

曹源. 基于构件变形的钢筋混凝土结构地震损失评估方法研究[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 134–141. [CAO Yuan. Research on Seismic Loss Assessment Methods of Reinforced Concrete Structures based on Component Deformation[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 134–141]

# 基于构件变形的钢筋混凝土结构 地震损失评估方法研究

曹 源

(华南理工大学建筑设计研究院有限公司, 广州 510641)

**摘要:** 根据钢筋混凝土梁、柱、剪力墙的构件变形指标限值, 建立了一套构件变形层次的地震损失评估方法, 并给出了地震损失的计算方法和评估流程, 基于 PERFORM-3D 开发了后处理程序实现该评估流程。利用该方法对不同设防烈度的常规框架-剪力墙结构进行评估, 并分析了地震动强度、构件类型等因素的影响, 对比评估结果后发现: 文中的评估方法能够有效计算单体建筑物在各强度地震作用下构件和结构的期望损失; 结构的抗倒塌安全储备系数 CMR 随着设防烈度的提高而降低, 高设防结构承担的倒塌风险比低设防结构高; 7.5 度、8 度和 8.5 度设防地区结构所承担的地震损失风险最高, 7 度设防结构次之, 6 度设防结构的地震损失风险最小。

**关键词:** 地震损失评估方法; 框架-剪力墙结构; 构件变形; 不同设防烈度地区

**中图分类号:** TU352.11; TU375.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2021)02-0134-08

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2021.02.19

## Research on Seismic Loss Assessment Methods of Reinforced Concrete Structures based on Component Deformation

CAO Yuan

(Architectural Design & Research Institute of SCUT Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on the deformation performance index limits of RC beams, columns and shear walls, a set of seismic loss assessment method for component deformation levels was established. Its theory and assessment procedure were given and the post-processing program ‘Loss-Calculation’ were developed to achieve this process. Using this method, the conventional frame-shear wall structures with different fortification intensity were evaluated, and the effects of ground motion intensity, component types were analyzed. The evaluation results were compared, and it was found that: the post-processing program can effectively calculate the expected loss of components and structures of a single building under the earthquakes with different intensities. The collapse resistance safety factor CMR of the structure decreases with increasing fortification intensity, the collapse risk of the high fortification structure is higher than that of the low fortification structure. The earthquake

**收稿日期:** 2020-08-18

**基金项目:** 广东省自然科学基金一面上项目: 基于神经网络的区域框架结构震损预测(2020A1515010739)

**作者简介:** 曹源(1993-), 男, 工程师, 主要研究领域为高层建筑结构抗震。

**E-mail:** 137868396@qq.com

loss risk of the 7.5 degree, 8 degree and 8.5 degree fortified structure is the highest, followed by the 7 degree fortified structure, and the 6 degree structure has the lowest earthquake loss risk.

**Keywords:** Earthquake loss assessment method; Frame-shear wall structure; Component deformation; Areas with different fortification

## 0 引言

随着基于性能的抗震设计方法<sup>[1]</sup>的不断完善,大震造成的建筑物倒塌和人员伤亡得到了有效的控制,但带来的经济损失却难以估量。为解决这一问题, Cornell 和 Krawinkler<sup>[2]</sup>等提出了以全概率理论为基础的新一代性能化设计方法,考虑了地震过程的各种不确定性。美国太平洋研究中心以此为基础,提出了新一代性能化设计方法的框架,即 PEER-PBEE<sup>[3]</sup>方法。Ramirez<sup>[4]</sup>、Shokrabadi<sup>[5]</sup>、Martins<sup>[6]</sup>等基于蒙特卡洛算法对 PEER-PBEE 方法进行简化,使其便于实际应用。美国联邦应急管理局 FEMA 于 2012 年发布了 FEMA-P58<sup>[7]</sup>,是新一代性能化设计方法的高度总结。

国内不少学者也对建筑结构的地震经济损失展开了研究。曾翔<sup>[8]</sup>等利用 FEMA-P58 方法预测了三栋典型框架的地震损失。李星军<sup>[9]</sup>等基于 PEER-PBEE 方法评估了框架的抗震性能,并计算了加固方案的投资收益率。罗文文、李英民<sup>[10]</sup>等对不同设防烈度的 RC 框架进行地震损失评估,分析表明各烈度区建筑的地震损失风险不一致。韩建平<sup>[11]</sup>等计算了框架-填充墙结构的地震损失,结果表明不考虑填充墙的建模方式将高估结构的地震损失。

从国内外的研究现状发现,大多数地震损失的研究都是以框架结构作为对象,而对于实际工程中广泛存在的框架-剪力墙结构涉及较少。再者, FEMA P-58 方法存在一定的局限性:采用层间位移角作为结构构件损伤状态的识别参数,并不能准确判断构件破坏状态。因此,本文依据《广东省建筑工程混凝土结构抗震性能设计规范》(DBJ/T15-151-2019)中的钢筋混凝土构件变形指标限值,提出了一套构件变形层次的地震损失评估方法。

## 1 地震损失评估方法的建立

### 1.1 地震损失评估理论

地震经济损失评估最直观的结果为损失的年平均超越概率曲线。为得到该曲线,需先得到  $E[L|IM]$ ,即地震强度为  $IM$  时的地震损失,计算方法如式(1)、(2)所示。

$$E[L|IM]=E[L|NC,IM](1-P[C|IM])+E[L|C,IM]P(C|IM) \quad (1)$$

$$E[L|NC,IM]=\sum_{i=1}^{na} a_i \int \sum_{j=1}^{nds_i} E[R|DS_j] \cdot p[DS_j|EDP] \cdot p[EDP|IM] dEDP \quad (2)$$

式中,  $E[L|NC,IM]$ 为地震强度为  $IM$  且结构未发生倒塌时的整体损失期望;  $E[L|C,IM]$ 为地震强度为  $IM$  且结构倒塌的整体损失期望,即结构拆除重建的费用;  $P[C|IM]$ 为地震强度为  $IM$  的倒塌概率;  $na$  为构件组的数量;  $a_i$  为第  $i$  组构件的修复费用;  $nds_i$  构件损坏程度等级的划分数目。  $E[R|DS_j]$ 为构件的损坏程度为  $DS_j$  时对应的构件损失期望;  $p[DS_j|EDP]$ 为结构响应参数达到 EDP 时,构件破坏状态达到  $DS_j$  发生的概率;  $p[EDP|IM]$ 为地震强度为  $IM$  时,结构响应参数为 EDP 的概率。

通过公式(1)、(2)可以得到  $E[L|IM]$ ,根据地震危险性曲线,将地震强度代换为地震动的年平均超越概率,即可得到结构整体地震损失期望的年平均超越概率曲线  $\lambda(L)$ 。

### 1.2 评估流程

根据式(1)、(2),得到基于构件变形的地震损失评估流程,如图1所示。

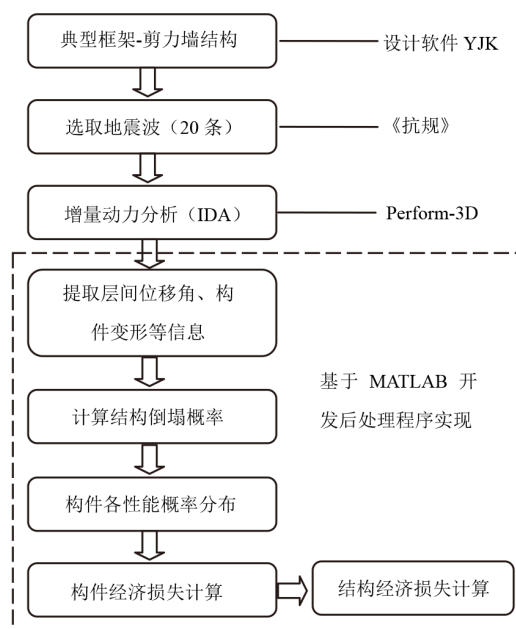


图1 地震损失评估流程图

Fig.1 Earthquake loss assessment flow chart

### 1.2.1 地震危险性分析

地震损失评估须进行地震危险性分析。为表达地震动强度  $im$  与其年平均超越概率的关系,引入地震危险性曲线  $\lambda(im)$ 。本文采用地震波的峰值加速度  $a_{\max}$  作为地震动强度指标。Cornell 学者<sup>[2]</sup>建议采用  $a_{\max}$  作为地震动强度指标的地震危险性曲线可采用下式表达:

$$\lambda_{a_{\max}} = k_0 \cdot (a_{\max})^{-k} \quad (3)$$

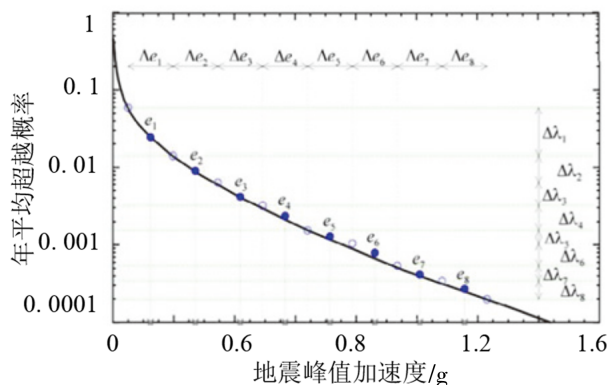


图2 地震危险性曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of earthquake hazard curve

式中,  $\lambda_{a_{\max}}$  表示地震波峰值加速度  $a_{\max}$  对应的年平均超越概率,  $k_0$  与  $k$  为待定系数。《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)<sup>[13]</sup>给出了多遇地震、设防地震、罕遇地震和极罕遇地震的地震峰值加速度及其对应的年平均超越概率。本文根据上述4个点进行数值拟合确定待定系数  $k_0$  与  $k$  的值,即可得到不同设防烈度区域的地震危险性曲线。

### 1.2.2 地震波选取

地震波选取对地震损失的评估结果有直接影响,选取地震波时必须遵循一定的原则。FEMA P-58 认为,所选地震波的平均地震影响系数曲线应与目标地震影响系数曲线在统计意义上相符。

本文将《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)<sup>[14]</sup>中的影响系数曲线作为目标曲线,选取在结构周期范围内的地震影响系数与目标曲线相符的20条地震波用于损失评估,同时,也满足规范对地震波计算得到的底部剪力的要求。

### 1.2.3 增量动力分析

要获得完整的地震损失曲线,需进行增量动力分析,明确地震峰值加速度取值的上限和下限。

“小震不坏”是中国抗震设防的目标之一,可以认为当地震动强度小于“多遇地震”时,结构的地震损失基本为0,故本文取“多遇地震”对应的地震峰值加速度作为增量动力分析的下限  $im_{\min}$ 。

对于上限  $im_{\max}$  的取值,若  $im_{\max}$  取值过大,其年平均超越概率非常小,已无实际意义。本文将《中国地震动参数区划图》中规定的“极罕遇地震”设为分析上限  $im_{\max}$ ,对应的年平均超越概率为  $10^{-4}$ 。

本文将选定的区间  $[im_{\min}, im_{\max}]$  等分为10个子区间,确定出各子区间端点的地震峰值加速度,并对各条地震波调幅,利用弹塑性时程分析软件 PERFORM-3D 求解各条地震波各峰值加速度的结构响应。

### 1.2.4 结构倒塌易损性分析

结构倒塌易损性分析的目标为得到地震强度为  $IM$  时的倒塌概率  $P[C|IM]$ ,其关键在于倒塌准则的选取。本文采用《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392: 2014)<sup>[15]</sup>中规定的倒塌判定准则,认为当出现下列情况之一时,结构倒塌:(1)结构的弹塑性层间位移角大于  $1/100$ ; (2)任意关键构件的损伤状态达到严重损坏。

### 1.2.5 构件破坏状态判断

对于结构类构件和非结构类构件应分别进行判断,结构构件的损伤识别参数为构件变形,非结构构件的损伤识别参数为层间位移角。

依据《广东省建筑工程混凝土结构抗震性能设计规范》,将构件的损坏程度划分为6个性能状态,分别为无损坏、轻微损坏、轻度损坏、中度损坏、比较严重损坏、严重损坏,用 DS1~DS6 表示。并根据规范给出的 RC 梁、柱、剪力墙构件的变形指标限值对结构中所有构件的损坏程度逐一判断,各个损坏程度与变形限值的对应关系如图3所示。

对于非结构构件,参考 FEMA P-58 方法划分为3个性能状态,分别为 OP(立即居住)、LS(生命安全)、CP(尚未倒塌),用 DS1~DS3 表示。本文参考了文献[16]、[17]的研究结果,归纳了填充墙、门窗、电梯、水电管线等非结构构件各性能状态对应的层间位移角限值,如表1所示。

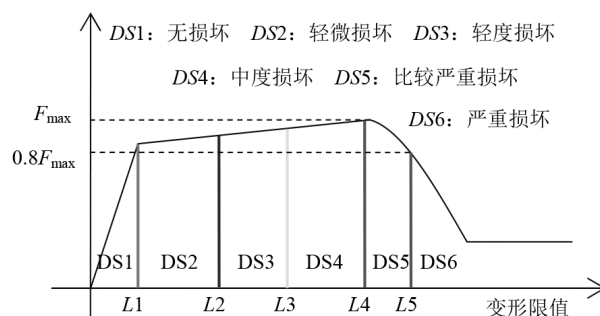


图3 损坏程度与变形限值关系示意

Fig.3 Relationship between performance level and deformation limits

表 1 非结构构件各破坏状态层间位移角限值  
Table 1 The limit value of the interlayer displacement angle of non-structural components in each performance state

构件类型	DS1 (立即居住)	DS2 (生命安全)	DS3 (尚未倒塌)
填充墙	0.004	0.008	0.012
门窗类	0.016	0.032	0.036
电梯类	0.004	0.008	0.024
水电管线	0.004	0.008	0.024

1.2.6 确定构件损失比

确定构件损失比的目的在于确定各构件处于不同性能状态时的损失期望。构件处于不同性能状态的损失期望计算如式(4)所示。

$$E[L|DS_j]=a \times E[R|DS_j] \tag{4}$$

式(4)中,  $DS_j$  为构件的性能状态,  $a$  为构件新建造的费用,  $E[R|DS_j]$  为构件的性能状态为  $DS_j$  时的损失比均值。

本文参考了文献[16]、[17]的研究结果, 归纳了不同类型构件处于不同性能状态的损失比均值, 如表 2 所示。

表 2 构件各性能状态损失比均值  
Table 2 The average value of the loss ratio of the component in each performance state

损坏程度	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6
结构构件	0	0.30	0.80	0.80	1.20	1.20
填充墙	0.10	0.60	1.20	—	—	—
门窗类	0.10	0.60	1.20	—	—	—
水电管线	0.10	0.50	1.20	—	—	—
电梯类	0.10	0.50	1.20	—	—	—

对于新建造费用  $a$ , 本文采用工程造价中的综合单价法计算, 以综合考虑材料费、人工费、机械费、管理费、利润等因素。构件的新建造费用计算如式(5)~(6)所示。

结构构件:  
$$a = \text{混凝土单价} \times \text{构件体积} + \text{钢筋单价} \times \text{钢筋重量} + \text{模板单价} \times \text{模板面积} \tag{5}$$

非结构构件:  
$$a = \text{构件单价} \times \text{构件数量} \tag{6}$$

由式(5)~(6)可以得到各类构件的新建造费用, 再代入式(4)计算即可得到构件处于不同性能状态下的损失期望。

1.2.7 地震损失计算统计

对结构在每条地震动下的响应进行地震损失计算, 计算流程如图 4 所示。

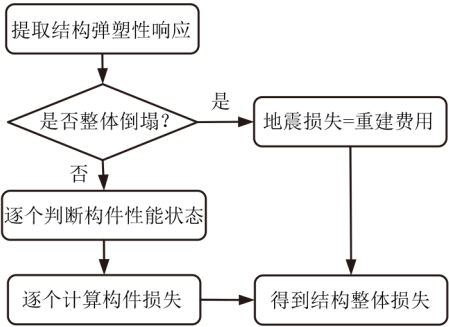


图 4 地震损失计算流程图  
Fig.4 Flow chart of earthquake loss calculation

当所有地震波的每个地震动强度下损失确定后, 即可得到不同强度地震的损失期望  $E[L|IM]$ , 结合地震危险性曲线进而可以得到损失的年平均超越概率曲线  $\lambda(L)$ 。

1.3 后处理程序开发

本文基于 MATLAB2016 平台, 开发了 PERFORM-3D 的后处理程序“Loss-Calculation”以批量实现损失评估流程, 程序主界面如图 5 所示。

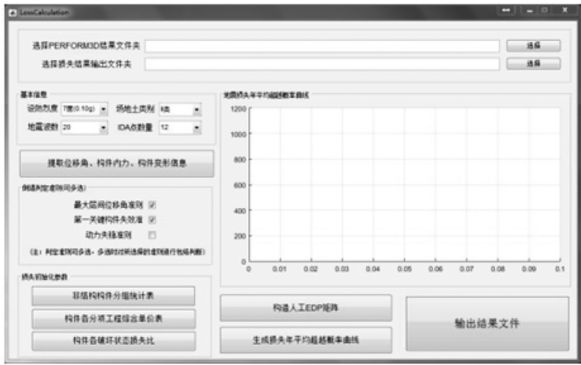


图 5 后处理程序的主界面  
Fig.5 Interface of the post program

2 不同设防烈度的框架-剪力墙结构地震损失评估

按照中国现行规范设计了 5 个不同设防烈度下的常规框架-剪力墙结构, 分别为 6 度、7 度、7.5 度、8 度、8.5 度。利用上节所述的评估方法对各结构进行损失评估, 对比不同设防烈度下结构所承担损失风险的差异。



## 2.1 模型概况

各框架-剪力墙结构总高度均为 60 m, 共 17 层, 首层层高 5 m, 其余层层高 3.5 m; 场地土类别为 II 类场地土; 标准层结构平面布置图如图 6 所示; 小震作用下结构的层间位移角对比如图 7 所示。

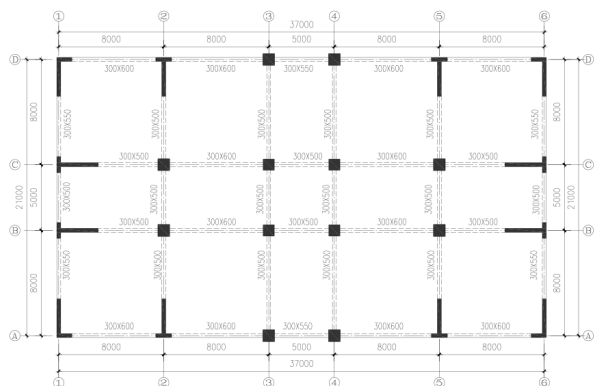


图 6 框架-剪力墙结构平面布置图

Fig.6 Frame-shear wall structure's plan

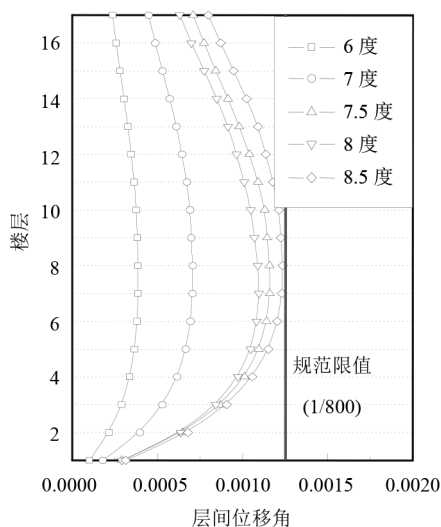


图 7 小震层间位移角对比

Fig.7 Comparison of the interlayer displacement angle under small earthquakes

## 2.2 地震危险性分析

根据《中国地震动参数区划图》<sup>[12]</sup>, 多遇地震、设防地震、罕遇地震和极罕遇地震对应的年平均超越概率分别为 0.02、0.0021、0.004 和  $10^{-4}$ 。按照 1.2.1 节方法得到各设防烈度的地震危险性曲线如图 8 所示。

### 2.3 地震动选取

按照 1.2.2 节选取得到的 20 条地震波信息如表 3 所示, 地震波反应谱如图 9 所示。

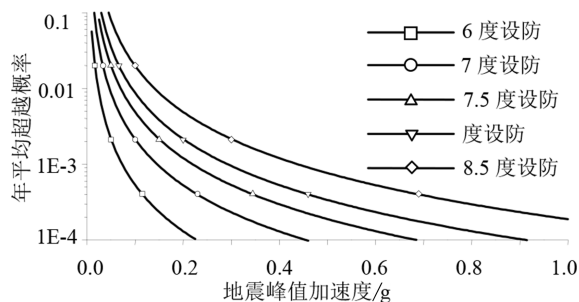


图 8 各设防烈度下的地震危险性曲线

Fig.8 Seismic hazard curve under different seismic fortified intensities

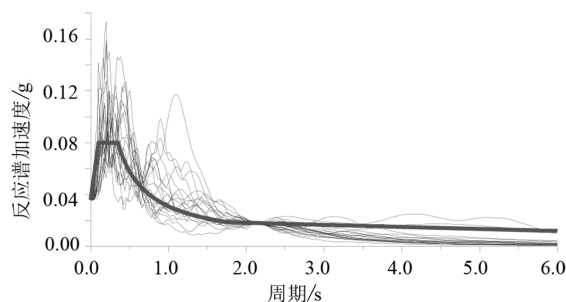


图 9 选取地震波反应谱曲线

Fig.9 Seismic wave response spectrum curve selected

表 3 选取的 20 条地震波信息

**Table 3** 20 seismic wave information selected

编号	名称	年份	测站	震级
1	Chi-Chi Taiwan-03	1999	KAU054-E	6.20
2	Loma Prieta	1989	DMH090	6.93
3	South Iceland	2000	BRS090	6.60
4	Valnerina	1979	ARQ	5.84
5	Meran	2001	SPGF	5.00
6	Kozani	1995	FLO	6.51
7	Superstition Hills-02	1987	B-WLF225	6.54
8	Umbria Marche	1997	MNF	5.60
9	Bingol/ Turkey	2003	BIN	6.40
10	Northridge- 01	1994	PAC175	7.00
11	Lazio Abruzzo	1984	PSC	5.50
12	Dodecanese	1987	ARG	5.30

(转下表)

(接表 3)

编号	名称	年份	测站	震级
13	Umbria Marche	1998	CAG	5.50
14	Bovec	1998	SVAL	5.70
15	Morgan Hill	1984	TIS	6.19
16	Tadmuriyah/ Jordan	1996	BTCH	5.50
17	Drama/ Greece	1985	OUR	5.50
18	Chi-Chi Taiwan-04	1999	KAU003-W	6.20
19	Campano Lucano	1999	BGI	6.90
20	Irpinia Italy-01	1980	A-BIS270	6.90

2.4 构件破坏状态对比

对 20 条地震波下构件所处的性能状态进行统计,对比各设防烈度结构梁、柱、剪力墙构件不同性能状态的发生频率,图 10 为罕遇地震下各设防烈度结构构件破坏状态频率对比。

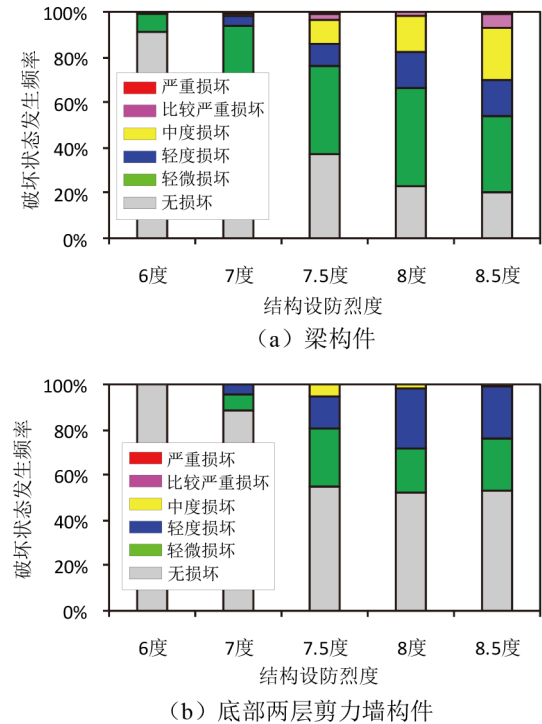


图 10 各设防烈度结构构件破坏状态频率对比

Fig.10 Comparison of the frequency of failure state of structural components under different fortification intensity

由图可知,随着设防烈度的提高,梁构件损坏程度也随之提高;剪力墙构件的损坏程度在 6 度、7 度、7.5 度亦随设防烈度的提高而增大,而 7.5 度、8 度和 8.5 度的损坏程度相当;柱构件在各设防烈度下均基本没有破坏。

2.5 倒塌易损性对比

按照 1.2.4 节的方法对结构模型在各条地震波下的倒塌情况进行判断,得到结构在各类设防烈度下的倒塌易损性曲线对比,如图 11 所示。

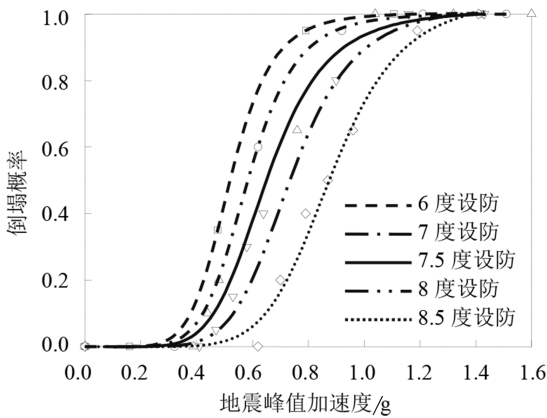


图 11 各设防烈度结构的倒塌易损性曲线

Fig.11 Collapse vulnerability curves of structures with different fortification intensity

倒塌易损性分析的结果如表 4 所示。结构的抗倒塌安全储备系数 CMR 值在 1.25~4.43 之间,并且随着设防烈度的提高而下降,7 度相对于 6 度下降幅度最大,说明高设防烈度地区的结构相比于低设防烈度地区将承受更大的倒塌风险,与文献[10]中框架结构的规律一致。

表 4 倒塌易损性分析结果

Table 4 Results of collapse vulnerability analysis			
设防烈度	倒塌均值/g	CMR 值	大震倒塌概率
6	0.51	4.43	0
7	0.58	2.52	0
7.5	0.66	1.91	2%
8	0.68	1.48	7%
8.5	0.86	1.25	15%

2.6 地震损失对比

按照 1.2.6 节方法计算构件各破坏状态的修复费用,结构构件和非结构构件的新建费用计算见表 5~表 6。利用后处理程序计算得到罕遇地震与极罕遇地震下的期望损失比如表 7 所示。

结构构件和非结构构件的损失比都随着设防烈度的提高而增加。其中，7.5 度、8 度和 8.5 度设防结构损失比较接近；6 度设防结构的损失比较小，损失比小于 2%。

对于结构类构件和非结构类构件，损失比均随着设防烈度的提高而提高，其中，7.5 度和 8 度的损失相当。

表 5 结构构件新建费用统计  
Table 5 New cost statistics for structural components

构件组名称	编号	砼等级	砼用量/m <sup>3</sup>	钢筋用量/t	模板用量/m <sup>2</sup>	新建费用/元
梁	1	C30	1.21	0.038	9	1388
	...	...	...	...	...	...
	846	C30	1.87	0.115	18	2778
柱	1	C50	2.86	0.112	20	3120
	...	...	...	...	...	...
	352	C30	2.77	0.045	13	2814
剪力墙	1	C50	3.12	0.204	40	4055
	...	...	...	...	...	...
	457	C30	2.45	0.125	25	3048

表 6 非结构构件新建费用统计  
Table 6 New cost statistics for non-structural components

构件组名称		长度(m/层)	体积(m³/层)	新建费用(元/层)	
填充墙	首层	X 方向	258	105	43 815
		Y 方向	267	117	47 648
	其余层	X 方向	258	117	46 675
		Y 方向	267	114	50 693
构件组		数量(个/层)	面积(m²/层)	新建费用(元/层)	
门	X 方向	26	66	18 987	
	Y 方向	28	86	23 892	
窗	X 方向	20	68	17 967	
	Y 方向	6	26	8128	
电梯类		4	—	50 000	
水电管线		—	—	180 000	

各设防烈度总损失比的年平均超越概率曲线如图 12 所示。由图可知，建筑总损失比随着设防烈度的提高而提高，其中 7.5 度和 8 度损失曲线基本一致，说明二者处于同一风险水平。对于 8.5 度设防的结构，在极罕遇地震下的损失比可达到 30%。

对图 12 中的曲线积分可得到该建筑的年平均损失期望  $EAL$ ( $EAL$  值可作为建筑保险费率的依据)，如表 8 所示，由表可知， $EAL$  值随设防烈度的变化也呈现相同的规律。

表 7 损失比均值对比 (%)  
Table 7 Comparison of the average of loss ratio

设防结构	大震		极罕遇地震	
	烈度	非结构	结构	非结构
6 度	0.58	0.24	1.83	0.60
7 度	4.16	3.21	9.35	7.25
7.5 度	10.94	9.84	19.59	19.16
8 度	11.42	9.97	20.68	19.26
8.5 度	14.53	14.58	24.14	29.15

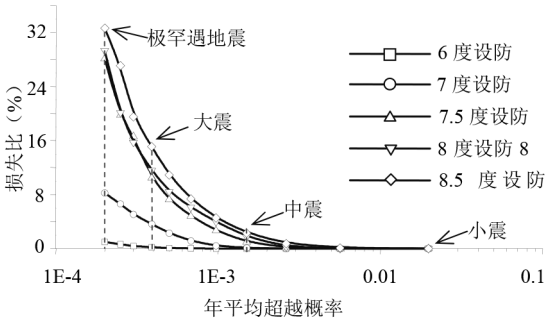


图 12 年平均超越概率曲线对比

Fig.12 Comparison of annual average probability of exceeding curve

表 8 年平均损失期望

Table 8 Annual average loss expectation

设防烈度	地震峰值加速度/g	EAL(元)下限	上限
6 度	0.017	0.160	980
7 度	0.033	0.320	3010
7.5 度	0.050	0.480	14 030
8 度	0.067	0.640	15 830
8.5 度	0.100	0.960	26 050

3 结论

本文建立了基于构件变形的地震损失评估方法，并基于 PERFROM3D 开发了后处理程序实现评估流程。按现行中国规范设计了 5 个设防烈度（6 度、7 度、7.5 度、8 度、8.5 度）的框架-剪力墙结构，利用本文方法对 5 个结构评估，对比评估结果后得出以下结论：

- (1)本文提出的地震损失评估方法能有效计算建筑的整体损失。
- (2)结构的抗倒塌安全储备系数 *CMR* 值随着设防烈度的提高而降低，高设防烈度的结构较低设防烈度承担更大的倒塌风险。
- (3)不同设防烈度结构所承担的地震损失风险不一致。建筑整体的损失比随着设防烈度的提高而提高，其中 7.5 度和 8 度损失风险相当，处于同一水平。

参考文献

[1] ASCE. ASCE/SEI 41-13 Seismic evaluation and retrofit of existing buildings[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers Press, 2014.

[2] Cornell CA, Krawinkler. Progress and challenges in seismic performance assessment[J]. PEER Center News,

2000, 3(2):1-2.

[3] Fajfar P, Krawinkler H. Performance -based seismic design concepts and implementation, PEER Report 2004/05[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2004.

[4] Ramirez CM, Liel AB, Mitrani -Reiser J. Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings[J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 2012, 41(11): 1455-1475.

[5] Shokrabadi M, Banazadeh M, Shokrabadi M. Assessment of seismic risks in code conforming reinforced concrete frame [J]. J EARTHQ ENG, 2015, 98(9): 14-28.

[6] Martins L, Silva V, Marques M. Development and assessment of damage-to-loss models for moment-frame reinforced concrete buildings [J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 2016, 45: 797-817.

[7] Hamburger R O. FEMA P58 seismic performance assessment of buildings[R]. Washington, D.C: FEMA, 2012.

[8] 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(S1): 113-118.

[9] 李星军. 基于概率的单跨外廊式学校建筑抗震性能评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

[10] 罗文文, 李英民, 韩军. 基于全概率 PBEE 方法的 RC 框架结构地震损失分析[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 186-194.

[11] 韩建平, 褚小嘉. 基于易损性分析的 RC 框架-填充墙结构地震直接经济损失计算[J]. 世界地震工程, 2016, 32(3): 13-20.

[12] 广东省住房和城乡建设厅. DBJ/T 15-151-2019 建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程[S]. 北京: 中国城市出版社, 2019.

[13] 中国地震局. GB 18306-2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[15] 中国工程建设协会. CECS 392-2014 中国建筑结构抗倒塌设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[16] 戚永乐. 基于材料应变的 RC 梁、柱及剪力墙构件抗震性能指标限值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[17] Vaslani H, Miranda E. Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in building[R]. California, US: The John A. Blume Earthquake Engineering Center, 2005.

[18] Beck J L, Porter K A, Shaikhutdinow R V, et al. Impact of seismic risk on lifetime property values[R]. Pasadena: California Institute of Technology, 2002.