

基于 IDA 方法的框架结构震害风险评估¹

杨贝贝^{1,3)} 王志涛^{2,3)} 张秀彦⁴⁾

1) 北京工业大学, 建筑工程学院, 北京 100124

2) 北京工业大学, 建筑与城市规划学院, 北京 100124

3) 北京工业大学抗震减灾研究所, 北京 100124

4) 北京财贸职业学院, 北京 101101

摘要 为了评估不同抗震设防烈度区建筑结构震害风险, 即场地地震危险性与结构地震易损性的卷积, 本文以典型框架结构为例, 对其震害风险进行研究。依据抗震设计规范, 分别按照 6 度、7 度和 8 度设计 3 个 3 跨 10 层框架结构模型, 采用动力增量分析方法 (Incremental Dynamic Analysis, IDA) 对其进行地震易损性分析。同时, 基于我国地震烈度概率分布特点, 应用 MATLAB 软件生成符合极值 III 型分布的地震烈度, 并将其转化为地震加速度峰值, 联合地震易损性结果评估模型震害风险。通过划分震害风险等级, 为建筑结构抗震防灾对策的制定提供借鉴。

关键词: 框架结构 IDA 地震易损性 地震危险性 震害风险

引言

地震是一种极具破坏性的灾难, 全世界地震多发的国家都因地震造成不可弥补的损失, 人民生命与财产安全受到严重威胁。对建筑结构采取抗震设防措施是减轻地震灾害损失的根本手段, 而地震区划是工程抗震设防的基础和前提条件。现阶段超过设防水平的大地震的发生不能忽视, 如唐山地震 (1978 年)、汶川地震 (2008 年) 等多次地震中, 地震实际烈度往往超出抗震设计规范的设防烈度 (陈肇元, 2008), 造成大面积楼房倒塌, 数百万人流离失所。因此, 灾前对既有建筑结构开展震害评估, 并采取相应防灾措施尤为重要。传统的地震预测分析方法通常指对结构在特定地震作用下发生不同破坏状态的可能性进行分析, 由于未充分考虑地震活动的不确定性, 不能较好地反映建筑结构潜在的地震风险水平。Preciado 等 (2015) 进行建筑结构震害风险评估时联合结构易损性和场地危险性, 并以二者卷积为表征, 表示结构在未来某一段时间内超过或发生某种地震破坏状态的概率, 从而明确度量建筑结构未来可能发生的风险水平, 为做好灾前预防、地震应急准备和灾后救援工作提供科学的决策依据, 也是贯彻“从减少灾害损失向减轻灾害风险转变” (罗华春, 2017) 思想的体现。

1 基金项目 国家重点研发计划课题 (2019YFC1520803)

[收稿日期] 2019-09-16

[作者简介] 杨贝贝, 女, 生于 1995 年。硕士研究生。主要从事城市与工程安全减灾等方面的研究。E-mail: 1293854343@qq.com

[通讯作者] 王志涛, 男, 生于 1980 年。副教授, 硕士生导师。主要从事城市与工程安全减灾等方面的研究。E-mail: ieeewzt@163.com

在长期的实践探索中,国内外学者在结构震害风险研究方面取得了一系列有价值的成果。Melani 等(2016)采用 IDA 方法对某低层钢筋混凝土框架结构开展易损性分析,并基于框架结构概率风险四次积分公式,对其进行地震风险分析和年损失估计。Berto 等(2012)基于强震环境对钢筋混凝土构件的影响研究,提出概率风险管理方法,计算与建筑结构长期性能相关的地震风险。谷音等(2012)针对某典型矮塔斜拉桥,采用 LHS-MC 方法对其地震风险概率进行评估。尹超等(2016)以实际路堤结构为例,采用蒙特卡罗抽样方法评价有无挡土墙路堤的震害风险,提出基于风险可接受度的路堤抗震设计与管理方法。然而,城市中存在的大量钢筋混凝土框架结构震害风险尚未可知,对不同抗震设防烈度区框架风险等级的划分仍处于研究阶段。

基于上述认识,综合考虑我国地域辽阔且国土范围内地震危险性差异大的实际情况(马玉宏等,2002)和目前国内最主要的钢筋混凝土建筑结构形式,本文以钢筋混凝土框架结构为例,按照不同设防烈度要求设计 3 个结构模型,采用 IDA 方法对模型进行地震易损性分析和不同地震作用的可能性分析,评估结构震害风险,为抗震防灾对策的制定提供参考。

1 结构易损性分析

根据地震影响区域、地震损伤数据采集方法和计算方法的不同,地震易损性评价的方法主要有经验方法和理论方法(Wu 等,2012)。理论方法内容主要包括确定损伤判别条件、确定结构模型、选择和输入地震动、IDA 分析、绘制易损性曲线等,主要通过计算数值反映结构各损伤状态与地震动强度之间的概率关系(孙柏涛等,2018)。IDA 方法是目前性能化地震工程(Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE)中评价结构地震反应、预测结构震害最常用的方法之一。该方法可对结构进行从弹性状态到弹塑性状态直至倒塌的全过程分析,能较好地反映结构在未来不同地震作用下的抗震能力变化规律(侯炜,2013)。因此,本文采用 IDA 方法进行结构地震易损性分析。

1.1 IDA 指标选取

IDA 分析结果由地震动强度指标 IM (Intensity Measures) 与结构性能参数指标 DM (Damage Measures) 之间的关系表示,目前国内外常用的地震动强度指标主要包括第一模态谱加速度 $S_a(T_1, 5\%)$ 和地震加速度峰值 PGA (g),为了与地震危险性关联,本文选取 PGA 作为地震动强度指标。最大层间位移角 θ_{\max} 通过体现层间变形的综合结果在整体层面反映结构抗震性能(蒋欢军等,2009),因此,本文选取 θ_{\max} 作为结构性能参数指标。

1.2 结构破坏等级判别

建筑结构地震破坏等级随着破坏程度的加深分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌。框架结构最大层间位移角 θ_{\max} 与地震破坏等级之间的对应关系如表 1 所示(马东辉等,2007)。

表 1 最大层间位移角与地震破坏等级的关系

Table 1 The relationship between the maximum inter-story drift ratios and damage degrees

破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
θ_{\max}	$\theta_{\max} < 1/400$	$1/400 \leq \theta_{\max} < 1/250$	$1/250 \leq \theta_{\max} < 1/125$	$1/125 \leq \theta_{\max} < 1/50$	$\theta_{\max} \geq 1/50$

1.3 结构模型信息

本文以住宅中常用的内廊式结构为例进行研究，考虑所建模型应能从一定程度上反映按照不同设防标准设计和建造的一般框架结构抗震性能，采用较规则的平面布置，如图 1 所示。按照相关规范（中华人民共和国住房和城乡建设部等，2010；中华人民共和国住房和城乡建设部，2012）要求，采用 PKPM 软件建立 3 个抗震设防烈度分别为 6 度（0.05g）、7 度（0.1g）、8 度（0.2g）的 3 跨 10 层框架结构模型。场地类别为 II 类，设计地震分组为第二组，场地特征周期为 0.40s。结构首层层高 4.5m，其他层层高 3.6m，建筑高度和抗震等级如表 2 所示。恒荷载标准值取 4.6kN/m^2 ，活荷载标准值不上人屋面取 0.5kN/m^2 、楼面取 2.5kN/m^2 。

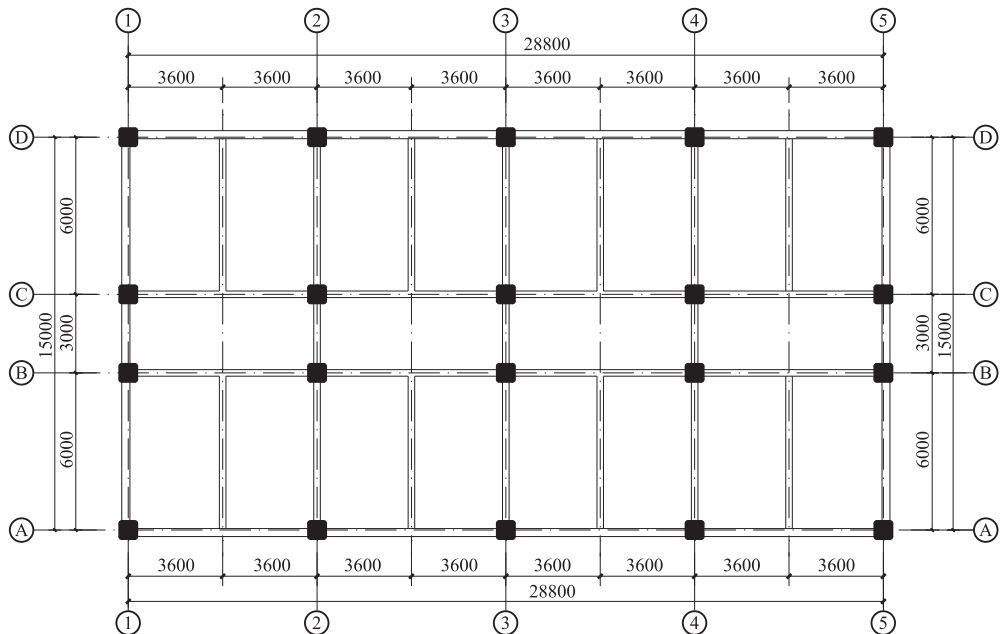


图 1 结构平面布置（单位：mm）

Fig. 1 The plan layout of structure (unit: mm)

表 2 结构抗震等级

Table 2 Seismic grade of structures

项目	模型 1	模型 2	模型 3
设防烈度	6 度 (0.05g)	7 度 (0.1g)	8 度 (0.2g)
建筑高度/m	36.9	36.9	36.9
抗震等级	三级	二级	一级

1.4 地震动选取和输入

不同地震动输入得到的地震作用效应值差异较大，有时可达数十倍（王亚勇等，1991）。如果建筑物所在场地具有实际强震记录，则为最优选择，但大部分情况下并不具备满足条件的强震记录。与美国地质勘测中心（United States Geological Survey, USGS）划分的 S2 场地基本相似，为使选用的地震动频谱特性尽可能与建筑物所在场地保持一致，从 S2 场地中选

取 30 条具有代表性的强震记录 (FEMA 建议 20 条以上), 将 PGA 调幅后作为地震动输入, 如表 3 所示。

表 3 地震动基本信息

Table 3 Basic information of ground motion

编号	名称	时间/年	台站	PGA/g
1	Livermore-02	1980	San Ramon-Eastman Kodak	0.191
2	Westmorland	1981	Parachute Test Site	0.219
3	Imperial Valley-06	1979	Delta	0.284
4	Northridge-06	1994	LA-Century City CC North	0.123
5	Whittier Narrows-01	1987	Downey-Co Maint Bldg	0.177
6	Whittier Narrows-01	1987	Brea Dam (Downstream)	0.231
7	Whittier Narrows-02	1987	LA-116th St School	0.157
8	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	0.342
9	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	0.42
10	Northridge-01	1994	LA-Century City CC North	0.223
11	Northridge-01	1994	LA-Obregon Park	0.467
12	Sierra Madre	1991	LA-Obregon Park	0.224
13	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	0.451
14	Loma Prieta	1989	Capitola	0.480
15	Victoria, Mexico	1980	LA-Obregon Par	0.118
16	Morgan Hill	1984	Capitola	0.117
17	San Fernando	1971	Carbon Canyon Dam	0.070
18	San Fernando	1971	Gormon-Oso Pump Plant	0.087
19	Imperial Valley-07	1979	Bonds Corner	0.092
20	Imperial Valley-07	1979	El Centro Array #7	0.161
21	Livermore-01	1980	San Ramon-Eastman Kodak	0.106
22	Victoria, Mexico	1980	Chihuahua	0.118
23	Whittier Narrows-02	1987	Inglewood-Union Oil	0.133
24	Landers	1992	Downey-Co Maint Bldg	0.046
25	Landers	1992	Inglewood-Union Oil	0.040
26	Northridge-06	1994	LA-Baldwin Hills	0.052
27	Hector Mine	1999	Downey-Co Maint Bldg	0.031
28	Hector Mine	1999	LA-116th St School	0.022
29	CA/Baja Border Area	2002	Calexico Fire Station	0.094
30	CA/Baja Border Area	2002	El Centro Array #7	0.078

1.5 易损性分析

统计和实际工程中认为结构能力参数 C 服从对数正态分布, 假定结构反应参数 D 也服从对数正态分布 (李玉, 2015):

$$C = \ln(\hat{C}, \beta_c) \quad (1)$$

$$D = \ln(\hat{D}, \beta_d) \quad (2)$$

式中, \hat{C} 、 \hat{D} 分别表示结构能力和结构反应均值; β_c 、 β_d 分别表示结构能力和结构反应对数标准差。

结构进行 IDA 分析后, 可得最大层间位移角 θ_{\max} (结构反应 D) 和 PGA 的对应关系 (何益斌等, 2016) 为:

$$D = aPGA^b \quad (3)$$

上式两边分别取对数可得:

$$\ln D = \ln a + b \ln PGA = A + B \ln PGA \quad (4)$$

式中, a 、 b 、 A 、 B 为回归系数, 可根据结构 IDA 分析结果拟合得到。

易损性曲线表示不同地震作用下结构反应 D 超出某一破坏等级所定义的结构能力 C 的条件概率 (贾晗曦等, 2019), 即结构失效概率 P_f :

$$P_f = P(C/D \leq 1) \quad (5)$$

根据式 (1) 和式 (2), 已知 D 和 C 均服从对数正态分布, 则结构失效概率可表示为:

$$P_f = \Phi \left[\frac{\ln(\hat{D}/\hat{C})}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (6)$$

式中, \hat{C} 根据表 1 中以最大层间位移角表示的结构性能量化指标取值; $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$ 根据规定: 当结构易损性曲线以地震峰值加速度 PGA 为自变量时取 0.5, 本文取 0.5; $\Phi(\cdot)$ 为正态分布函数, 其取值可通过查询标准分布表确定。

对 30 条地震动 PGA 进行调幅, 分别调至 0.2g、0.4g、0.6g、0.8g、1.0g、1.2g, 得到结构性能参数 (θ_{\max}) 与地震动强度 (PGA) 之间的关系曲线, 即 IDA 曲线簇, 如图 2—4 所示。

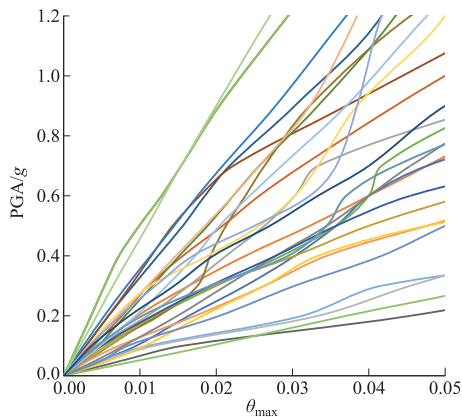


图2 6度设防烈度框架结构 IDA 分析结果
Fig. 2 IDA analysis results of the 6 intensity frame structure

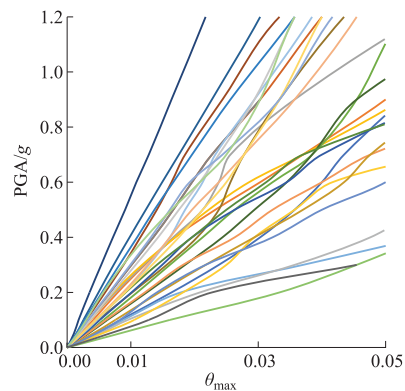


图3 7度设防烈度框架结构 IDA 分析结果
Fig. 3 IDA analysis results of the 7 intensity frame structure

对结构模型进行 IDA 分析后, 将纵横坐标取对数, 拟合线性关系, 并根据上述计算方法

分别得到结构易损性曲线，如图 5—7 所示。

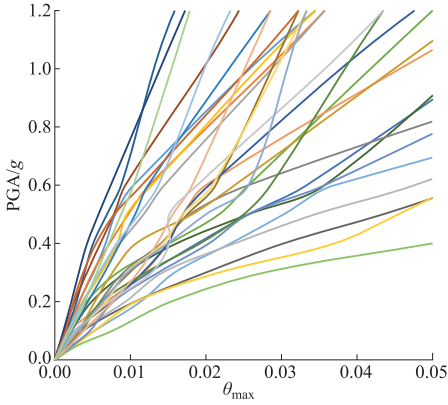


图 4 8 度设防烈度框架结构 IDA 分析结果
Fig. 4 IDA analysis results of the 8 intensity frame structure

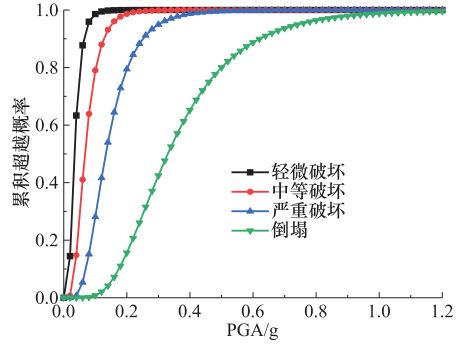


图 5 6 度设防烈度框架结构易损性曲线
Fig. 5 Fragility curves of the 6 intensity frame structure

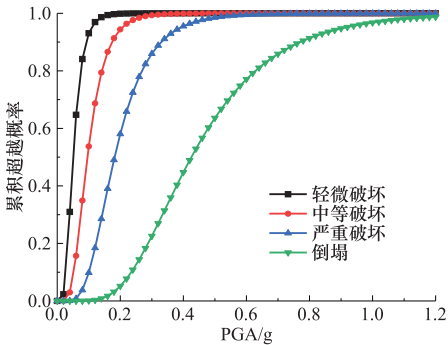


图 6 7 度设防烈度框架结构易损性曲线
Fig. 6 Fragility curves of the 7 intensity frame structure

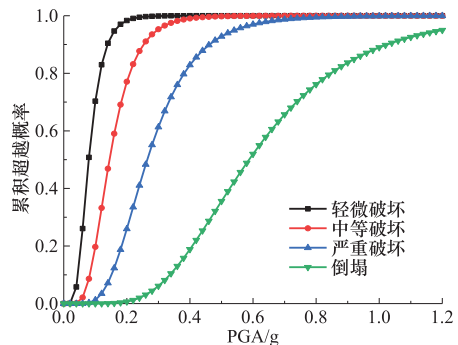


图 7 8 度设防烈度框架结构易损性曲线
Fig. 7 Fragility curves of the 8 intensity frame structure

由图 5—7 可知，结构发生各种破坏状态的累积超越概率曲线均随着 PGA 的增大呈上升趋势，PGA 越大，结构震害越严重；对于同一破坏状态的累积超越概率曲线，8 度设防烈度结构上升趋势最缓，同一地震动强度作用下 8 度设防烈度结构发生严重破坏和倒塌的概率更小，说明 8 度设防烈度结构较 6 度和 7 度设防烈度结构具有更好的抗震能力。

2 震害风险评价

2.1 地震烈度概率分布

根据高小旺等（1985）对华北、西北、西南地区的 45 个城镇地震危险性分析结果，一个地区在未来 50 年内发生的地震烈度服从极值 III 型分布，分布函数为：

$$F(x) = \exp \left[- \left(\frac{\omega - x}{\omega - \varepsilon} \right)^K \right] \quad (7)$$

对分布函数求导可得概率密度函数 $f(x)$ ，即某一场地未来 50 年内发生各地震烈度的概率密度：

$$f(x) = \frac{K(\omega - x)^{K-1}}{(\omega - \varepsilon)^K} \exp \left[- \left(\frac{\omega - x}{\omega - \varepsilon} \right)^K \right] \quad (8)$$

式中， x 表示地震烈度，为 1—12 的离散变量； ω 为烈度上限值，根据目前通用的地震烈度划分方法， ω 取 12； ε 为众值烈度，即未来 50 年内超越概率为 63.2% 的地震烈度； K 为形状参数，取决于一个地区地震背景的复杂性，根据文献（吕大刚，1999），形状参数 K 的取值如表 4 所示。由式（8）绘制不同设防烈度地区地震概率密度曲线，如图 8 所示。

表 4 形状参数 K 的取值

Table 4 Values of shape parameter K

基本烈度	6 度	7 度	8 度
K	9.7932	8.3339	6.8713

2.2 震害风险计算方法

结构震害风险可定义为：在考虑场地地震危险性的基础上，结构发生各种破坏状态的可能性，在数值上等于场地危险性和地震易损性的卷积。结构在未来 50 年内发生震害的概率 P 计算公式如下：

$$P = \sum_{\text{all } x_i} P(C \leq D | PGA = x_i) P(PGA = x_i) \quad (9)$$

式中， x_i 为未来可能遭遇的 PGA 。由于 PGA 的取值是连续的，因此式（9）可写为：

$$P = \int P(C \leq D | PGA = x_i) f(x_i) dx \quad (10)$$

式中， $f(x_i)$ 为 PGA 取值概率密度函数，与地震烈度概率密度函数 $f(x)$ 一致。

2.3 基于蒙特卡罗方法的风险评价

蒙特卡罗方法是以概率和统计理论方法为基础的数值计算方法，也称统计模拟方法或随机抽样技术，通过使用随机数（或伪随机数）解决计算问题。本文根据蒙特卡罗思想产生大量符合地震概率密度的随机数，模拟未来场地可能遭遇的地震烈度。考虑积分计算的精确性，将地震烈度作为连续变量，以式（7）为母体，采用蒙特卡罗方法通过 MATLAB 软件对地震烈度进行 n 次抽样，并根据公式将地震烈度转化为 PGA ，则每个 PGA 在整体中出现的概率为 $1/n$ ，产生的随机样本 n 越大，结果越接近真实值。本文取 $n=50000$ ，50000 个随机数即表示该地区可能发生的地震烈度值及其分布特征。当对不同设防烈度地区进行计算时，由于其分布特征不同，因而对结构造成的危险性也不同。

将抽样后得到的地震烈度 I 根据刘恢先等（1981）提出的公式转换为 PGA ：

$$PGA = 10^{(I \cdot \lg 2 - 0.01)} \quad (11)$$

根据大数定律，式（10）可写为：

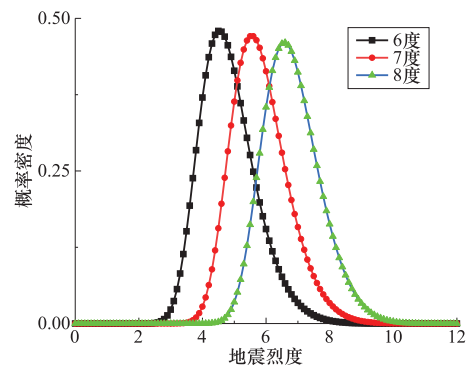


图 8 地震烈度概率密度曲线

Fig. 8 Curves of probabilistic densities of seismic intensities

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{50000} P(C \leq D | PGA = x_i) \quad (12)$$

结构超越各级破坏的风险概率 P_j 为:

$$P_j = \sum_{i=1}^{50000} \frac{P(C \leq D | PGA = x_i)}{50000} \quad (13)$$

式中, $j=1, 2, 3, 4, 5$, 代表每级震害状态, 分别对应基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌。

同理, 可知结构发生各级震害的风险 C_j 为:

$$C_j = \begin{cases} P_j - P_{j+1} & j \leq 4 \\ P_j & j = 5 \end{cases} \quad (14)$$

2.4 震害风险评价

依据上述分析模型, 结合本文结构易损性分析结果, 计算得到不同设防烈度框架结构 50 年震害风险结果, 如表 5—7 所示。

表 5 6 度设防烈度框架结构震害风险评价结果 (%)

Table 5 Seismic risk assessment results of 6 intensity frame structure (%)

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
超越风险	100	29.04	8.91	1.92	0.14
发生风险	70.96	20.13	6.99	1.78	0.14

表 6 7 度设防烈度框架结构震害风险评价结果 (%)

Table 6 Seismic risk assessment results of 7 intensity frame structure (%)

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
超越风险	100	42.34	16.09	4.25	0.43
发生风险	57.66	26.25	11.84	3.82	0.43

表 7 8 度设防烈度框架震害风险评价结果 (%)

Table 7 Seismic risk assessment results of 8 intensity frame structure (%)

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
超越风险	100	55.20	25.64	8.28	1.07
发生风险	44.80	29.56	17.36	7.21	1.07

由表 5—7 可知, 在 3 类设防烈度地区结构处于基本完好和轻微破坏状态风险的概率较大, 分别为 91.09%、83.91% 和 74.36%, 发生严重破坏和倒塌状态风险的概率较低。由 6 度、7 度、8 度抗震设防烈度框架结构震害风险对比可知, 8 度设防烈度框架结构发生严重破坏和倒塌状态风险的概率最大, 分别为 7.21%、1.07%; 7 度设防烈度框架结构次之, 发生严重破坏

和倒塌状态风险的概率分别为 3.28%、0.43%；而 6 度设防烈度框架结构发生严重破坏和倒塌状态风险的概率最低，分别为 1.78%、0.14%。综合结构地震易损性结果可以看出，造成结构震害风险的因素除结构抗震能力外，还与其所处抗震设防烈度地区有关。

2.5 震害风险等级划分

为综合考虑结构不同震害等级的发生风险，并实现对不同设防烈度地区结构震害风险的排序，本文采用综合震害风险指数 R 表征结构震害风险平均程度，其数值范围 0—1，结构综合震害风险指数越小，表示结构震害风险水平越低。参考震害指数（尹之潜等，1990）划分方法，建议各震害等级对应的综合震害风险指数范围如表 8 所示。

表 8 综合震害风险指数划分

Table 8 Composite seismic risk indexes classification

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
综合震害风险指数范围	$0 < R_1 \leq 0.2$	$0.2 < R_2 \leq 0.4$	$0.4 < R_3 \leq 0.6$	$0.6 < R_4 \leq 0.8$	$0.8 < R_5 \leq 1$
综合震害风险指数中值	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9

结构综合震害风险指数计算公式如下：

$$R = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 R_i C_j \quad (15)$$

式中， C_j 为结构发生各级震害的风险； R_i 为各级震害风险指数中值， $i=1、2、3、4、5$ 。

结构综合震害风险指数由式（15）计算，既考虑结构各级震害风险的发生概率，又量化结构震害风险。

为了更直观地对建筑结构震害风险水平进行评定和分类，本文根据结构综合震害风险指数将结构震害风险等级划分为 4 级，由低到高分别为 I 级、II 级、III 级、IV 级，从 I 级到 IV 级表示结构震害风险越来越严重，如表 9 所示。

表 9 震害风险等级划分

Table 9 Seismic risk grades classification

综合震害风险指数	$0 < R \leq 0.25$	$0.25 < R \leq 0.5$	$0.5 < R \leq 0.75$	$0.75 < R \leq 1$
震害风险等级	I 级	II 级	III 级	IV 级

结合表 5—7 中不同设防烈度框架结构发生各震害等级的风险，按照式（15）进行计算，得到结构综合震害风险指数，进而根据表 9 中综合震害风险指数范围判断结构震害风险等级，计算和判断结果如表 10 所示。

表 10 结构综合震害风险指数和震害风险等级

Table 10 Composite seismic risk indexes and risk grades of buildings

结构	6 度设防烈度框架结构	7 度设防烈度框架结构	8 度设防烈度框架结构
综合震害风险指数	0.18	0.22	0.28
震害风险等级	I 级	I 级	II 级

经过计算, 6 度、7 度、8 度设防烈度框架结构综合震害风险指数分别为 0.18、0.22、0.28, 可知 8 度设防烈度地区框架结构震害风险最高, 7 度设防烈度地区框架结构震害风险次之, 6 度设防烈度地区框架结构震害风险最低。根据表 9 可知, 6 度、7 度设防烈度框架结构综合震害风险指数为 0—0.25, 震害风险等级为 I 级; 8 度设防烈度框架结构震害风险指数为 0.25—0.5, 震害风险等级为 II 级。

3 结论

1) 进行建筑结构震害风险分析时, 综合考虑结构地震易损性和地震危险性, 通过对风险水平进行量化与评估, 更全面和直观地反映建筑结构未来一段时间存在潜在破坏可能, 对制定科学合理的抗震防灾对策更有意义。

2) 在抗震能力方面, 按照 6 度、7 度、8 度设防烈度设计的框架结构随着设防烈度的升高, 抗震性能有所提高。但由于不同设防烈度地区地震危险性的差异, 导致综合考虑地震危险性后结构震害风险趋势发生变化, 如 8 度设防烈度地区结构震害风险等级为 II 级, 而 6 度和 7 度设防烈度地区结构震害风险等级为 I 级。因此地震危险性在震害风险中起着不容忽视的作用, 在城市抗震防灾规划中应注意高烈度地区建筑结构震害风险的防范。

3) 由于建筑结构使用功能不同, 使其平立面布置等具有较大差异, 必然导致其在结构设计方面存在差异, 难以通过单一模型表示。本文仅以 3 个 3 跨 10 层内廊式规则框架结构为例, 评估其不同设防烈度地区的震害风险, 存在一定局限性。建筑结构模型的不确定性、地震活动的不确定性、认知不确定性及其他因素对风险的影响有待进一步研究。

参考文献

- 陈肇元, 2008. 跋——汶川地震教训与震后建筑物重建、加固策略. 见: 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 653—663.
- 高小旺, 鲍霁斌, 1985. 地震作用的概率模型及其统计参数. 地震工程与工程振动, 5 (1): 13—22.
- 谷音, 钟华, 卓卫东, 2012. 基于性能的矮塔斜拉桥结构地震易损性分析. 土木工程学报, 45 (S1): 218—222.
- 何益斌, 邓鹏, 张超等, 2016. 基于贝叶斯理论的增量动力分析曲线簇统计分析方法. 建筑结构, 46 (3): 44—48.
- 侯炜, 2013. 基于增量动力分析的钢筋混凝土核心筒抗震性能分析与评估. 世界地震工程, 29 (3): 121—127.
- 贾晗曦, 林均岐, 刘金龙, 2019. 建筑结构地震易损性分析研究综述. 震灾防御技术, 14 (1): 42—51.
- 蒋欢军, 吕西林, 2009. 钢筋混凝土框架结构层间位移角与构件变形关系研究. 地震工程与工程振动, 29 (2): 66—72.
- 李玉, 2015. 钢筋混凝土框架结构基于 IDA 方法的易损性分析. 西安: 西安建筑科技大学.
- 刘恢先, 卢荣俭, 陈达生等, 1981. 修订我国地震烈度表的一个建议方案. 见: 中国科学院工程力学研究所《地震工程研究报告集》第四集.
- 吕大刚, 1999. 基于最优设防荷载和性能的抗灾结构智能优化设计研究. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学.
- 罗华春, 2017. 积极推进韧性城乡建设 全面提升我国灾害防范能力. 城市与减灾, (4): 3.
- 马东辉, 郭小东, 王志涛, 2007. 城市抗震防灾规划标准实施指南. 北京: 中国建筑工业出版社.

- 马玉宏, 谢礼立, 2002. 考虑地震环境的设计常遇地震和罕遇地震的确定. 建筑结构学报, (1): 43—47, 67.
- 孙柏涛, 张博, 闫培雷, 2018. 基于 IDA 方法的高层剪力墙结构抗震能力影响因素分析. 震灾防御技术, **13** (4): 851—859.
- 王亚勇, 刘小弟, 程民宪, 1991. 建筑结构时程分析法输入地震波的研究. 建筑结构学报, (2): 51—60.
- 尹超, 王晓原, 刘菲菲等, 2016. 基于 Monte Carlo 方法的路堤震害风险概率评价. 交通运输工程学报, **16** (6): 30—38.
- 尹之潜, 李树楨, 杨淑文等, 1990. 震害与地震损失的估计方法. 地震工程与工程振动, (1): 99—108.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Berto L., Saetta A., Simioni P., 2012. Structural risk assessment of corroding RC structures under seismic excitation. *Construction & Building Materials*, **30**(5):803—813.
- Melani A., Khare R., Dhakal R. P., et al., 2016. Seismic risk assessment of low rise RC frame structure. *Structures*, **5**:13—22.
- Preciado A., Ramirez-Gaytan A., Salido-Ruiz R. A., et al., 2015. Earthquake risk assessment methods of unreinforced masonry structures: Hazard and vulnerability. *Journal of Earthquakes and Structures*, **9**(4): 719—733.
- Wu D., Tesfamariam S., Stiemer S. F., et al., 2012. Seismic fragility assessment of RC frame structure designed according to modern Chinese code for seismic design of buildings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibratio*, **11**(3):331—342.

Seismic Risk Assessment of Frame Structures Based on IDA Method

Yang Beibei^{1,2)}, Wang Zhitao^{1,3)} and Zhang Xiuyan^{1,3)}

1) Institute of Earthquake Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2) College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

3) College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In order to evaluate the seismic risk of buildings in different seismic fortification intensities, that is, the convolution of site seismic hazard and structural seismic fragility, a typical frame structure was taken as an example in this paper. According to the aseismic design code, three three-span ten-story frame structure models were designed with seismic precautionary intensities of 6, 7, and 8 respectively. Their seismic fragility was analyzed by Incremental Dynamic Analysis (IDA). Based on the probability distribution of seismic intensities in China, seismic intensities of the extreme value III distribution were generated by MATLAB software and were converted into peak ground acceleration. Combined with the seismic fragility results, the seismic risk of three models were evaluated and the seismic risk grades were divided. It provides reference for the formulation of building seismic resistance and hazardous prevention countermeasures.

Key words: Frame structure; Incremental Dynamic Analysis(IDA); Seismic fragility; Seismic hazard; Seismic risk