

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111044

考虑经验结构信息的RC框架剪切层模型建立方法*

杨植^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 熊峰^{1,2}, 梅竹^{1,2}

(1. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学中国西部抗震防灾研究中心, 四川 成都 610065)

摘要: 提出一种基于经验结构信息的RC框架剪切层模型建立方法,用于区域RC框架结构的地震损失快速评估。针对RC框架结构确定结构构件尺寸和材料参数等基本设计参数及其经验取值范围,通过拉丁超立方体抽样方法考虑这些参数的随机组合与参数值的不确定性,生成框架结构的随机样本;在RC框架整体结构层面将框架层结构随机样本转化为多自由度集中质量剪切层模型,再通过非线性动力分析得到结构地震响应数据;综合分析国内外规范对于结构损伤状态的定义与量化方法,结合地震响应数据对框架结构的地震损失进行评估。结果表明:①考虑结构设计参数经验取值建立的层结构模型,满足抗震设计规范要求,且符合实际结构特征,能够用于典型框架结构的快速建模;②在不同强度的地震激励下,框架结构模型的地震损失规律与震害经验基本一致,表明本文所提建模方法具有较高的模拟准确性。

关键词: 数值模拟; 层模型; RC框架; 经验信息; 地震损失

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1240-08

Establishment Method of Story-based RC Frame Shear Model Utilizing Empirical Structural Information

YANG Zhi^{1,2}, LIU Yang^{1,2*}, XIONG Feng^{1,2}, MEI Zhu^{1,2}

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Western China Earthquake and Hazards Mitigation Research Center, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: An establishment approach for story-based shear models using empirical structural information of RC frame structures is proposed for regional seismic loss estimation. Targeting RC frame structures, the basic design parameters, including structural dimensions and material parameters, and their empirical value ranges are determined. The Latin-Hypercube-Sampling method is adopted to generate samples of story-based structures considering the random combinations of these basic parameters and the parameter uncertainty induced by determining their empirical value ranges. The multi-degree-of-freedom concentrated-mass story-based shear layer model is employed to build RC frame structural model corresponding to story-based structural model samples. The structural seismic responses are obtained by nonlinear dynamic analysis using these structural models. A group of structural damage

* 收稿日期:2021-11-11;修回日期:2021-12-16

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51908384)、中国博士后科学基金面上资助项目(2020M673223, 2019M663500)、四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2019YFH0120)资助

作者简介:杨植(1990—),男,博士研究生。主要从事区域地震损失评估研究。E-mail:Yangzhi90college@126.com

通讯作者:刘洋(1984—),男,助理研究员,博士。主要从事工程结构地震易损性及风险评估等研究。

E-mail:yangliuscu@scu.edu.cn

states is quantificationally defined by a comprehensive analysis of the domestic and foreign codes, and seismic loss of typical RC frame structures is estimated in a case study. It is found that the proposed story-based structural models considering basic parameters, which meet the requirements of the code and are compatible with realistic structures, are available and efficient for the rapid modeling of typical frame structures. The structural seismic responses and seismic loss are consistent with the earthquake damage experience, indicating a high accuracy of the proposed modeling approach.

Keywords: numerical simulation; story-specific model; RC frame; empirical information; seismic loss

引言

城市区域内的建筑种类多、数量大,个体之间抗震能力差异较大,传统的地震损失评估方法难以满足城市区域震害预测的需求。早期的区域地震损失评估多采用震害抽样调查的方式进行,肖光先^[1]对国内记录的历史震害数据进行分析,建立了地震经济损失和人员伤亡的预测模型,用来确定一定地震烈度下城市的损失值和年均损失期望值。但此类模型得到的是整体的、宏观性的评估结果,对个体的估计精度不足,且难以体现个体之间的差异。随着结构有限元方法与动力非线性积分方法的发展,数值模拟方法有着精确程度高、费用与设备门槛低、实施方便快捷的优点,结合基于性能的地震工程理论框架(PBEE)^[2],被广泛用于结构、区域地震损失评估。HAZUS^[3]灾害评估技术是其中典型代表,但HAZUS中把各类建筑看做单自由度体系,整栋建筑的破坏状态是唯一的,不能表达各层损失的差异性,而在实际情况中,中高层以上的建筑各层的损失分布往往更加集中,各层之间差异较大^[4]。曾翔等^[5]采用多层集中质量剪切(multi-story concentrated-mass shear, MCS)模型,基于FEMA P-58^[6]建筑抗震性能评估方法对三栋典型校园建筑进行地震损失评估,得到了构件层次的详细评估结果。但由于建筑信息采集和随机抽样模拟计算的工作量巨大^[7],FEMA-P58方法更适用于有限数量的建筑抗震性能评估。

综上所述,现有方法或者难以得到较为精细的评估结果,或者难以快速且相对精细地对区域大量建筑进行建模和评估,往往难以兼顾评估精度与评估效率。由此,本文针对区域的地震损失快速评估,提出一种考虑经验结构信息的RC框架结构剪切层模型。该模型所需建筑信息较少,能够在未知

建筑内部具体结构布置方式的情况下,考虑层损失估计中结构的不确定性,同时兼顾了区域建筑地震损失评估的精度和效率。

1 RC框架结构剪切层模型

《建筑抗震设计规范》^[8](以下简称《抗规》)规定,建筑设计应根据抗震概念设计的要求明确建筑形体的规则性,不规则的建筑应按规定采取加强措施。因此,民用RC框架结构的平面与竖向结构布置一般比较规则,层与层之间界限清晰,以零线和各层楼板面的标高作为各层之间的边界,将各层楼板与其下方的各类构件集合为一个整体建立层模型,以此作为基本的结构分析计算单元。

1.1 层结构经验模型与结构不确定性

对于区域建筑而言,由于受建筑高度、结构类型、设防标准、结构布局、构件尺寸、材料强度等方面因素的影响,个体之间抗震能力差异较大。而且由于往往缺少层结构信息,因此采用层结构参数的经验数据来建立层结构模型。普通民用建筑一般遵循安全且经济的设计理念,在工程实践中会有经验性的设计参数参考范围。因此,本文基于工程经验数据,采用对结构设计参数抽样的方法,并随机组合生成一系列层结构模型样本,从而实现考虑未知层结构空间分布信息下的RC框架结构地震损失估计。同时,考虑经验设计参数带来的结构不确定性,参考FEMA P-58^[6],可以取对数标准差0.25,与地震动不确定性的对数标准差平方和相加后开平方得到需求模型的标准差。

1.2 层结构随机样本

文中建立的RC框架结构层结构模型仅为地上部分,包含楼板、框架柱、框架梁、连梁等结构构件和填充墙,不考虑基础和人防等地下工程。同时为

了便于分析,本文建立的层结构随机样本满足以下假定:

- (1) 同一样本各层结构布置和构件规格一致;
- (2) 已知建筑的顶层标高以及建筑平面尺寸;
- (3) 建筑平面规则,连梁方向与建筑平面短边方向一致。

对于实际工程中存在的平面不规则建筑,需进行平面等效重构^[9]。依据《抗规》^[8]的规定,对于平面凹进尺寸不超过相应投影方向总尺寸的30%的建筑,将平面等效重构为与之面积相等的规则矩形,如图1所示。而当平面凹进超过该限值时,结构的力学特性往往与平面规则的建筑有显著差异,无法采用通用的简化结构分析模型,需要分别进行建模分析,不适用于本文所提方法。

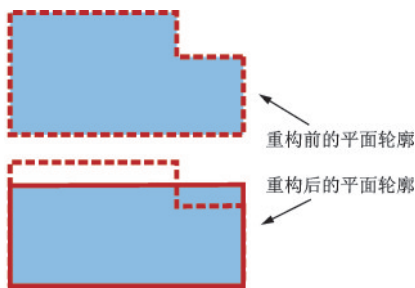


图1 建筑平面等效重构示意

Fig.1 Equivalent reconstruction of building plane

基于章节1.1影响结构抗震能力不确定性的因素,挑选出层结构样本抽样指标如下:双向跨度、柱截面积、梁(框架梁和连梁)截面高度与跨度比值、梁(框架梁和连梁)截面宽度与高度比值、材料强度、填充墙投影面积与层面积比例、层高。

首先确定要抽样组合的层结构随机样本的个数,以工程经验的设计参数常用取值区间作为各抽样指标样本的取值范围。采用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)方法对结构指标进行随机抽样,并假定各抽样指标在样本空间内服从均匀分布。对于离散型抽样指标如柱截面积、材料强度等,首先将抽样指标与随机数相对应,进而根据生成的均匀随机数而确定;对于连续型抽样指标如梁截面高跨比等,先将指标取值区间等距分割,区间节点总数(包含区间两端边界)与层结构随机样本的个数相同,然后将各区间节点值与随机数对应,进而根据生成的均匀随机数得到抽样指标的值。最后对抽样所得的各项指标进行随机组合,并对组合而成的层结构样本进行轴压比验算,筛除不

合格样本。

1.3 剪切层模型参数确定方法与地震需求分析

对于区域的建筑地震损失计算,在结构整体响应层面采用集中质量层模型,其计算精度能够满足工程需求,近年来有学者将其不断地发展和应用^[5,10-12]。多层RC框架结构在地震作用下一般呈剪切型破坏,因此本文选择多自由度集中质量剪切(Multiple-degree-of-freedom concentrated-mass shear, MDOF-CMS)模型进行层模型结构样本的非线性动力时程模拟。

MDOF-CMS模型假定楼面为刚性并且忽略其转动位移,各层质量在层标高处集中为一个质点,各质点间通过剪切弹簧连接,用以反映各层的弹塑性特性,由于各层规格一致,因此各层初始刚度相同,层质量与层间剪切刚度由生成的层结构随机样本直接统计得到。剪切弹簧的恢复力关系采用三线性骨架线(弹性阶段、屈服阶段、塑性阶段)以及单参数捏拢滞回模型(图2),能较好地把握模拟精度与参数标定难度之间的平衡,层间滞回模型的参数标定方法详见文献[12]。

本方法旨在对不同地震动作用下区域建筑的损失进行评估,而非是从抗震设计角度的最不利设防原则出发,选取与目标设计谱相匹配的地震波,因而采用基于场地条件的选波方式。区域的建筑数量较大,以国际通行的PGA为地震动强度参数,对选取的地震动输入模型进行非线性动力时程分析,得到各结构样本每层的地震响应。

2 RC框架结构地震损失估计

2.1 层结构的地震损伤等级划分

结合现行国家规范《建(构)筑物地震破坏等级划分》^[13](以下简称《破坏等级划分》)和以往研究,将建筑的破坏状态划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏和倒塌五个等级。通常采用层间位移角作为建筑破坏状态的划分指标,《抗规》^[8]中以1/550作为结构的弹性能力极限状态,FEMA^[14]建议分别把1%、2%、4%作为建筑的立即居住、生命安全、倒塌预防的极限状态,因此本文采用的建筑各破坏状态的层间位移角划分见表1。

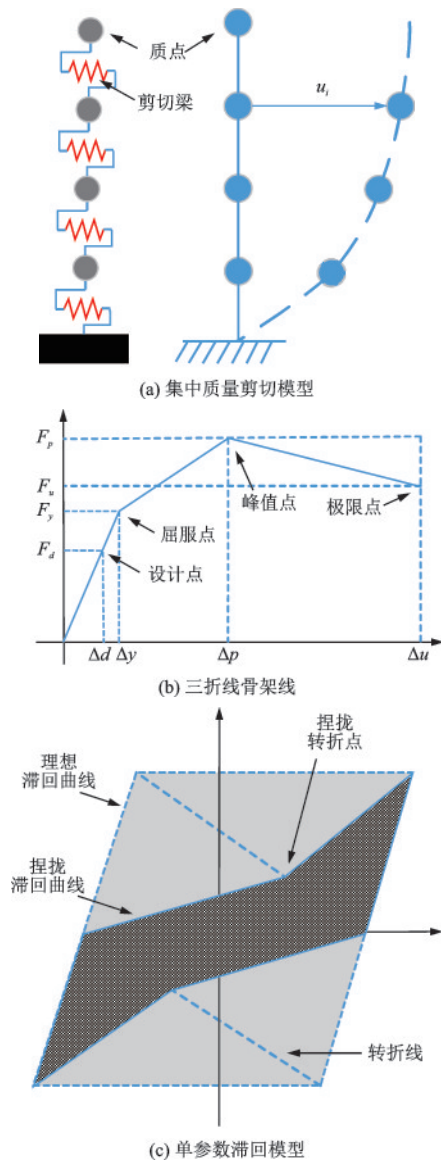


图2 多自由度剪切模型

Fig.2 Multiple-degree-of-freedom shear model

表1 建筑破坏状态的层间位移角区间划分

Table 1 Interval division of inter-story drift ratio for building failure states

需求参数	破坏状态				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏或倒塌
层间位移角	$\leq 1/550$	(1/550~1%)	(1%~2%)	(2%~4%)	$> 4%$

2.2 层结构的地震损失

2.2.1 层结构的损失比

层结构的损失比是指,产生某种程度破坏的楼层恢复到震前状态所需的费用与该楼层重置费用

的比值。参照《地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估》^[15](以下简称《损失评估》)对房屋损失比的规定,将楼层各破坏状态的损失比界定见表2。

表2 建筑各破坏状态的损失比

Table 2 Loss ratio of each damage state for buildings

单位:%

结构类型	破坏状态				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
钢筋混凝土	[0~5]	(5~15]	(15~45]	(45~80]	(80~100]

2.2.2 层结构地震损失计算方法

对层间位移角进行分段线性插值,确定各层的损失率中位值,而非直接采用《损失评估》建议的各区间中位值。在各楼层损伤等级确定的前提下,建筑整体的损失比可由式(1)得到:

$$TL_{ratio} = \sum_{i=1}^N \gamma_i * L_i / N \quad (1)$$

式中, γ_i 为楼层的超高施工增加费用系数,按照 FEMA^[11]的建议,1~4层以下取1.00,5~10层取1.08,10层以上取1.16; L_i 为各楼层的损失比; N 为楼层数。

此外,可分别由式(2)、(3)计算得到楼层及整体的货币化损失:

$$L_{story} = L_i * A_{story} * \zeta * P \quad (2)$$

$$L_{all} = TL_{ratio} * A_{story} * N * \zeta * P \quad (3)$$

式中, A_{story} 为建筑单层投影面积; ζ 为重置费用系数,一般取1.2; P 为建筑的单位面积造价。

3 地震损失评估算例

3.1 数值分析模型建立

3.1.1 基本信息

以某城区内的多层框架结构为例,建筑用途为普通民用住宅。根据《抗规》^[8]附录A中的规定,假定抗震设防烈度为7度,设计地震基本加速度0.1g,设计地震分组为第三组,抗震等级为三级。采用MATLAB软件建立数值模型,并进行分析和计算。

3.1.2 结构经验设计数据与层结构样本

各抽样指标取值的具体过程如下:

(1)层高。根据《国家住宅设计规范》^[16]的规定,普通住宅层高范围应为2.6~2.8 m。已知建筑顶层标高为16.2 m,则楼层数N的范围为

16.2/2.6~16.2/2.8,即 6.23~5.78,显然楼层数必然为整数,因此楼层总数为 6,层高中为 2.7 m。

(2) 双向跨度和梁截面尺寸。建筑平面投影呈矩形,长边为 32 m,短边为 24 m。根据工程经验,框架结构普通住宅的框架梁、连系梁经济长度范围分别为 6~8 m 和 4~6 m,梁截面高度分别取梁长的 1/12~1/8、1/18~1/14,截面宽度分别取梁高度的 1/3~1/2、1/3~1/2。首先确定跨数范围,随机抽样确定跨数后得到梁长度,显然主梁跨数应为 4 或 5,同理次梁跨数为 4、5 或 6;

(3) 柱截面尺寸。框架柱一般采用矩形截面,根据《抗规》^[8],抗震等级一二三级且超过 2 层时不宜小于 400 mm,在本文中,框架柱截面的样本空间由边长分别为 400、450、500、550、600 mm 的等边矩形截面组成,角柱截面积取中柱的 1.5 倍;

(4) 混凝土强度等级。对于普通民用多层框架住宅,在工程实践中建筑主体结构常用的混凝土强度等级一般为 C25、C30、C35;

(5) 填充墙截面比例。指该楼层所有填充墙的平面投影面积与楼层平面面积的比例,文中取经验范围 4%~8%,填充墙厚度统一取 200 mm。根据《蒸压加气混凝土砌块》^[17]的规定,框架结构填充墙与隔墙不承担荷载,常用的蒸压加气混凝土砌块等

级标号为 B05、B06,其对应的干容重分别为 500、600 kg/m³,考虑砂浆、抹灰等因素,取综合容重 900 kg/m³;

(6) 其它参数。建筑所处的场地类型为 II 类,结构阻尼比为 0.05。根据《建筑结构荷载规范》^[18]的规定,楼层均布活荷载取 2.0 kN/m²,楼层活荷载折减系数均简化取 0.8;考虑建筑主体外的固定设备、长期储物等恒荷载取建筑主体荷载的 1.1 倍。

各变量经上述步骤采用 LHS 方法随机抽样组合后,生成 200 个结构样本,验算每个样本的轴压比,并筛除不合格样本,根据《抗规》^[8]条款 6.3.6 的规定,抗震等级为三级的框架结构轴压比限值为 0.85,经验基础周期大约为 0.3 s,筛选后合格样本数为 103。

3.1.3 剪切层模型参数

多自由度集中质量剪切层模型需要标定的参数有弹性参数、骨架线参数和滞回参数三类,参照文献[12]的参数标定方法,以其中某个结构样本为例,抽样指标的取值见表 3。

与文献[12]中不同的是,层间初始剪切刚度和层质量直接由生成的样本参数计算得到,对应的简化剪切层模型参数见表 4(从上至下依次为第六至第一层)。

表 3 层模型样本参数

Table 3 The sample parameters of story-specific model

柱截面/m ²	主梁长度/m	次梁长度/m	主梁高跨比	次梁高跨比	填充墙率	混凝土标号
0.302 5	6.4	4	0.087 4	0.060 6	0.068 3	C30

表 4 多自由度集中质量层剪切模型参数

Table 4 The parameters of multiple-degree-of-freedom concentrated-mass model

弹性参数		骨架线参数				滞回参数
层间剪切刚度 $k_0/(N \cdot m^{-1})$	层质量 m/kg	屈服承载力 V_y/N	峰值承载力 V_p/N	屈服位移 u_y/m	峰值位移 u_p/m	耗能系数 τ
$6.14 \cdot 10^9$	$7.32 \cdot 10^5$	$5.89 \cdot 10^5$	$1.46 \cdot 10^6$	$9.59 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-4}$	0.3
$6.14 \cdot 10^9$	$7.32 \cdot 10^5$	$1.40 \cdot 10^6$	$3.47 \cdot 10^6$	$2.28 \cdot 10^{-4}$	$6.46 \cdot 10^{-4}$	0.3
$6.14 \cdot 10^9$	$7.32 \cdot 10^5$	$2.04 \cdot 10^6$	$5.07 \cdot 10^6$	$3.33 \cdot 10^{-4}$	$9.44 \cdot 10^{-4}$	0.3
$6.14 \cdot 10^9$	$7.32 \cdot 10^5$	$2.53 \cdot 10^6$	$6.27 \cdot 10^6$	$4.12 \cdot 10^{-4}$	$11.68 \cdot 10^{-4}$	0.3
$6.14 \cdot 10^9$	$7.32 \cdot 10^5$	$2.85 \cdot 10^6$	$7.08 \cdot 10^6$	$4.65 \cdot 10^{-4}$	$13.18 \cdot 10^{-4}$	0.3
$6.14 \cdot 10^9$	$7.32 \cdot 10^5$	$3.01 \cdot 10^6$	$7.48 \cdot 10^6$	$4.91 \cdot 10^{-4}$	$13.92 \cdot 10^{-4}$	0.3

3.2 地震响应分析

3.2.1 地震动记录选择与调幅

从适用于 II 类场地条件的地震动记录中,选取

El-Centro 波作为输入地震动,分别将其调幅为符合该建筑所在场地的小震、中震、大震的地震动强度。根据《抗规》^[8],该建筑所在场地的地震重现周期与 PGA 的对应关系见表 5。

表5 建筑所在场地地震重现期与PGA的关系

Table 5 Earthquake recurrence period and corresponding PGA of the building

地震影响	重现期/a	PGA/g
小震	50	0.033
中震	475	0.1
大震	2 475	0.2

3.2.2 地震响应结果与分析

结果显示,在三种强度的地震激励下,所有结构样本都是首层的层间位移角最大,与经验基本一致,且没有结构样本出现首层超越倒塌临界值的现象,满足“大震不倒”的抗震设防要求。各结构样本在不同地震动强度下各层的最大层间位移角及中位值如图3所示。

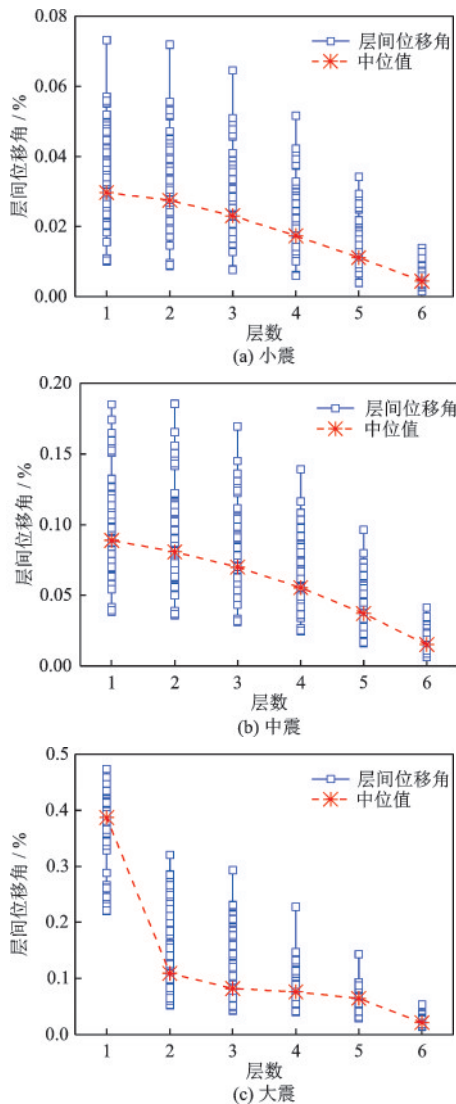


图3 各结构样本的最大层间位移角及中位值

Fig.3 The maximum inter-story drift ratio and median value for structural samples

3.3 框架结构地震损失结果与讨论

结果显示,各样本在不同地震强度下的损失主要集中在建筑下部的楼层,尤其是首层。且随着地震动强度增大,损失更加集中于首层。在小震时,建筑整体损失率中位值不足重置价值的1%;中震时,约为小震时的3倍,小于重置价值的2%,满足“小震不坏,中震可修”的抗震设防要求。各样本在不同地震动强度下各层的损失率及中位值如图4所示,整体损失率及中位值如图5所示,并取建筑的单位面积造价为1 200元,各层货币化损失中位值见表6,整体损失率及货币化损失的中位值见表7,表7中整体损失值比表6略大,是因为考虑了超高施工费用增加系数。

同时,采用考虑经验结构信息的剪切层模型评

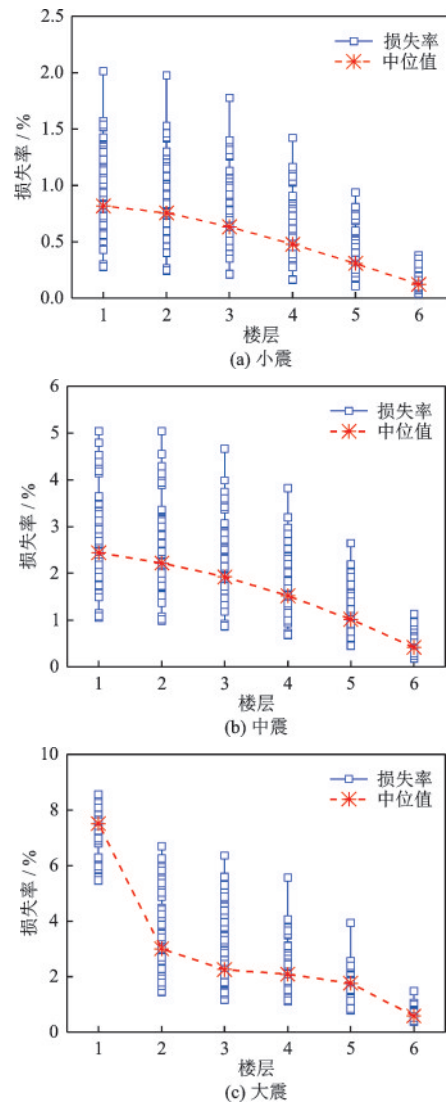


图4 各结构样本的损失率及中位值

Fig.4 The loss ratio and median value for structural samples

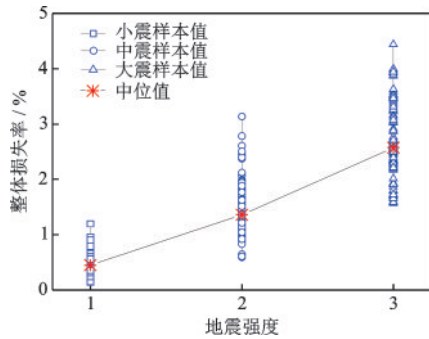


图5 不同地震强度下建筑的整体损失率

Fig.5 The total loss ratio of buildings with different earthquake intensities

表6 各层货币化损失的中位值

Table 6 Median value of monetization loss of each story

单位:万元

楼层	地震强度		
	小震	中震	大震
1	0.90	2.70	8.31
2	0.84	2.45	3.32
3	0.70	2.13	2.50
4	0.53	1.68	2.31
5	0.34	1.13	1.96
6	0.14	0.46	0.65
总计	3.45	10.55	19.04

表7 建筑整体损失率与货币化损失的中位值

Table 7 Median value of total loss ratio and monetization loss

	地震强度		
	小震	中震	大震
损失率/%	0.446 9	1.360 5	2.571 5
损失值/万元	3.49	10.71	19.38

估效率较高,其计算耗时主要在于非线性动力时程分析过程,以主频率为3.2 GHz的Intel i5-6500的四核服务器为例,层结构随机样本建立仅需2 s,每个剪切层模型的单次非线性动力分析时长依据地震动记录差异大约需要5~10 s。

4 结 论

本文结合经验结构信息的随机抽样方法与多自由度集中质量模型,提出一种RC框架结构剪切层模型,用于城市区域建筑的地震损失快速评估。通过采用结构设计数据经验的剪切层模型,能够在

建筑内部具体结构布置方式未知的情况下,较为准确地估算出建筑在不同地震动强度下的直接经济损失。具体结论如下:

(1) 考虑经验框架结构信息生成的层结构随机样本,贴合工程实际,满足规范要求,能够表征普通框架层结构空间分布特性,并实现高效率的建模过程。

(2) 本文所提框架结构地震损失快速评估方法可以兼顾计算效率与结果的可靠性。

(3) 采用本方法的框架结构算例表明,层结构模型的地震响应和地震损失与历史震害调查经验基本一致。

参考文献:

- [1] 肖光先.地震损失的预测方法[J].地震学刊,1987(1): 1-8,81.
Xiao G X. The predict methodology of seismic loss[J]. Journal of Seismology, 1987(1): 1-8, 81. (in Chinese)
- [2] FEMA. FEMA 445: Next-generation performance-based seismic design guidelines program plan for new and existing buildings [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2006.
- [3] Federal Emergency Management Agency. Multi-hazard loss estimation methodology. Earthquake model [R]. Washington, DC: HAZUS-MH 2.1 Technical Manual, 2012.
- [4] Ramirez C M, Liel A B, Mitrani-Reiser J, et al. Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41 (11): 1455-1475.
- [5] 曾翔,刘诗璇,许镇,等.基于FEMA-P58方法的校园建筑地震经济损失预测案例分析[J].工程力学, 2016, 33(增1):113-118.
Zeng X, Liu S X, Xu Z, et al. Earthquake loss prediction for campus buildings based on FEMA-P58 method: a case study[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(Sup1): 113-118. (in Chinese)
- [6] FEMA. Seismic performance assessment of buildings Volume 1—Methodology [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [7] Zeng X, Lu X, Yang T Y, et al. Application of the FEMA-P58 methodology for regional earthquake loss prediction[J]. Natural Hazards, 2016, 83(1):177-192.
- [8] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

- [9] 黄建良. 区域性建筑地震直接经济损失预测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Huang J L. Research on prediction method of seismic direct economic loss of building complex[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] 陆新征, 田源, 许镇, 等. 一种新型城市地震灾害模拟方法: 城市抗震弹塑性分析方法[J]. 科学通报, 2020, 65(11): 1055-1062.
Lu X Z, Tian Y, Xu Z, et al. A new urban earthquake disaster simulation method: City-scale nonlinear time-history analysis[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(11): 1055-1062. (in Chinese)
- [11] 孙楚津, 陆新征, 程庆乐, 等. 多层钢框架结构的区域震害模拟多自由度模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 749-756.
Sun C J, Lu X Z, Cheng Q L, et al. Multi-degree-of-freedom model for regional seismic damage simulation of multi-story steel frame structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 749-756. (in Chinese)
- [12] 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, 2016, 21(3): 461-485.
- [13] 建(构)筑物地震破坏等级划分: GB/T 24335—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] FEMA. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA-273) [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [15] 地震现场工作 第4部分: 灾害直接损失评估: GB/T 18208.4—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] 住宅设计规范: GB 50096—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [17] 蒸压加气混凝土砌块: GB 11968—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(本文责编: 苏泽云)



(上接第 1239 页)

- [18] 喻焯. 汶川地震区地震动估计经验模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
Yu Y. Empirical estimate model for ground motion of Wenchuan earthquake zone [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [19] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [20] 周强, 闵全环, 熊拥军, 等. 江西典型村镇既有房屋抗震性能分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 96-105.
Zhou Q, Min Q H, Xiong Y J, et al. Seismic performance analysis of existing typical rural buildings in Jiangxi[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 96-105. (in Chinese)
- [21] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [22] 王中强, 余志武. 基于能量损失的混凝土损伤模型[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(4): 365-369.
Wang Z Q, Yu Z W. Concrete damage model based on energy loss[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(4): 365-369. (in Chinese)
- [23] 杨福剑, 王国新. 主余震序列型地震动作用下 RC 框架结构损伤耗能研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(1): 45-52.
Yang F J, Wang G X. Damage energy dissipation analysis of RC frame structure under mainshock-aftershock sequence-type ground motions [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(1): 45-52. (in Chinese)
- [24] 孙艳丽, 杨海, 姜绍飞. 既有砖砌体结构容许变形值及抗震性能评估[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(5): 861-867.
Sun Y L, Yang H, Jiang S F. Evaluation of seismic performance and tolerant deformation on existing brick masonry buildings [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2013, 29(5): 861-867. (in Chinese)