

考虑结构抗力因素的建筑物地震 保险纯费率厘定方法*

任晓崧, 凌海梅

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 利用震害期望损失率方法对考虑结构抗力因素的建筑物地震保险纯费率的厘定方法作了分析, 并采用该方法得到了两个工程实例的砖结构、钢筋混凝土结构的建筑物地震保险的纯费率。

关键词: 建筑物; 地震保险; 费率厘定; 震害期望损失率; 结构抗力

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)02-0209-06

0 引言

地震商业保险以承保地震危险性为目标, 是规避地震风险、减少损失的有效经济手段之一 (Palm, 1995; 陈英方, 1996)。我国属于发展中国家, 保险业务的规模还相对偏小, 从1980年恢复国内地震保险业务至今仅20余年, 大部分地区缺乏足够的地震保险保额损失数据, 主要以地震烈度作为地震保险费率厘定的主要依据, 对于如何开展地震保险和发挥地震保险的作用, 很多学者作了有益的探索工作 (巫孟还, 1991; 刘竹年, 1993; 林蓉辉, 1995; 巫孟还, 邹其嘉, 1992)。随着经济的发展, 房地产行业已经成为我国重要的经济产业之一, 建筑物保险的需求日益扩大; 在“货币分房”制度下, 住房已成为私人财产中最重要的部分, 建筑物的地震保险具有十分重要的意义, 是地震保险中的一个研究热点 (叶民权等, 1998; 和飞, 缪昇, 2002a, 2002b; 陶正如, 陶夏新, 2004; 邬亲敏等, 2004)。

根据国内保险业的发展现状, 笔者认为建筑物的地震保险可以采取法定单列险的形式, 在不同阶段由承包商、开发商、业主投保地震保险; 根据建筑物的易损性确定建筑物的地震保险费率是一个合理的思路, 采用震害期望损失率作为保险纯费率厘定的主要原则, 并在震害期望损失率的分析中考虑结构的抗力因素 (任晓崧, 凌海梅,

2006), 本文对此作进一步的探讨。

1 震害期望损失率与保险纯费率

建筑物的震害不仅与地震对结构影响的强弱程度、结构类型和可能的破坏等级密切相关, 而且与结构本身的抗震性能密切相关, 为此, 笔者提出震害期望损失率计算如下 (任晓崧, 凌海梅, 2006):

$$E(L) = \sum_{I=6}^{10} P'_1(I) \cdot \left(\sum_{j=1}^5 P_s(I, R|D_j) \cdot L(D_j) \right). \quad (1)$$

式中, $P'_1(I)$ 表示一年内在某区域发生相当于烈度 I 破坏情况地震的概率 (以下简称烈度 I 地震的年发生概率); $P_s(I, R|D_j)$ 表示在发生烈度 I 地震的情况下, 抗力为 R 的结构出现完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏等5个级别 (分别标识为 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5) 状态的发生概率, 这里将结构的抗力定义为结构实际抗震能力与地震作用所产生内力之比; $L(D_j)$ 是出现以上5种不同等级破坏时的损失比。

运用(1)式可以分别计算建筑物和室内财产损失, 在此基础上, 将建筑物与室内财产损失率之和作为建筑物地震保险的纯费率。

下面将介绍如何确定这3个相关参数。

2 烈度 I 地震的年发生概率

通过地震危险性的分析可以确定承保区域发生超越烈度 I 地震的概率 $P_1(I_A > I)$ ，而地震保险关心的是该地区发生各种烈度地震的年发生概率，可以从相应烈度地震的年超越概率计算得出：

$$P'_1(I) = P_1(I_A > I) - P_1(I_A > I + 1). \tag{2}$$

可以考虑以下 3 种不同的方法进行分析：

(1) 我国的地震区划图以综合概率法为基础，给出了 50 年各烈度的超越概率 $P_{50}(I_A > I)$ ，分别是 63.2%（众值烈度）、10%（基本烈度）、3%（罕遇烈度）。可以确定求解 1 年各烈度的超越概率

$$P_1(I_A > I) = 1 - [1 - P_{50}(I_A > I)]^{1/50}. \tag{3}$$

(2) 直接运用地震危险性分析得到地震超越概率，从而可以推算出各烈度地震的年超越概率（章在墉，1996）。例如，《上海地区地震危险性分析与基本烈度复核》（上海市地震局，1992）提供了上海市中心基岩水平加速度为 0.02 ~ 0.22 g 的年超越概率，根据不同烈度地震的加速度水平换算成各烈度地震的年超越概率 $P_1(I_A > I)$ ，从而推定各烈度地震的年发生概率。

(3) 如果地震灾害历史资料足够丰富，可以得到地震烈度 I 和相应烈度 I 的地震发生次数 $N(I)$ 之间的统计关系，进而直接得到 $P'_1(I)$ 。例如，《上海地区地震危险性分析与基本烈度复核》（上海市地震局，1992）提供了 1475 ~ 1986 年间上海市地震烈度和地震发生次数的统计关系

$$\lg N(I) = 2.902 - 0.37I. \tag{4}$$

式中， $N(I)$ 是年累加频度。由（4）式可以得到烈度 I 地震的年发生概率

$$P'_1(I) = \frac{N(I) - N(I + 1)}{N(I_0)}. \tag{5}$$

式中， I_0 为烈度表中的最低烈度，一般取 $I_0 = 1$ 。由于上海地区的历史地震资料缺少发生相应于 VIII 和 IX 度地震的记录，相应于 VIII 和 IX 度地震的年发生概率只能进行推算。

按照上面 3 种方法，可以得到上海地区（VII 度设防区）的各烈度地震的年发生概率 $P'_1(I)$ （表 1）。各种不同方法之间存在一定的差异，笔者认为根据第二种方法（由地震危险性分析结果）得到的结果的针对性较强，且受其他因素的影响较小，一般情况下可作为进行各烈度地震的年发生概率分析的首选方法。

表 1 上海地区的各烈度地震的年发生概率

Tab. 1 Annual probability of earthquake with different intensity in Shanghai

分析方法	IV	V	VI	VII	VIII
由 50 年地震烈度的超越概率			0.017 7	0.001 5	0.000 5
由中心基岩加速度年超越概率			0.013 4	0.002 5	0.000 95
由地震烈度 I 和发生次数的统计关系	0.044 9	0.018 9	0.008 1	0.003 5	0.001 5
				(外推)	(外推)

3 结构出现不同破坏等级的概率

建筑物的地震损失是和结构的抗震性能密切相关的，结构易损性分析中应加入结构的抗力因素。因此在结构抗力定义为结构的实际抗震能力与地震作用下所产生结构内力的比值，可以直接运用《建筑抗震鉴定标准》（1995）来确定结构的抗力。在实际工程中，抗力可能大于 1，这种情况

可认为建筑物基本没有损坏，从而作为地震保险责任免除的依据。

3.1 砖（砌体）结构

砖（砌体）结构的抗力定义为抗震墙的面积比：

$$R_i(I) = \frac{\xi_i}{\lambda(I)\xi_{0i}} \psi_1 \psi_2. \tag{6}$$

式中， $R_i(I)$ 表示在烈度 I 地震作用下的抗力，为

简洁起见，在（1）式中表示为 R ； ξ_i 为楼层抗震墙面积率，即楼层抗震墙和楼层建筑面积之比； ξ_{0i} 为抗震墙基准面积率； ψ_1 、 ψ_2 分别为体形影响系数和局部影响系数； $\lambda(I)$ 为地震烈度的修正系数。

尹之潜（1995）给出了单体砖结构的广义强度和结构易损性矩阵之间的关系，所定义的砖结构广义强度考虑了设计标准、构造措施、施工质量等因素的影响。在缺乏资料的情况下，可以根据《地震灾害及损失预测方法》中的相关统计结果按砂浆标号、总层数和楼层号等进行改造，并除去抗力大于 1 的情况，得到结构易损性矩阵。

3.2 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构的抗力定义为楼层屈服剪力和地震作用剪力之间的比值

$$R_i(I)=\frac{V_{yi}}{V_{Ei}(I)}.$$

(7)

式中， $V_{yi}=\sum V_{cyi}+0.7\sum V_{myi}+0.7\sum V_{wyi}$ ，是第 i 楼

层的受剪承载力； $\sum V_{cyi}$ 、 $\sum V_{myi}$ 、 $\sum V_{wyi}$ 分别表示第 i 楼层框架柱、砖填充墙以及第 i 楼层抗震墙的受剪承载力之和，计算公式详见《建筑抗震鉴定标准》（1995）； $V_{Ei}(I)$ 为在 I 烈度地震作用下第 i 楼层的弹性地震剪力。

钢筋混凝土结构具有最小抗力的楼层，在地震作用下能够产生最大的延伸率。该楼层对结构破坏起主要作用。表 2 给出了钢筋混凝土结构破坏程度与延伸率 $\mu(\%)$ 之间的关系（尹之潜，1995）。相同抗力的钢筋混凝土结构对应的延伸率服从对数正态分布。当抗力小于 1 时，结构的破坏概率如下式：

$$P_s(I,R|D_j)=\int_{\mu_j}^{\mu_j+1}\frac{1}{\xi\mu\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\ln\mu-\eta)^2}{2\xi^2}\right]d\mu.$$

(8)

其中， $\eta=\ln\bar{\mu}-\xi^2/2$ ， $\xi=\ln(1+\sigma^2/\bar{\mu}^2)$ ， $\bar{\mu}=\frac{1}{\sqrt{R}}e^{2.6(1-R)}$ ， $\sigma=-3.5\ln R$ 。

表 2 钢筋混凝土结构破坏程度与延伸率 $\mu(\%)$ 的关系
Tab. 2 The relationship between the damage grade and structural ductility $\mu(\%)$

破坏等级	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
框架结构	$0<\mu\leq 1$	$1<\mu\leq 3$	$3<\mu\leq 6$	$6<\mu\leq 10$	$\mu\geq 10$
剪力墙结构	$0<\mu\leq 1$	$1<\mu\leq 1.5$	$1.5<\mu\leq 3$	$3<\mu\leq 5$	$\mu\geq 5$

4 不同等级破坏时的损失比

经过统计分析，尹之潜（1995）得到了如表 3 的损失比数据，可以直接作为 $L(D_j)$ 应用，我们还适时补充完善新收集的资料（王景来，2000；王景来，宋志峰，2001）。沿用现有的习惯分类，

建筑物的结构类型分为 A 类结构（主要包括钢结构和钢筋混凝土结构）、B 类结构（主要包括砖结构、工业建筑和公用建筑）、C 类结构（主要包括白灰砂浆砌筑的砖房、240 mm 厚的砖结构空旷房屋和教室、空斗砖墙等）和 D 类结构（主要包括农村里的生土结构，如土坯房、土坯窑洞、碎石结构）等。

表 3 各类建筑物及室内财产的损失比
Tab. 3 The loss ratio of structure and property for different kind of buildings

破坏等级	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
A 类结构	0	5 ~ 10	10 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 100
B 类结构	0	5 ~ 10	10 ~ 40	40 ~ 70	70 ~ 100
C 类结构	0	4 ~ 8	8 ~ 35	35 ~ 75	75 ~ 100
D 类结构	0	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 80	80 ~ 100
室内财产	0	0	0	20 ~ 40	40 ~ 95

5 实例分析

本文给出 2 个实例进行分析。限于篇幅，实例的具体参数选择和分析过程不作介绍，具体可参阅凌海梅（2003）学位论文“建筑物地震保险的若干问题”。

5.1 砖混结构

上海市（Ⅶ度区）某办公楼为 4 层砖砌体结构，各层平面基本相同，层高 3.0 m，平面轴线尺寸为 30 m×14.5 m。采用纵横墙承重体系，墙厚均为 240 mm，砂浆强度等级为 M1.0（实际检测结

果），砖砌体强度等级为 MU5，标准层的平面布置图如图 1。

按照第二种方法得到的Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ烈度地震的年发生概率分别为 0.013 4、0.002 5、0.000 95（表 1）。通过计算分析，发现结构的最小抗力出现在底层，采用（6）式计算底层抗力 $R_1(7) = 0.96$ ，即该结构基本满足Ⅶ度设防要求。运用尹之潜（1995）的结果就可得到易损性矩阵（表 4）。B 类建筑由表 3 确定损失比，可求出该建筑的年期期望损失值为：建筑物 $E(L) = 0.955\%$ ，室内财产 $E(L) = 0.137\%$ 。由建筑物和室内财产的损失比之和，得到该建筑的地震保险纯费率 1.092%。

表 4 某砖混结构建筑的易损性矩阵
Tab. 4 The vulnerability matrix of a masonry building

地震烈度	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
Ⅵ	2	5	20	33	40
Ⅶ	0	0	10	27	63
Ⅷ	0	0	0	13	87
Ⅸ	0	0	0	0	100

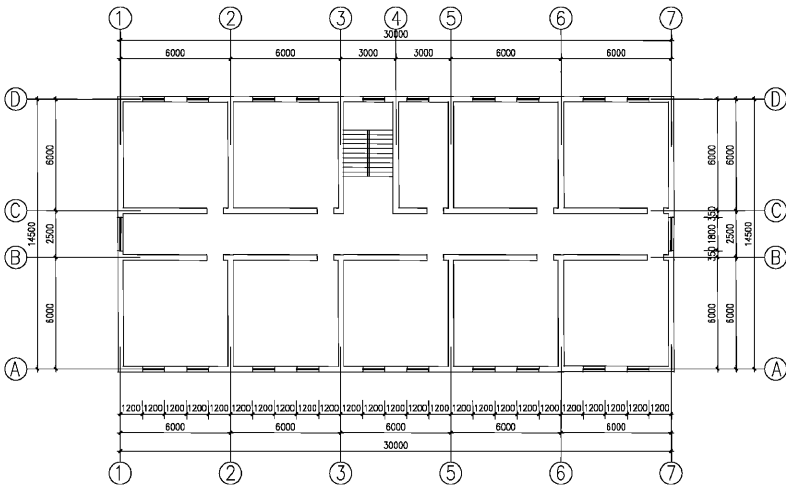


图 1 某砖混结构建筑标准层平面简图
Fig. 1 Standard layout of a masonry building

5.2 钢筋混凝土结构

北京市内（Ⅷ度设防区）某小高层建筑为 12 层的钢筋混凝土框架—抗震墙结构，层高 3.3 m，各层平面基本相同，平面轴线尺寸 30 m×14.5 m，柱截面尺寸 450 mm×600 mm，混凝土墙厚 250 mm，混凝土强度等级 C25，标准层的平面简图如图 2。

按照第一种方法，得到北京地区（Ⅷ度设防区）的Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ烈度地震的年发生概率分别为 0.017 7、0.001 5、0.000 5、0.000 1（估

计）。通过计算分析，发现结构的最小抗力出现在底层，由（7）式得抗力 $R_i(8) = 0.92$ ，即基本满足Ⅷ度抗震设防要求。根据（8）式求结构的破坏概率，其中积分的上下限分别按表 3 数据的平均值取，从而得到如表 5 的易损性矩阵。

按照 A 类建筑由表 3 确定损失比，可求出该建筑的年期期望损失值为：建筑物 $E(L) = 0.046\%$ ，室内财产 $E(L) = 0.021\%$ 。由建筑物和室内财产的损失比之和，得到该建筑的地震保险纯费率为 0.067%。

表 5 某钢筋混凝土结构建筑的易损性矩阵

Tab. 5 The vulnerability matrix of a concrete structure building

地震烈度	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
VII	100	0	0	0	0
VIII	15.9	83.6	0.45	0.0	0.0
IX	0	2.0	30.6	44.2	23.2
X	0	0	0	1.9	98.1

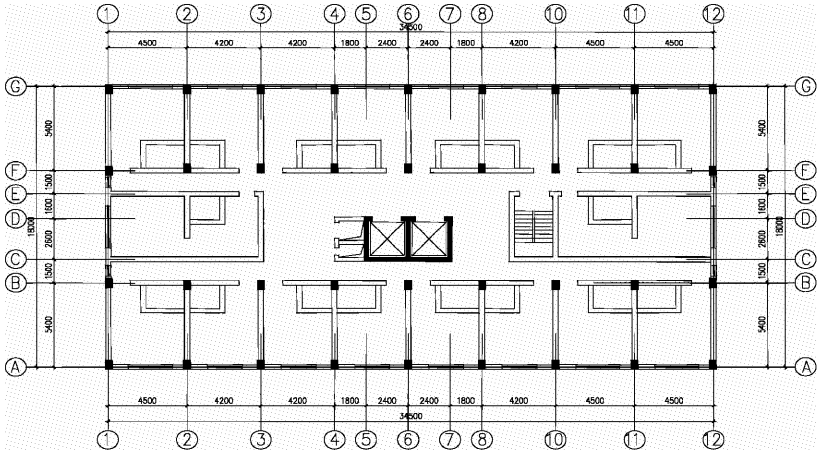


图 2 某钢筋混凝土结构建筑的标准层平面简图

Fig. 2 Standard layout of a concrete structure building

6 结语

建筑物的地震保险是减少地震损失风险的一种重要手段，根据建筑物的易损性确定建筑物的地震保险费率是一个合理的思路。本文建议采用震害期望损失率作为建筑物地震保险纯费率厘定的主要原则，地震发生概率、结构的易损性和损失比是影响保险纯费率的主要因素。直接应用地震危险性的分析成果可以得到地震发生概率；在结构易损性的分析中增加结构的抗力因素，以反映结构抗震性能的不同，砖（砌体）结构的抗力定义为抗震墙的面积比，钢筋混凝土结构的抗力定义为楼层屈服剪力和地震作用剪力之间的比值；根据历史数据的统计分析可以得到不同类别结构的损失比。文中给出了两个实例，说明了砖（砌体）结构、钢筋混凝土结构的建筑物保险纯费率厘定的实用方法。

参考文献：

陈英方. 1996. 地震保险 [M]. 北京：地震出版社.

和飞, 缪昇. 2002a. 地震灾害风险分析及管理初探 [J]. 地震研究, 25 (4): 374 – 378.

和飞, 缪昇. 2002b. 土木工程中的地震保险模式 [J]. 昆明理工大学学报, 27 (6): 104 – 107.

林蓉辉. 1995. 地震保险及其在地震减灾中的潜在应用 [J]. 地震研究, 18 (3): 317 – 329.

凌海梅. 2003. 建筑物地震保险的若干问题 [D]. 上海：同济大学.

刘竹年. 1993. 对地震保险体制改革的探索 [J], 自然灾害学报, 2 (4): 19 – 29.

任晓崧, 凌海梅. 2006. 建筑物地震保险的相关问题 [J]. 世界地震工程, 22 (1): 99 – 103.

上海市地震局. 1992. 上海地区地震危险性分析与基本烈度复核 [M]. 北京：地震出版社.

陶正如, 陶夏新. 2004. 基于工程地震风险评估的地震保险费率厘定 [J]. 自然灾害学报, 13 (2): 112 – 118.

王景来. 2000. 地震灾害损失快速评估新方法研究 [J]. 地震研究, 23 (3): 356 – 360.

王景来, 宋志峰. 2001. 地震灾害快速评估模型 [J]. 地震研究, 24 (2): 162 – 167.

郭亲敏, 冯启民, 莫善军. 2004. 建筑物地震损失风险与保险费用的确定方法 [J]. 地震工程与工程振动, 24 (1): 180 – 185.

巫孟还, 邹其嘉. 1992. 震灾保险的一种实用技术途径及其实施保障 [J]. 自然灾害学报, 1 (3): 17 – 24.

巫孟还. 1991. 地震专项保险与震情指数预报 [J]. 灾害学, 6 (2): 88 – 92.

叶民权. 1998. 地震风险和地震保险研究 [M]. 北京：地震出版社.

尹之潜. 1995. 地震灾害及损失预测方法 [M]. 北京：地震出

版社.

章在墉. 1996. 地震危险性分析及其应用 [M]. 上海: 同济大学出版社.

GB 50023 - 95, 建筑抗震鉴定标准 [S].

Palm R. 1995. Earthquake Insurance: A Longitudinal study of California Homeowners [M]. Colorado: Westview Press.

**Ratemaking Method of Earthquake Insurance for Buildings
Considering Structural Resistant Capacity**

REN Xiao-song, LING Hai-mei

(*Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract

Applying the method of expected seismic loss rate, the rate making for seismic insurance of buildings considering the structural resistant capacity is analyzed. Two engineering cases are given in this paper to demonstrate how to determine the premium rate for masonry and reinforced concrete structure by this method.

Key words: building; earthquake insurance; rate making; expected seismic loss rate; structural resistant capacity