, 对于基于力的轻微破坏和中等破坏的限值, 其不确定性与承载力不确定性相关; 对于根据 HAZUS 报告建议值取用的严重破坏和毁灭限值, 其对数正态分布标准差取为 0.4<sup>[3]</sup>, 即满足:

表1 HAZUS报告中钢框架结构不同规范等级下的层间位移角限值

Table 1 Inter-story drift ratio limits of steel frame structures with different design code levels in HAZUS

层间位移角	Pre-Code		Low-Code		Moderate-Code		High-Code	
	EX	CO	EX	CO	EX	CO	EX	CO
S1L	0.0162	0.0400	0.0203	0.0500	0.0235	0.0600	0.0300	0.0800
S1M	0.0108	0.0267	0.0135	0.0333	0.0157	0.0400	0.0200	0.0533
S1H	0.0081	0.0200	0.0101	0.0250	0.0118	0.0300	0.0150	0.0400

表2 HAZUS报告规范等级与中国规范设防烈度和建设年代的对应关系

Table 2 Correspondence between the design code levels in HAZUS and the design intensity and construction age in Chinese code

中国规范 抗震设防 烈度	建设年代		
	早于1978	1978-1989	晚于1989
IX (0.40g)	Pre-Code	Moderate-Code	High-Code
VIII (0.30g)	Pre-Code	Moderate-Code	Moderate-Code
VIII (0.20g)	Pre-Code	Low-Code	Moderate-Code
VII (0.15g)	Pre-Code	Low-Code	Low-Code
VII (0.10g)	Pre-Code	Pre-Code	Low-Code
VI (0.05g)	Pre-Code	Pre-Code	Pre-Code

$$\delta_{\text{mean} \pm \sigma} = \delta_{\text{mean}} \times e^{\pm 0.4} \quad (11)$$

## 4 模型验证

### 4.1 文献试验验证

本文首先使用文献[36]中的2个钢框架推覆结果对上述方法正确性进行了验证。2个钢框架均为空间2层足尺钢框架,首层层高为2.9 m,二层层高1.45 m,原型结构按照抗震设防烈度Ⅶ度设计。2个钢框架均为横向单跨,纵向两跨,其中横向跨度二者均为3 m,纵向框架A两跨跨度分别为3.6和4.2 m,框架B两跨跨度均为3.6 m。文献给出了2个框架在Ⅶ度多遇地震下的底部剪力设计值,框架A和框架B分别为56和92 kN。框架加载时使用二层顶部千斤顶模拟重力荷载,伺服加载器作用在二层楼面位置处提供侧向推覆荷载。

使用底部剪力设计值和对应的顶点位移对底部剪力和顶点位移进行归一化,并与MDOF模型模拟结果对比,如图7所示。图中红色实线为骨架线参数取均值时的模拟结果,红色虚线为骨架线参数取均值加减1倍标准差时的模拟结果。

对比文献[36]中的试验结果和本文建立的

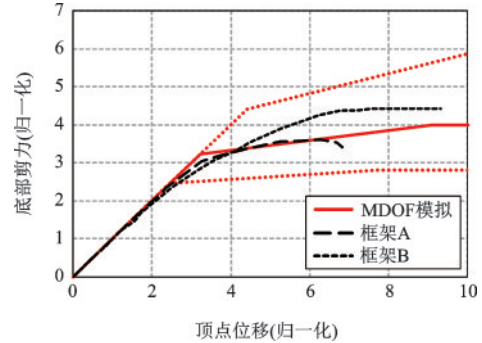


图7 文献[36]试验结果与本文MDOF模型模拟结果对比(归一化)

Fig.7 Comparison of the experiment results in literatures and the simulation results of MDOF model(normalized)

MDOF模型模拟结果,可以看出试验结果位于参数均值加减1倍标准差的骨架线之间,且与参数取均值时的骨架线较为接近,可见所建立的多层钢框架MDOF模型可以较好地模拟2个试验钢框架的推覆结果。

### 4.2 有限元模拟验证

除了使用文献[36]中的试验结果验证之外,本文选择了10榀文献中的钢框架设计实例<sup>[22,37-40]</sup>,使用SAP2000建模并进行Pushover分析,得到其静力推覆曲线。10榀钢框架的设计参数见表3。10榀钢框架层数、设防烈度、跨数、跨度和层高等设计参数各不相同,充分验证MDOF模型对于不同多层钢框架的模拟准确性。单榀框架的立面布置示意图如图8所示。

根据文献给出的设计参数使用底部剪力法估算10榀钢框架的底部剪力设计值,使用底部剪力设计值和对应的顶点位移对底部剪力和顶点位移进行归一化,并与MDOF模型模拟结果对比,如图9所示。图中红色实线为骨架线参数取均值时的模拟结果,红色虚线则给出骨架线参数取均值加减1倍标准差时的模拟结果。

表3 钢框架设计实例参数统计结果

Table 3 Parameters of the collected steel frame designs

编号	层数	设防烈度	跨数	跨度/m	首层层高(其余层高)/m
1	3	VIII	3	6	3(3)
2	3	VIII	3	7.5	3(3)
3	5	IX	3	6	4(3.5)
4	6	8.5	3	6	3(3)
5	6	VIII	2	5	3.5(3.5)
6	6	VIII	3	6	3(3)
7	6	VIII	3	7.5	3(3)
8	7	VIII	3	6	3(3)
9	9	VIII	3	6	3(3)
10	10	VIII	3	6	3.6(3.6)

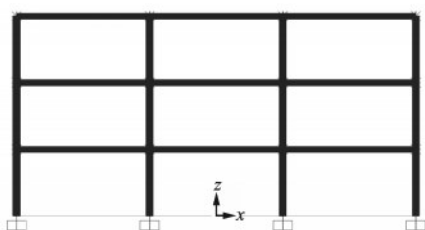


图8 框架立面布置示意

Fig.8 Elevation layout of the frames

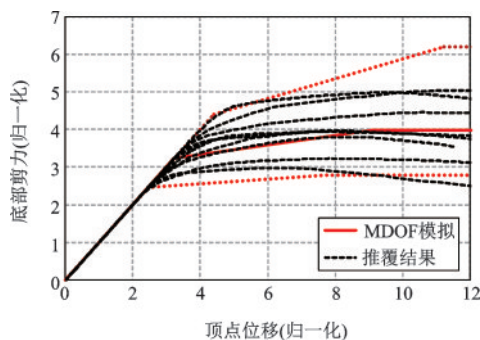


图9 文献设计实例的推覆结果与MDOF模型模拟结果对比(归一化)

Fig.9 Comparison of the pushover results of designs in literatures and the simulation results of MDOF model(normalized)

对比SAP2000推覆结果和建立的MDOF模型模拟结果,可以看出SAP2000推覆结果基本位于参数均值加减1倍标准差的骨架线之间。由于在统计文献结果进行参数标定时,并未拟合骨架线参数和设防烈度等设计参数之间的关系,因此SAP2000推覆结果相比MDOF模型模拟结果离散性较大。不过,在区域震害模拟考虑不确定性的影响时,所建立的多层钢框架MDOF模型可以满足区域震害模

拟的精度需要。

## 5 结论

本文基于已有的区域震害模拟的多自由度模型模拟框架,建立了多层钢框架结构的多自由度剪切模型,为在区域震害模拟中考虑多层钢框架结构提供了分析模型。得到的主要结论如下:

(1) 依据中国规范确定了模型的周期和阻尼比。

(2) 通过统计文献中的钢框架推覆结果,对模型的骨架线参数和滞回曲线参数进行了标定。

(3) 根据文献和美国HAZUS报告给出了区域震害模拟中多层钢框架结构的损伤判别准则。

(4) 分别使用文献中的试验结果和文献中设计实例的推覆分析结果对模型进行了验证,结果表明在考虑骨架线参数不确定性的情况下模型精度满足区域震害模拟的要求。

## 参考文献:

- [1] Xiong C, Lu X Z, Lin X C, et al. Parameter determination and damage assessment for THA-based regional seismic damage prediction of multi-story buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(3): 461-485.
- [2] Xiong C, Lu X Z, Guan H, et al. A nonlinear computational model for regional seismic simulation of tall buildings [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(4): 1 047-1 069.
- [3] FEMA. Multi-Hazard loss estimation methodology-earthquake model technical manual (HAZUS-MH 2.1) [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [4] Steelman J S, Hajjar J F. Influence of inelastic seismic response modeling on regional loss estimation [J]. Engineering Structures, 2009, 31(12): 2 976-2 987.
- [5] 熊琛. 基于时程分析和三维场景可视化的区域建筑震害模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016. Xiong Ch. Study on the regional building seismic damage simulation based on time-history analysis and 3D scene visualization [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [6] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture Industry

- Press, 2012.(in Chinese)
- [7] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [8] 王元清, 张一舟, 施刚, 等. 半刚性端板连接多层钢框架的Push-over分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(11): 10-15.  
Wang Y Q, Zhang Y Zh, Shi G, et al. Push-over analysis of multi-story steel frame with semi-rigid end-plate connections [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(11): 10-15.(in Chinese)
- [9] 李梦祺. 带垫板的双肢C型钢半刚性框架抗震性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.  
Li M Q. Study on seismic behavior of seimi-rigid frames using double C steel with gusset plate [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015.(in Chinese)
- [10] 吴香香. 多层薄柔钢框架的抗震设计[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
Wu X X. Seismic design for multi-story steel frames composed of slender or non-compact section [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.(in Chinese)
- [11] 徐春兰, 顾强. 多层抗弯钢框架的结构影响系数[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2007, 20(1): 10-14.  
Xu Ch L, Gu Q. Structural influence coefficients of multi-story steel moment resisting frame [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2007, 20(1): 10-14.(in Chinese)
- [12] 李成. 多层抗弯钢框架的结构影响系数和位移放大系数[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
Li Ch. The Structural influencing coefficient and displacement amplification factor in multi-story moment resisting steel frames [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.(in Chinese)
- [13] 程满, 闻广坤. 钢结构抗侧力体系抗震性能对比[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 244-251.  
Cheng M, Wen G K. Seismic behavior comparison of lateral force resisting system of steel structure [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 244-251. (in Chinese)
- [14] 钱德军. 钢框架非线性抗震静力计算程序的编制和研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
Qian D J. Develop and research on nonlinear seismic program of steel frame structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.(in Chinese)
- [15] 舒兴平, 沈蒲生, 尚守平. 钢框架结构二阶弹塑性稳定极限承载力试验研究[J]. 钢结构, 1999, 14(4): 19-22.  
Shu X P, Shen P Sh, Shang Sh P. Experimental studies on the second-order elastic-plastic ultimate strength of steel frames [J]. Steel Construction, 1999, 14(4): 19-22.(in Chinese)
- [16] 侯列迅. 钢框架结构非线性地震动力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
Hou L X. Studies on seismic dynamical analysis method for the steel frame structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.(in Chinese)
- [17] 张倩. 钢框架结构基于性能的抗震设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
Zhang Q. Research on the displacement-based seismic design method of steel moment-resisting frame [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.(in Chinese)
- [18] 夏焕焕. 钢框架结构位移角研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.  
Xia H H. Research on displacement angle of steel-frame structure [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.(in Chinese)
- [19] 熊二刚, 梁兴文, 张倩. 钢框架结构直接基于位移的抗震设计方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 106-113.  
Xiong E G, Liang X W, Zhang Q. Directly displacement-based seismic design method of steel frames [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(4): 106-113.(in Chinese)
- [20] 钟光忠. 罕遇地震作用下多层钢框架结构的弹塑性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
Zhong G Zh. The elasto-plastic analysis of the steel frame structure on the seismic action [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.(in Chinese)
- [21] 孙诚. 基于推覆分析的钢框架结构地震倒塌判别准则研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
Sun Ch. Study on seismic collapse criterion for steel frame structures based on pushover analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.(in Chinese)
- [22] 孙文林. 基于性能的钢框架结构非线性地震反应分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.  
Sun W L. Studies on performance-based seismic response analysis method for the steel frame structure [D]. Changsha: Hunan University, 2006.(in Chinese)
- [23] 陈永昌, 李建中. 基于性能设计的抗弯钢框架与钢框架-钢板剪力墙结构性能对比分析[J]. 钢结构, 2015, 30(9): 18-22, 11.  
Chen Y Ch, Li J Zh. Comparative analysis of MRF and SPSW structures based on seismic design method [J]. Steel Construction, 2015, 30(9): 18-22, 11.(in Chinese)

- [24] 唐柏鉴, 彭小龙, 邵建华. 基于Pushover的钢框架结构抗震性能分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(5): 439-443.  
Tang B J, Peng X L, Shao J H. Analysis of seismic performance of steel frame with pushover method [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(5): 439-443. (in Chinese)
- [25] 李东, 苏恒品. 基于Pushover方法的钢框架结构超强分析[J]. 东北电力大学学报, 2011(5/6): 80-84.  
Li D, Su H P. Overstrength analysis of steel frame structures based on pushover method [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011(5/6): 80-84. (in Chinese)
- [26] 王朝波. 既有多高层钢框架抗震鉴定指标体系及分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Wang Ch B. The index system and the analysis method for seismic appraisal of existing multi-story & high-rise steel frame structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [27] 倪永慧. 近场地震下抗弯钢框架基于能量的性能设计方法[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.  
Ni Y H. Performance-based seismic design method of moment-resisting steel frame under near-fault earthquake using MECE spectrum [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [28] 孙鹏, 汤扬. 考虑楼板开洞的轻钢框架的Pushover分析[J]. 山西建筑, 2008(5): 105-106.  
Sun P, Tang Y. Pushover analysis on light steel frame considering slabs with openings [J]. Shanxi Architecture, 2008(5): 105-106. (in Chinese)
- [29] 贾连光, 孙鹏, 肖青. 考虑填充墙对钢框架结构体系影响的静力非线性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(1): 11-15.  
Jia L G, Sun P, Xiao Q. Static nonlinear analysis considering the infill wall effect of the steel frame structure system [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2008, 24(1): 11-15. (in Chinese)
- [30] 许鑫森, 杨娜. 考虑组合效应的梁腹板开圆孔型钢框架的静力弹塑性分析[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(6): 82-87, 92.  
Xu X S, Yang N. Pushover analysis on the steel frame with opening in beam web considering the effect of composite action [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(6): 82-87, 92. (in Chinese)
- [31] 周兴卫. 梁柱半刚性连接钢框架结构的抗震性能分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
Zhou X W. The seismic behavior analysis of steel frame structures with semi-rigid connections of the beam-to-column [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [32] 孙延毅. 轻型楼板钢框架结构的弹塑性分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.  
Sun Y Y. Research on the seismic performance of steel-frame and light floor structure [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [33] 李沛豪, 刘崇奇. 一种基于性能的抗震设计的Pushover分析方法[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(5): 538-542, 579.  
Li P H, Liu Ch Q. A pushover analysis for performance-based seismic design [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(5): 538-542, 579. (in Chinese)
- [34] Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings - volume 1 (ATC-40) [S]. California: Applied Technology Council, 1996.
- [35] Lin S B, Xie L L, Gong M S, et al. Performance-based methodology for assessing seismic vulnerability and capacity of buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(2): 157-165.
- [36] 陈以一, 吴香香, 田海, 等. 空间足尺薄柔构件钢框架滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 51-56.  
Chen Y Y, Wu X X, Tian H, et al. Experimental study on the hysteretic behavior of full-scale special steel frames composed of non-compact members [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 51-56.
- [37] 严林飞. 半刚性节点钢框架的地震易损性分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
Yan L F. Seismic fragility analysis of steel frame with semi-rigid nodes [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [38] 陈全. 钢框架结构影响系数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
Chen Q. Study on steel frame structural influencing coefficient [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [39] 熊二刚, 张倩. 高层钢框架结构基于性能的性能设计方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 211-219.  
Xiong E G, Zhang Q. Performance-based plastic Design method of high-rise steel frames [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(9): 211-219. (in Chinese)
- [40] 张震, 邓长根. Perform-3D在某钢框架推覆分析中的应用[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2016, 34(3): 341-343.  
Zhang Zh, Deng Ch G. Application of Perform-3D in pushover analysis on a steel frame [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2016, 34(3): 341-343. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)