

文章编号:1673-2049(2015)06-0017-13

工程结构地震易损性与经济损失评估研究现状

温留汉·黑沙¹, 张永山², 汪大洋²

(1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510006; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:回顾了地震观测记录研究的发展历程,对采用基于震害调查的经验判断法和基于有限元的理论算法分析结构地震易损性进行了系统的概括和总结,综述了目前各国开展直接和间接地震经济损失评估技术方法;针对地震风险观测记录、间接经济损失评估、结构精细化易损性模型、地震动输入、地震附加费率厘定等尚待进一步深入探讨的问题,给出了未来开展地震危险性分析和地震经济损失评估研究的意见和建议。

关键词:工程结构;地震易损性;直接经济损失;间接经济损失;评估

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

Review on Seismic Vulnerability and Economic Loss Assessment of Engineering Structures

WENLIUHAN Heisha¹, ZHANG Yong-shan², WANG Da-yang²

(1. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: The development history of seismic observation records was reviewed. The seismic risk observation and structural seismic vulnerability analysis using empirical method and finite element method were systematically generalized and summarized. The direct and indirect seismic economic loss assessment at home and abroad were summed up. The several suggestions on the future research, such as seismic risk observation records, indirect economic loss evaluation, structural fine vulnerability model, ground motion input and additional rate determination, etc. were recommended. Meanwhile, the comments on seismic risk analysis and seismic economic loss assessment were given.

Key words: engineering structure; seismic vulnerability; direct economic loss; indirect economic loss; assessment

0 引言

结构地震易损性与震害经济损失分析是地震安全评定的重要内容之一,既从宏观的角度描述了地震动强度与结构破坏损伤程度之间的关系,又从微观角度在概率意义上定量刻画工程结构的抗震能力

储备。基于地震易损性分析,人们可以很好地掌握建筑结构的抗震性能,同时也能够了解地震烈度、场地、震级等地震动输入参数与结构损伤水平之间的关系,进而对建筑结构的灾害损失进行预测评估。地震经济损失评估源于美国地震保险业的发展,最早由 Freeman 等于 1932 年开展了相关方面的研究

收稿日期:2015-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51378135,51408140);教育部高等学校博士学科点专项科研项目(20134410120003);

广东省优秀青年教师基金项目(Yq201402)

作者简介:温留汉·黑沙(1963-),男,哈萨克族,新疆伊犁人,研究员,工学博士,E-mail:wen-jp6@hotmail.com。

工作。地震经济损失评估是工程结构危险性分析的重要组成部分,也是政府制定地震保险政策与费用厘定的依据和基础。随着结构分析与设计手段的完善和建筑材料的不断更新,工程结构的抗震性能也在逐步提高,虽有效减小了地震造成的人员伤亡损失,但其引起的社会经济损失绝对值却在不断增加,合理的地震经济损失评估对于现代经济社会的抗震救灾与震害保险越发重要。因此,对工程结构开展地震易损性与经济损失评估研究,对于制定国家防震减灾措施。提高结构抗震能力等级,降低震害损失等具有重要的研究意义和价值。

1 地震观测记录与修正

自 20 世纪 30 年代在加州长滩记录第 1 条地震动加速度以来(图 1^[1]),研究人员在该领域开展了大量研究工作,目前美国、日本以及中国等地震多发国家已经建立了相当丰富的地震动数据库。地震动观测记录研究大致经历了模拟地震记录和数字地震记录与修正这 2 个阶段^[2]。

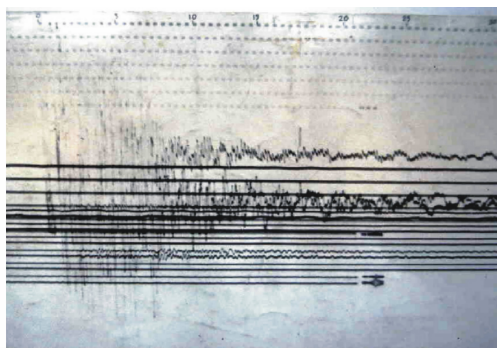


图 1 长滩加速度记录

Fig. 1 Long Beach Acceleration Record

20 世纪 30 年代到 70 年代中期为模拟地震记录阶段。1947 年 Housner^[3] 基于模拟强震仪记录的洛杉矶地震加速度序列,通过对其进行 2 次积分得到地震位移时程,并与位移仪得到的位移记录比较后认为加速度积分计算结果的可信度较高。然而 1955 年 Hershberger^[4] 经过分析对 Housner 的研究成果提出了质疑。1961 年, Berg 等^[5] 指出积分计算方法在精度方面无法得到有效保证,但其结果可作为工程结构分析参考之用。20 世纪 60 年代末到 70 年代初,研究人员开始对模拟地震仪获取数据的精确性开展研究,探讨了传感器位置、记录纸变形以及数据反馈时效等因素对积分后位移的影响^[6-7],发现模拟强震仪存在丢头现象,记录长周期地震动的能力不强等弊端,进而提出了通过过滤长周期信号获

取地震记录的标准强震动加速度记录基线校正方法^[8-10]。

20 世纪 70 年代末,美国和日本相继研制成功了数字强震仪,使记录信号的周期记录范围扩展至 0.05~20 s,振幅记录范围扩展至 0.000 1g~2.0g (g 为重力加速度),精度达到 1/100 s。然而,数字强震仪仍存在难以有效克服因地面倾斜、环境噪声、位移漂移失真等产生的数据误差,因此该阶段研究人员主要致力于数字强震仪加速度记录的修正与校正工作上。1985 年, Iwan 等^[11] 采用两段式校正方法,首先从未校正的加速度记录中分离出加速度偏移噪声,然后对校正加速度记录积分得到速度和位移曲线。2001 年, Boore^[12] 和王国权等^[13] 对 Iwan 两段式噪声模型进行了简化,提出便于自动化处理的单段式校正方法,但该方法处理复杂地震记录并不理想。2002 年, Boore 等^[14] 又提出采用二次曲线拟合地震动记录的整个速度时间历程,但其通过从未校正加速度记录中减去拟合曲线导数值的处理方式并不合理,使结果改善的并不理想。2007 年, Chen 等^[15] 采用滤波技术过滤地震动信号中不合理成分,依次剔除加速度和速度时程中的近似部分,然后对校正后的加速度记录进行积分得到位移时程。2010 年, Chanerley 等^[16] 采用软阈值理论对得到的低频和低频信号分别进行去噪处理得到修正加速度记录,然后二次积分得到速度和位移时程,取得了较好的效果。

2 工程结构地震易损性分析

建筑结构的地震易损性是指不同强度地震动作用下引起结构破坏状态或达到某个性能水平的概率,是对既定灾害引起的建筑结构各个性能状态的概率分布描述,并通过地震易损性曲线或易损性矩阵加以表征^[17]。地震易损性分析根据数据来源及处理方法的不同主要分为基于数据调查的经验分析法和基于有限元分析的理论计算法,前者根据大量数据统计和专家经验判断进行,后者结合动力有限元分析软件通过结构地震反应分析开展。

2.1 基于震害调查的经验分析法

1971 年,美国南加利福利亚州在发生 San Fernando 地震后, Whitman 等^[18] 对 1 600 栋建筑结构的震害情况进行了调查统计,并于 1973 年首次提出采用离散的破坏概率矩阵(Damage Probability Matrices, DPMs)描述不同类型结构的地震易损性。1980 年意大利发生伊尔皮尼亚 Irpinia 地震, Braga

等^[19]根据调查数据引入二项分布描述结构不同破坏水平的概率分布特征,并建立了欧洲建筑结构易损性的首个 DPMs,随后 Dolce 等^[20]和 Di Pasquale 等^[21]针对意大利的地震特征和建筑技术水平对其进行了改进。1985 年,美国应用技术协会(Applied Technology Council, ATC)基于 50 位地震工程领域的专家问卷调查给出了专家判断的 DPMs^[22]。然而,专家经验判断难以确定不同地震动作用下结构发生不同损伤性能状态的破坏概率,为此 Giovi-azzi 等^[23]从地震烈度角度提出了专家经验判断的 DPMs,随后他们引入模糊评价理论对其进行改进^[24],得到了基于判断的地震易损性曲线,使之更加适于在地震易损性评估中的使用,该方法后来被里斯本和巴塞罗那等城市的地震易损性分析所采

用^[25-26]。Kiremidjian^[27]还将贝叶斯分布理论和专家经验判断相结合,提出了建筑结构易损性分析的主观 DPMs。作为地处环太平洋地震带和欧亚地震带的中国,众多专家学者亦对地震易损性进行了研究,1996 年尹之潜^[28]首先将中国建筑结构根据易损性情况分为 A、B、C、D 四类,依次为钢和钢筋混凝土结构、砖结构和工业建筑、白灰砂浆砌筑的砖结构、农村生土结构,建立了未来建筑震害矩阵与目前现有建筑震害的关系,然后给出 2000 年上述 4 类建筑的易损性 DPMs。2008 年汶川地震后,中国地震局迅速联合科研单位和大专院校先后 2 次组织考察队共 300 余人,历时 3 个多月,行程数百万公里对近 5 000 栋建筑结构的震害进行了详细科学调查,给出了设防和未设防砌体结构的易损性矩阵,见表 1^[29]。

表 1 未设防与设防砌体结构易损性矩阵

| Tab. 1 Vulnerability Matrix Between Unfortified and Fortified Masonry Structures | | | | | | | | | | % |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 地震设防烈度 | 基本完好 | | 轻微破坏 | | 中等破坏 | | 严重破坏 | | 毁坏 | |
| | 未设防 | 设防 | 未设防 | 设防 | 未设防 | 设防 | 未设防 | 设防 | 未设防 | 设防 |
| 6 | | 20.00 | 33.33 | | | 60.00 | 66.67 | 20.00 | 0.00 | |
| 7 | 28.68 | 43.47 | 32.45 | 35.26 | 25.28 | 16.26 | 11.70 | 4.56 | 1.89 | 0.46 |
| 8 | 9.52 | 22.13 | 25.00 | 25.78 | 20.83 | 27.87 | 34.52 | 22.82 | 10.12 | 1.39 |
| 9 | 6.28 | 9.80 | 7.11 | 16.25 | 19.25 | 29.97 | 56.49 | 35.29 | 10.88 | 8.68 |
| 10 | 9.80 | 32.18 | 19.61 | 25.29 | 13.75 | 25.29 | 31.37 | 13.79 | 25.49 | 3.45 |
| 11 | 7.25 | 22.37 | 10.14 | 22.37 | 8.70 | 9.21 | 31.88 | 34.21 | 42.03 | 1.30 |

采用 DPMs 表征的结构地震易损性为离散化的处理思想,为使结构易损性更加易于在结构损伤评估中使用,Spence 等^[30]于 1992 年提出将连续化的地震烈度参数与震害调查数据相结合,建立了连续化的地震易损性曲线(Seismic Fragility Curves, SFCs)。1995 年,日本阪神地震发生后,Yamaguchi 等^[31]根据建筑结构的震害调查数据建立了以地震峰值加速度(PGA)和地震加速度(PGV)为连续化参数的 SFCs。Sabetta 等^[32]基于地震烈度与地震动强度之间的关系,生成了以 PGA, AI 和 EPA 为参数的意大利建筑结构的 SFCs。Yakut 等^[33]根据土耳其的震害调查数据建立了底层和中层建筑结构的易损性曲线。然而,PGA、烈度等地震动参数与实际结构震害之间难以建立直接的关联,经验判断往往与实际震害情况之间存在较大差异,为此 Rossetto 等^[34]以谱加速度和谱位移为连续化参数,建立了建筑结构的经验 SFCs 曲线。刘如山等^[35]对结构易损性表达方式进行了研究,采用贝塔分布函数对给定烈度下结构各个破坏等级的概率分布进行了拟合,使结构易损性表达方式由烈度-震害等级构

成的 DPMs 形式转化为地震动参数-破坏比概率密度表达方式,从而将二维阶跃式易损性曲线连续化,如图 2 所示。

2.2 基于有限元的理论计算法

虽然基于震害调查的经验分析法能够真实反映地震对建筑结构的损伤程度,但该方法只能适用于震害资料较为充足的少数地区,对大多数震害数据缺乏的地区其易损性判断结果存在很大的主观性,而且随着建筑材料、建造工艺和计算手段的不断发展完善,以及结构工程对震害预测精度要求的不断提高,基于有限元分析的建筑结构易损性理论计算方法越来越受到重视。图 3 给出了基于有限元分析的地震易损性分析计算流程^[36]。从图 3 可以看出,结构易损性分析涉及结构模型建立,动力计算方法选取,地震动参数与结构性能水平确定等多个环节,限于篇幅本文将主要针对结构地震易损性函数展开综述。

地震易损性函数通常以地震易损性曲线的形式来体现,描述结构抵抗某种等级地震作用的能力,反映结构损伤程度与地震动强度之间的关系。地震作用下一般将结构的损伤状态分为 5 个损伤等

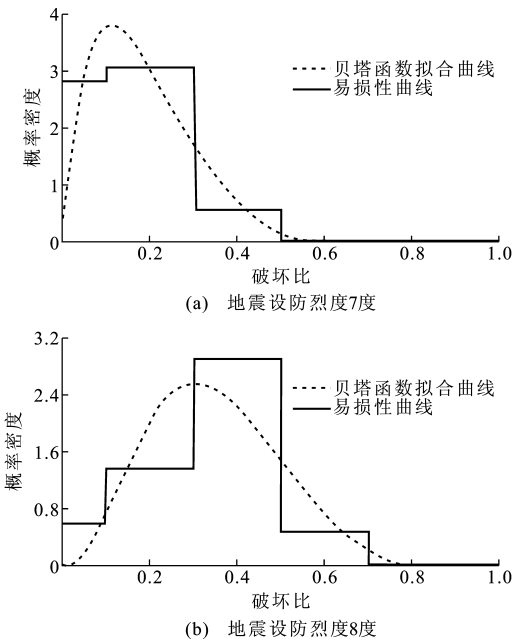


图2 各烈度下结构破坏比的概率密度分布
Fig.2 Probability Density Distributions of Structural Damage Ratio with Different Intensities

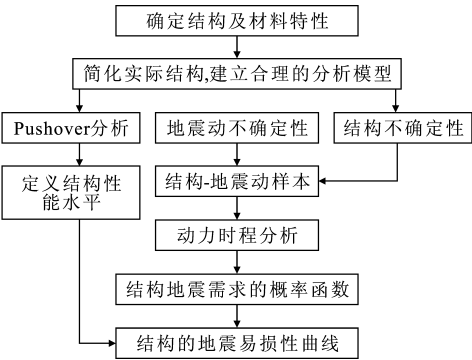


图3 结构易损性分析方法

Fig.3 Structural Vulnerability Analysis Method

级^[37]:基本完好(DS₁)、轻微损伤(DS₂)、中等损伤(DS₃)、严重损伤(DS₄)和倒塌(DS₅),每个损伤等级的极限状态用LS_{*i*}(*i*=1,2,3,4)表示,震害作用下结构损伤等级与极限状态的对应关系如图4所示。不确定性是地震易损性研究的核心问题,根据研究对象角度可将其分为地震动参数不确定性和结构参数不确定性,根据研究者的认知水平又可分为本质不确定性(事物内在随机性引起的客观不确定性)和知识不确定性(认知水平引起的主观不确定性)^[38]。

显然,根据上述本质不确定性和知识不确定性,人们提出了不同的地震易损性函数的计算公式。Wen等^[39]、Ellingwood^[40]针对本质不确定提出了基于地震动强度的地震易损性函数 $F_{R,IM}(x)$,即

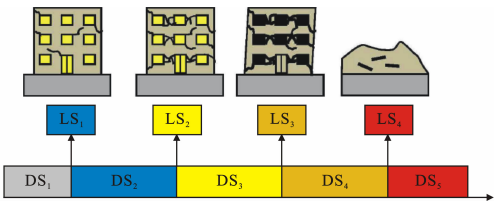


图4 结构损伤等级与极限状态的对应关系
Fig.4 Corresponding Relation of Structural Damage Degree and Limit States

$$F_{R,IM}(x)=\Phi[\ln(x/m_{RR})/\beta_{RR}] \tag{1}$$

式中: $\Phi[\cdot]$ 为标准正态概率密度分布函数; m_{RR} 、 β_{RR} 分别为仅考虑本质不确定性的地震易损性函数的中位值和对数标准差。

虽然地震动强度水平与结构损伤极限状态难以准确对应,但对于结构倒塌分析中常用地震动强度来定义结构倒塌强度,因此基于地震动强度的地震易损性函数 $F_{R,IM}(x)$ 常用于结构震害倒塌易损性分析中^[41]。

鉴于地震作用下结构不同极限状态对应的地震动强度水平难以确定的情况,研究人员提出以结构位移反应作为函数参数,通过经典概率干涉模型将地震需求 D 和抗震能力 C 引入,将均假设服从对数正态分布的概率地震需求模型和概率抗震能力模型卷积,从而得到考虑本质不确定性的基于位移的地震易损性函数 $F_{R,D}(x)$ ^[42],即

$$F_{R,D}(x)=\Phi\left[\frac{\ln(m_{D|I})-\ln(m_C)}{\sqrt{\beta_C^2+\beta_{D|I}^2}}\right] \tag{2}$$

式中: $m_{D|I}$ 、 $\beta_{D|I}$ 分别为地震需求 D 在地震强度 I 作用下的条件中位值和对数标准差; m_C 、 β_C 分别为结构极限状态抗震能力的中位值和对数标准差。

实际上,基于地震动强度和基于位移的地震易损性函数本质上是一致的,后者为前者的特例,但由于结构损伤与结构变形之间关系更为紧密,所以后者在实际工程中的应用也更为广泛^[43]。在考虑客观本质不确定的基础上,文献^[44]进一步将主观知识不确定性引入,给出了同时考虑本质和知识不确定性的“点估计”地震易损性函数 $F_{R,P}(x)$ 和“区间估计”地震易损性函数 $F_{R,\alpha}(x)$,即

$$\left. \begin{aligned} F_{R,P}(x) &= \Phi\left[\frac{\ln(x/m_{RR})}{\sqrt{\beta_{RR}^2+\beta_{RU}^2}}\right] \\ F_{R,\alpha}(x) &= \Phi\left[\frac{\ln(x/(m_{RR}\exp(\beta_{RU}\Phi^{-1}(\alpha))))}{\beta_{RR}}\right] \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中: α 为置信水平; β_{RU} 为考虑知识不确定性的地震易损性函数的对数标准差。

将仅考虑本质不确定性,同时考虑本质和知识

不确定性的地震易损性函数绘制成曲线(图 5)。由图 5 可见,与不考虑知识不确定性的地震易损性曲线相比,地震易损性“点估计”曲线的倾斜度增加(中位值不变,而对数标准差增大),地震易损性“区间估计”曲线的位置发生平移(中位值改变,而对数标准差不变)^[43]。

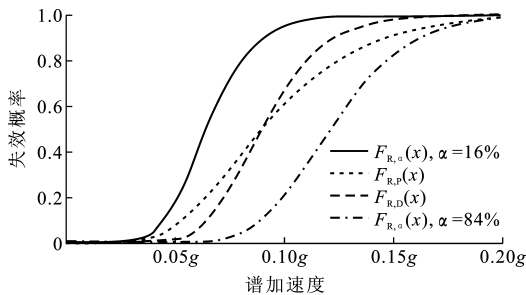


图 5 地震易损性评估曲线

Fig. 5 Assessment Curves of Seismic Vulnerability

此外,吕西林等^[17]、徐龙河等^[45]、于刚等^[46]、吴巧云等^[47]、韩森等^[48]、孙鸿宾等^[49]、何益斌等^[50]、侯爽等^[51]亦对地震作用下钢筋混凝土框架结构、钢筋混凝土框剪结构、钢结构以及区域建筑结构的地震易损性开展了大量研究工作,极大丰富了建筑结构易损性分析及计算理论,为其在工程中的推广应用提供了有力的技术支撑。

3 工程结构震害经济损失评估进展

地震经济损失评估就损失类别来说,一般分为直接经济损失评估和间接经济损失评估,如图 6 所示。就研究对象来说,一般分为区域经济损失评估和单体建筑经济损失评估,区域经济损失评估主要研究某一地区发生地震震害引起的诸如建筑破坏、企业减产、商品流通等受到影响而导致的经济损失和社会损失评估,单体建筑经济损失评估则主要研究特定地震震害造成的某一具体建筑物的精确经济损失评估^[52]。

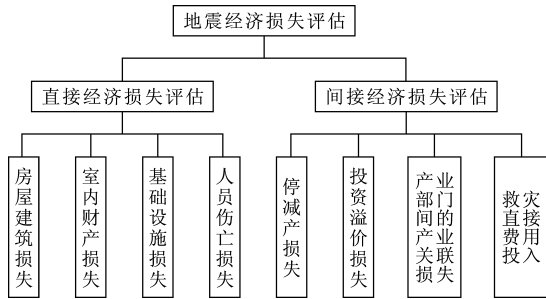


图 6 地震经济损失评估分类

Fig. 6 Classification of Seismic Economic Loss Assessment

3.1 国外震害损失评估

虽然早在 20 世纪 30 年代美国就已经开始了地震经济损失评估的研究工作,但直至 70 年后才逐步形成了较为系统的研究成果,在 Algermissen 和 Steinbrugge 等的带领下,美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Agency, NOAA)与美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)于 1972 年、1973 年、1975 年和 1976 年相继在旧金山地区、洛杉矶地区、普查特桑地区和盐湖城地区开展了大尺度地震损失评估研究工作,并基于丰富的震害资料统计提出了 NOAA/USGS 区域震害损失评估方法^[53]。随后,美国联邦紧急事务管理署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)委托美国应用技术委员会(Applied Technical Council, ATC)研究一套便于在工程和城市规划中推广应用的震害评估方法,ATC 对加利福尼亚 78 种工程设施的预期地震损失从工程抗震与社会功能角度进行了系统分析,于 1985 年出版了以烈度为地震动强度度量进行震害损失评估的 ATC-13 方法^[22]。1992 年, FEMA 再次委托美国国家建筑科学研究院(National Institute of Building Sciences, NIBS)总结地震损失评估技术的研究进展,并建立区域地震损失评估的通用技术方法,1997 年著名的 HAZUS97 系统成功推出,该系统的评估预测思路是首先将特定地区的地震反应谱转化为地震需求谱曲线,然后针对具体结构类型采用 Pushover 静力弹塑性分析技术计算结构能力谱曲线,以 2 条谱曲线交点获得的结构性能点为结构易损性分析依据,评估结构在不同地震动、场地等条件下的损伤概率,进而计算直接和间接地震经济损失,该系统的优势一方面在于涵盖了震害对区域经济长期影响的评估,另一方面基于 Pushover 理论引入结构抗震能力曲线、性能点与易损性曲线,将地震地面运动响应与结构震动响应有机结合预测结构震害损失^[54]。随后, FEMA 与 NIBS 相继推出 HAZUS 99(1999), HAZUS99-SR1(2001), HAZUS99-SR2(2002), HAZUS-MH(2004)和 HAZUS-MHMR2(2006)系统,进一步完善该系统对震害经济损失的预测评估^[55],该系统开展地震经济损失评估的基本理论框架如图 7 所示。

尽管 FEMA 与 NIBS 研发的 HAZUS 系统在震害损失评估的各个设计环节考虑都很周到,但限于所掌握的震害真实数据资料非常有限且存在很大的不确定性,其评估结果亦不免存在一定的主观性

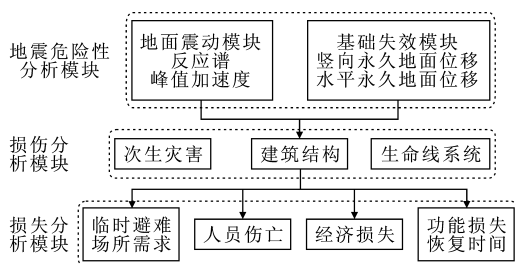


图7 HAZUS地震经济损失评估框架

Fig. 7 Frame of Seismic Economic Loss Assessment for HAZUS

和不确定性。为此,美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)针对地震动强度(如谱位移、谱加速度等参数)、结构反应(如楼层位移、层间位移角、峰值加速度等结构响应参数)、结构损伤量度(如基本完好、中等损伤、完全损伤等参数)、决策变量(如经济指标、人员伤亡指标等参数)等从地震危险性分析到震害损失分析全过程的参数不确定性,基于全概率理论研究提出了进行单体建筑物地震损失评估的全概率法^[56],其评估计算公式如下

$$\lambda(D_V) = \iint G(D_V | D_M) dG(D_M | R_S) dG(R_S | I) d\lambda(I) \quad (4)$$

式中: G 为特定参数的概率分布函数,如 $G(D_M | R_S)$ 为在给定结构反应 R_S 条件下损伤量度的概率密度函数; λ 为特定参数的年平均超越概率,如 $\lambda(I)$ 为地震动强度参数 I 的年平均超越概率。

此外,很多其他机构亦针对地震风险评估软件进行了开发研究,如MAE和NCSA共同开发的MAEviz软件由于具有很高的可视化程度而受到业界的广泛好评^[57],AIR全球公司开发了用于保险和特许再保险经营灾害风险管理等领域的CLASIC/2软件^[58]以及REI和Degenkolb公司共同开发的用于单体建筑震害财产损失评估、投资风险管理等领域的ST-RISK软件和ALLRISK软件^[59]。

然而,对地震经济损失的评估不仅限于上述科研机构取得的工作,大量专家、学者亦对该领域开展研究攻关。Whitman等^[60]基于对工程结构震害损伤的主观判断与震后重置费用等参数建立地震损失概率评估模型,对单体建筑物的震害经济损失进行了评估研究。Scholl^[61]将结构构件与非结构构件的损伤与结构重置费用相结合,基于改进的地震动数据库对结构构件(尤其是关键结构构件)损伤进行评估,提出了高层建筑震害经济损失的评估方法。

Kuribayashi等^[62]从计量经济学角度提出了考虑地震长期影响的震害间接损失评估方法,但所提方法由于未考虑地震中各个经济部门之间的相关关联而导致计算结果偏低。Kawashima等^[63]结合投入-产出分析理论对震害间接损失进行了研究,评估了1983年Nihonkai-Chubu地震引起的间接损失,给出了二次涟漪影响计算公式。Porter等^[64]引入Monte Carlo方法考虑地震动参数的不确定性,提出了基于构件的结构震害经济损失评估计算方法。Aslani等^[65]将地震动强度、结构构件与非结构构件的损伤状态、结构修复与重建费用、结构地震动响应等作为震害经济损失评估的不确定性因素,提出了结构震害经济损失评估的全概率计算方法。Zareian等^[66]将地震动危险性分析、结构动力响应及结构震害损失分析三者相结合,基于工程结构Push-over推覆分析提出了基于性能的简化经济损失评定方法。Hallegatte^[67]在内部区域产业模型——投入-产出分析模型^[68]研究的基础上,通过对过度生产参数、适应性参数、供需参数等进行调整完善,提出了改进的自适应区域投入-产出模型,有效保证了震害间接经济损失评估的可靠性。Porter等^[69-71]、Spence等^[72]、Bird等^[73]、Crowley等^[74-75]、Mitrani-Reiser等^[76]、Baker等^[77]等亦对震害直接与间接经济损失、区域整体经济结构、长期经济影响等各个方面进行了深入研究,取得了极具参考价值的研究成果。

3.2 中国震害经济损失评估

中国开展对地震经济损失评估的研究工作相对较晚,始于20世纪80年代,中国地震局灾害防御司于1989~1990年间组织成立了“未来地震灾害损失预测研究组”,刘锡荟等对其开展了大量理论和实践调查工作,出版了《中国地震灾害损失预测研究》^[78]一书,对中国地震经济损失研究工作的进一步发展产生了深远影响。1984年,刘锡荟等^[79]基于近似推断原理和模糊逻辑方法,模拟研究了震害预测过程中PGA、烈度、场地等参数的模糊性,提出了震害预测的模糊数学模型。1985年,刘锡荟等^[80]又针对中国当前实际状况,提出了比较完整而实用的地震损失估计和经济决策模型,为编制城市抗震防灾规划提供了重要依据。1990年,尹之潜等^[81]根据地震危险性研究成果,提出了可用于计算结构震害程度及一定时期内某地区地震损失期望值的城市与企业地震损失的计算方法,随后考虑城市建设发展,新旧房屋交替,建筑抗震能力提高,社会财富增加等因素的

不确定性,相继于 1994 年、1996 年提出了采用动态震害矩阵和动态损失矩阵评估震害损失的动态分析模型^[82]。1991 年,肖光先^[83]提出了适用于城市、农村和受灾地区的地震灾害损失快速评估方法,以为震后应急与财政援助计划、震后恢复重建等提供决策依据。

进入 21 世纪,中国专家、学者在保持既有区域震损评估研究的同时,进一步向单体建筑物地震经济损失研究推进,研究内容不断系统化、细致深入化。2003 年,尹之潜等^[84]为克服烈度缺少客观定量标准及其与地震作用之间关系离散性较大的缺陷,提出了以地震加速度谱作为输入参数计算单体和群体建筑物地震易损性和经济损失预测的方法,给出了砖结构基本完好(D_1)、轻微破坏(D_2)、中等破坏(D_3)、严重破坏(D_4)、毁坏(D_5)5 种损伤状态随超越强度倍率 E 变化的易损性概率分布曲线,如图 8 所示。2004 年,郭章林等^[85]引入遗传神经网络技术方法,将震级、地震动输入参数、人均生产总值、受灾面积和受灾人口密度作为网络输入节点,将震害直接经济损失与灾区国内生产总值之比(直接经济损失率)作为输出节点,提出了基于遗传神经网络的震害经济损失评估模型,通过案例验证了所提模型的可靠性,如图 9 所示。2005 年,马宏旺等^[86]认为合理的结构性能水平划分存在困难和不确定性,为此其将结构性能状态作为随机变量连续化处理,并与结构的破坏程度相结合建立了结构线性损失函数,提出了某一强度地震作用下单一建筑物直接财产损失预测的评估方法。2008 年汶川地震发生后,中国地震局、山东省地震局、河北省地震局、新疆地震局、陕西省地震局、云南省地震局以及防灾科技学院迅速采取行动,对汶川 8.0 级地震造成的间接经济损失进行了评估研究,其将地震间接经济损失 L 划分为区内企业与服务业停产歇业造成的经济损失 L_1 和恢复生产营业后地震影响造成的减产经济损失 L_2 两部分,并结合现场调查数据、灾区市县国内生产总值数据、各市县震害系数 Z_i 等参数提出了汶川地震间接经济损失 L 的评估计算方法,即

$$L = L_1 + L_2 = \sum_{i=1}^4 G_i T_{1i} + \sum_{i=1}^4 G_i Z_i T_{2i} \quad (5)$$

$$Z_i = \left\{ \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^4 R_{ij} D_{ij} \frac{S_k}{\sum_{k=1}^4 S_k} \right\}$$

式中: G_i 为第 i 评估区国内第二、三产业生产总值; T_{1i} 为第 i 评估区企业与服务业恢复生产营业时间;

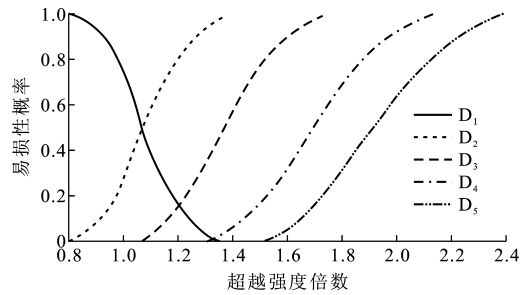


图 8 砖结构易损性曲线

Fig. 8 Vulnerability Curves of Brick Structure

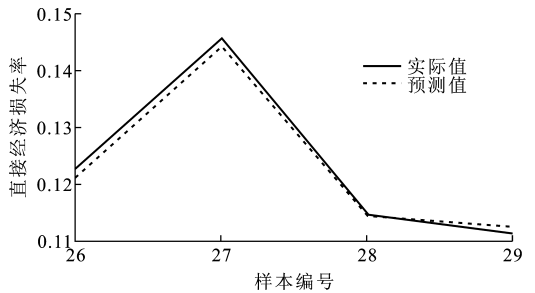


图 9 震害经济损失预测结果与实际结果对比

Fig. 9 Comparison of Seismic Damage Economic Loss

Between Predicting Results and Practical Results

T_{2i} 为第 i 评估区企业与服务业恢复生产营业后的影响时间; S_k 为第 i 评估区 k 类结构房屋的面积; R_{ij} 为第 i 评估区第 j 破坏等级下的破坏比; D_{ij} 为第 i 评估区第 j 破坏等级下的损失比。

基于该评估方法,得到四川汶川 8.0 级地震造成的间接损失值为 11 000 亿元人民币^[87]。随后, Wu 等^[88]于 2009 年采用区域投入-产出模型(Adaptive Regional Input-output Model, ARIO)对汶川大地震造成的区域间接经济损失进行了评估研究,并按照震后 48 个月恢复期和 90 个月重建期计算,得到汶川地震导致的间接损失值为 4 634 亿元人民币,计算结果与文献^[89]中的研究结果存在较大的差异。2013 年,周光海等^[90]引入具有海量数据存储与处理功能的地理信息系统(Geographic Information System, GIS),根据云南省地震局提供的各地区基础人口、经济、地理等数据,开发了震害直接经济损失的 GIS 评估系统,系统流程如图 10 所示,并对姚安县地震引发的直接经济损失进行了计算分析,取得了较好的评估结果。此外,林均岐等^[91]、胡少卿等^[92]对地震企业停产损失、工业设备与基础设施震害直接经济损失开展了研究工作,林均岐等^[93]对各国震害经济损失进行了综述。

4 结 语

(1)地震风险观测目前已进入自动化数字记录

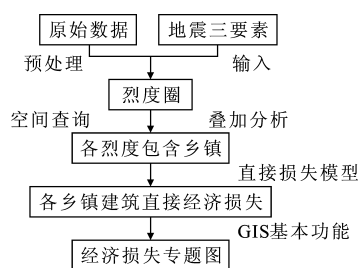


图 10 震害直接经济损失 GIS 评估系统流程

Fig. 10 GIS Assessment System Flow of Direction
Economic Loss of Seismic Damage

阶段,虽然相关仪器设备比较齐全完备,观测记录的地震动数据库也比较丰富,但记录信号受场地形状、噪声、仪器误差等参数的影响仍较大,如何对测试记录信号进行有效校正处理,剔除无效信号数据,确定适宜的信号分解层次,避免过多人为主观因素等仍有待进一步研究,有必要对现有的校正方法进一步改进或提出具有全程自适应功能的校正模型,以确保数据处理更加可靠、高效。

(2)相对而言,各国专家、学者对直接经济损失研究较为系统,开发了较为行之有效的技术方法和评估软件,但针对震害作用产生的间接经济损失研究仍在探索之中,其原因在于震害间接损失的影响因素众多,内容涉及社会学、经济学、工程学等多个领域,且震害发生后往往诸业停滞,次生灾害频发,统计工作难以顺利开展,导致用于间接经济损失评估的关键基础数据匮乏。同时,各部门的统计标准、统计口径、人员素质等也不尽相同,亦会影响间接经济损失的评估。因此,建议建立体制健全、评价标准一致、行之有效的震害数据库专业统计中心,保证关键基础数据的可信度,进而完善震害实际调查数据库、专家经验数据库等;另一方面,应全面考虑震害引起的各种因素,包括不利因素(如经济企业多重涟漪效应损失,环境损失,人文损失等)和有利因素(如震害后民间资本注入,社会情感关注与鼓励等),提出震害间接损失评估的合理分析模型,以使评估值趋近真实值,为震害保险费率厘定提供可靠原始数据。

(3)随着数值计算能力的提高和结构动力时程分析技术的不断完善,基于有限元分析的地震易损性分析计算方法不断得到推广和应用,然而采用数值计算得到结构易损性曲线并不能够完全反映结构的震害状态,亦不足以作为城市防震减灾的决策依据。如何结合地震现场调查数据库,并将其与基于有限元的理论计算方法进行对比回归,充分考虑主观和客观不确定性因素带来的不利影响,进一步修

正结构地震易损性函数,使之能够更为精确地反映结构在不同地震动作用下的损伤状态,仍将是结构地震易损性分析研究的重点。

(4)目前关于地震易损性的分析研究工作多针对一次地震动输入,而工程结构往往遭遇主震、余震多次地震动输入,如汶川地震发生余震 2 300 多次,东日本大地震发生余震 64 次,但在主震、余震等多次地震作用下结构的抗震性能衰变与易损性函数研究目前几乎为空白。因此,研究余震在结构地震分析中的输入方法,使结构地震易损性函数更加真实地反映结构震害损伤状态,将是地震易损性深入研究的一个重要方向。

(5)合理的结构地震易损性分析是结构经济损失分析和地震保险费率厘定的前提和基础,如何将地震易损性分析与地震保险研究有机结合在一起,如何建立系统的、合理的地震保险纯费率与附加费率的理论和方法,亦有待广大专家、学者进一步研究和探讨。

参考文献:

References:

- [1] TRIFUNAC M D. 75th Anniversary of Strong Motion Observation — A Historical Review[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29 (4): 591-606.
- [2] 彭小波, 李小军, 刘启方. 基于强震记录估算同震位移的研究进展及方法[J]. 世界地震工程, 2011, 27(3): 73-80.
PENG Xiao-bo, LI Xiao-jun, LIU Qi-fang. Advances and Methods for the Recovery of Coseismic Displacements from Strong-motion Accelerograms[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(3): 73-80.
- [3] HOUSNER G W. Ground Displacement Computed from Strong-motion Accelerograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1947, 37 (4): 299-305.
- [4] HERSHBERGER J. Recent Developments in Strong Motion Analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1955, 45(1): 11-21.
- [5] BERG G V, HOUSNER G W. Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Ground Motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1961, 51(2): 175-189.
- [6] SCHIFF A, BOGDANOFF J L. Analysis of Current Methods of Interpreting Strong-motion Accelerograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1967, 57(5): 857-874.

- [7] BOYCE W H. Integration of Accelerograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1): 261-263.
- [8] TRIFUNAC M. Zero Baseline Correction of Strong-motion Accelerograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(5): 1201-1211.
- [9] TRIFUNAC M, LEE V. A Note on the Accuracy of Computed Ground Displacements from Strong-motion Accelerograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974, 64(4): 1209-1219.
- [10] HANKS T C. Strong Ground Motion of the San Fernando, California, Earthquake: Ground Displacements [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(1): 193-225.
- [11] IWAN W D, MOSER M A, PENG C Y. Some Observations on Strong-motion Earthquake Measurement Using a Digital Accelerograph [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(5): 1225-1246.
- [12] BOORE D M. Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1199-1211.
- [13] 王国权, 周锡元. 921 台湾集集地震近断层强震记录的基线校正[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 1-14.
WANG Guo-quan, ZHOU Xi-yuan. Baseline Correction or Near Fault Ground Motion Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 1-14.
- [14] BOORE D M, STEPHENS C D, JOYNER W B. Comments on Baseline Correction of Digital Strong-motion Data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(4): 1543-1560.
- [15] CHEN S M, COH C H. Estimating Permanent Ground Displacement from Near-fault Strong-motion Accelerations [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(1): 63-75.
- [16] CHANERLEY A A, ALEXANDER N A. Obtaining Estimates of the Low-frequency Fling Instrument Tilts and Displacement Time-series Using Wavelet Decomposition[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2010, 8(2): 231-255.
- [17] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 19-25.
LU Xi-lin, SU Ning-fen, ZHOU Ying. IDA-based Seismic Fragility Analysis of a Complex High-rise Structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(5): 19-25.
- [18] WHITMAN R V, REED J W, HONG S T. Earthquake Damage Probability Matrices[C]//WCEE. Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome: WCEE, 1973: 2531-2540.
- [19] BRAGA F, DOLCE M, LIBERATORE D. A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuring Review of the MSK-76 Scale[C]//WCEE. Proceedings of the Seventh European Conference on Earthquake Engineering. Athens: WCEE, 1982: 431-450.
- [20] DOLCE M, MASI A, MARINO M, et al. Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (Southern Italy) Including Site Effects[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2003, 1(1): 115-140.
- [21] DI PASQUALE G, ORSINI G, ROMEO R W. New Develops in Seismic Risk Assessment in Italy[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2005, 3(1): 101-128.
- [22] Applied Technology Council. Earthquake Damage Evaluation Data for California[R]. Palo: ATC, 1985.
- [23] GIOVIAZZI S, LAGOMARSINO S. A Macroseismic Method for the Vulnerability Assessment of Buildings [C]//WCEE. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: WCEE, 2004: 121-136.
- [24] GIOVIAZZI S. The Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis[D]. Braunschwig: Technical University of Braunschwig, 2005.
- [25] OLIVEIRA C S, DE SA F M, FERREIRA M A. Application of Two Different Vulnerability Methodologies to Assess Seismic Scenarios in Lisbon [C]//MENDES-VICTOR L A, OLLVEIRA C S, AZEVEDO J, et al. Proceedings of 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake. Lisbon: Springer, 2005: 37-42.
- [26] LANTADA N, PUJADES L G, BARBAT A H. Risk Scenarios for Barcelona, Spain[C]//WCEE. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: WCEE, 2004: 423-434.
- [27] KIREMIDJIAN A. Subjective Probabilities for Earthquake Damage and Loss[J]. Structural Safety, 1985, 2(4): 309-317.
- [28] 尹之潜. 结构易损性分类和未来地震灾害估计[J]. 中国地震, 1996, 12(1): 49-55.
YIN Zhi-qian. Classification of Structure Vulnerability and Evaluating Earthquake Damage from Future Earthquake[J]. Earthquake Research in China, 1996,

- 12(1):49-55.
- [29] 孙柏涛,张桂欣.汶川 8.0 级地震中各类建筑结构地震易损性统计分析[J].土木工程学报,2012,45(5):26-30.
- SUN Bai-tao,ZHANG Gui-xin. Statistical Analysis of the Seismic Vulnerability of Various Types of Building Structures in Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(5):26-30.
- [30] SPENCE R J, COBURN A W, POMONIS A, et al. Correlation of Ground Motion with Building Damage: The Definition of a New Damage-based Seismic Intensity Scale[C]//WCEE. Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: Balkema A A,1992:551-556.
- [31] YAMAGUCHI N, YAMAZAKI F. Fragility Curves for Buildings in Japan Based on Damage Surveys After the 1995 Kobe Earthquake[C]//ECEE. Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering. Auckland:ECEE,2002:2451-2458.
- [32] SABETTA F, GORETTI A, LUCANTONI A. Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion[C]//ECEE. Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering. Paris:ECEE,1998:1-11.
- [33] YAKUT A, OZCEBE G, YUCEMEN M S. Seismic Vulnerability Assessment Using Regional Empirical Data[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2006,35(10):1187-1202.
- [34] ROSSETTO T, ELNASHAI A. Derivation of Vulnerability Functions for European-type RC Structures Based on Observational Data[J]. Engineering Structures,2003,25(10):1241-1263.
- [35] 刘如山,胡少卿,邬玉斌,等.基于地震动参数的结构易损性表达方法研究[J].地震工程与工程振动,2009,29(6):102-107.
- LIU Ru-shan, HU Shao-qing, WU Yu-bin, et al. Research on Structure Vulnerability Expression Way Based on Seismic Ground Motion Parameters[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2009,29(6):102-107.
- [36] 刘晶波,刘阳冰,闫秋实,等.基于性能的方钢管混凝土框架结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2010,43(2):39-47.
- LIU Jing-bo, LIU Yang-bing, YAN Qiu-shi, et al. Performance-based Seismic Fragility Analysis of CFST Frame Structures[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(2):39-47.
- [37] Federal Emergency Management Agency. Multi-hazard Loss Estimation Methodology — Earthquake Model [R]. Washington DC:FEMA,2003.
- [38] DER KIUREGHIAN A, DITLEVSEN O. Aleatory or Epistemic? Does It Matter? [J]. Structural Safety, 2009,31(2):105-112.
- [39] WEN Y K, ELLINGWOOD B R, VENEZIANO D, et al. Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering[R]. Urbana:MAE Center,2003.
- [40] ELLINGWOOD B R. Earthquake Risk Assessment of Building Structures [J]. Reliability Engineering and System Safety,2001,74(3):251-262.
- [41] LIEL A B, HASELTON C B, DEIERLEIN G G, et al. Incorporating Modeling Uncertainties in the Assessment of Seismic Collapse Risk of Buildings[J]. Structural Safety,2009,31(2):197-211.
- [42] CORNELL C A. The Probabilistic Basis for the 2000 SAC/FEMA Steel Moment Frame Guidelines [J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(4):526-533.
- [43] 吕大刚,于晓辉.基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究[J].建筑结构学报,2013,34(10):41-48.
- LU Da-gang, YU Xiao-hui. Theoretical Study of Probabilistic Seismic Risk Assessment Based on Analytical Functions of Seismic Fragility[J]. Journal of Building Structures,2013,34(10):41-48.
- [44] ELLINGWOOD B R, KINALI K. Quantifying and Communicating Uncertainty in Seismic Risk Assessment[J]. Structural Safety,2009,31(2):179-187.
- [45] 徐龙河,单旭,李忠献.强震下钢框架结构易损性分析及优化设计[J].工程力学,2013,30(1):175-179.
- XU Long-he, SHAN Xu, LI Zhong-xian. Vulnerability Analysis and Optimization Design for Steel Frame Structure Under Strong Earthquakes[J]. Engineering Mechanics,2013,30(1):175-179.
- [46] 于刚,孙智,孙利民.基于塑性极限状态的结构易损性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(12):1953-1957.
- YU Gang, SUN Zhi, SUN Li-min. Structural Vulnerability Analysis Based on Plastic Limit State[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2010,42(12):1953-1957.
- [47] 吴巧云,朱宏平,樊剑.基于性能的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J].工程力学,2012,29(9):117-124.
- WU Qiao-yun, ZHU Hong-ping, FAN Jian. Performance-based Seismic Fragility Analysis of RC Frame Structures[J]. Engineering Mechanics,2012,29(9):

- 117-124.
- [48] 韩森,李守静.基于能力谱法的框架-剪力墙结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2010,43(增):108-112.
- HAN Miao, LI Shou-jing. Seismic Fragility Analysis for Frame-shear Wall Structure Based on Capacity Spectrum Method[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S): 108-112.
- [49] 孙鸿宾,吴子燕,刘骁骁.基于多维性能极限状态的结构易损性分析[J].工程力学,2013,30(5):147-152.
- SUN Hong-bin, WU Zi-yan, LIU Xiao-xiao. Multidimensional Performance Limit States for Structural Fragility Estimation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 147-152.
- [50] 何益斌,李艳,沈蒲生.基于性能的高层混合结构地震易损性分析[J].工程力学,2013,30(8):142-147, 162.
- HE Yi-bin, LI Yan, SHEN Pu-sheng. Performance-based Seismic Fragility Analysis of Tall Hybrid Structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 142-147, 162.
- [51] 侯爽,郭安薪,李惠,等.城市典型建筑的地震损失预测方法 I:结构易损性分析[J].地震工程与工程振动,2007,27(6):64-69.
- HOU Shuang, GUO An-xin, LI Hui, et al. Earthquake Loss Prediction Method of Typical Urban Buildings I: Structural Vulnerability Analysis [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 64-69.
- [52] ASLANI H, MIRANDA E. Probabilistic Earthquake Loss Estimation and Loss Disaggregation in Buildings [R]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [53] KIRCHER C A, NASSAR A A, KUSTU O, et al. Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation[J]. Earthquake Spectra, 1997, 13(4): 663-682.
- [54] KIRCHER C A, WHITMAN R V, HOLMES W T. HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods [J]. Natural Hazards Review, 2006, 7(2): 45-59.
- [55] SCHNEIDER P J, SCHAUER B A. HAZUS — Its Development and Its Future[J]. Natural Hazards Review, 2006, 7(2): 40-44.
- [56] KRAWINKLER H. Van Nuys Hotel Building Tested Report: Exercising Seismic Performance Assessment [R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2005.
- [57] Automated Learning Group. MAEViz Introduction & Tutorial [R]. Urbana-champaign: University of Illinois, 2004.
- [58] GERBAUDO G M. Developing Insurance Solutions Software for Natural Hazard Loss Estimation [D]. Fajardo: University of Puerto Rico, 2007.
- [59] 王闽雄.钢筋混凝土框架结构的地震损失估计与概率风险分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- WANG Min-xiong. Earthquake Loss Estimation and Probabilistic Risk Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [60] WHITMAN R V, REED J W, HONG S T. Earthquake Damage Probability Matrices [C]//WCEE. Proceeding of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome: WCEE, 1973: 2531-2540.
- [61] SCHOLL R E. Seismic Damage Assessment for High-rise Building: Annual Technical Report [R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1979.
- [62] KURIBAYASHI E, UEDA O, TAZAKI T. An Econometric Model of Long-term Effects of Earthquake Losses [C]//UJNR. Proceedings of the 13th Joint Meeting of US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects. Tsukuba: UJNR, 1987: 85-87.
- [63] KAWASHIMA K, KANO T. Evaluation of Indirect Economic Effects Caused by the 1983 Nihonkai-Chubu, Japan, Earthquake [J]. Earthquake Spectra, 1990, 1(6): 739-756.
- [64] PORTER K A, KIREMIDJIAN A S. Assembly-based Vulnerability of Buildings and Its Uses in Seismic Performance Evaluation and Risk Management Decision-making [R]. Stanford: Stanford University, 2001.
- [65] ASLANI H, MIRANDA E. Probabilistic Earthquake Loss Estimation and Loss Disaggregation in Buildings [R]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [66] ZAREIAN F, KRAWINKLER H K. Simplified Performance-based Earthquake Engineering [R]. Stanford: Stanford University, 2006.
- [67] HALLEGATTE S. An Adaptive Regional Input-output Model and Its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina [J]. Risk Analysis, 2008, 28(3): 779-799.
- [68] WILSON R. Earthquake Vulnerability Analysis for Economic Impact Assessment [R]. Washington DC: Information Resources Management Office, 1982.
- [69] PORTER K A, KIREMIDJIAN A S, LEGRUE J S, et al. A Building Damage Estimation Method for Business Recovery [C]//WCEE. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: WCEE, 2000: 2821-2828.

- [70] PORTER K A, KIREMIDJIAN A S, LEGRUE J S. Assembly-based Vulnerability of Buildings and Its Use in Performance Evaluation[J]. *Earthquake Spectra*, 2001, 17(2): 291-312.
- [71] PORTER K A, BECK J L, SHAIKHUTDINOV R V. Sensitivity of Buildings Loss Estimates to Major Uncertain Variables[J]. *Earthquake Spectra*, 2002, 18(4): 719-743.
- [72] SPENCE R, BOMMER J J, DEL RE D, et al. Comparing Loss Estimation with Observed Damage: A Study of the 1999 Kocaeli Earthquake in Turkey[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2003, 1(1): 83-113.
- [73] BIRD J F, BOMMER J J, BRAY J D, et al. Comparing Loss Estimation with Observed Damage in a Zone of Ground Failure: A Study of the 1999 Kocaeli Earthquake in Turkey[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2004, 2(3): 329-360.
- [74] CROWLEY H, PINHO R, BOMMER J J. A Probabilistic Displacement-based Vulnerability Assessment Procedure for Earthquake Loss Estimation[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2004, 2(2): 173-219.
- [75] CROWLEY H, BOMMER J J, PINHO R, et al. The Impact of Epistemic Uncertainty on an Earthquake Loss Model[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34(14): 1653-1685.
- [76] MITRANI-REISER J, BECK J. An Ounce of Prevention: Probabilistic Loss Estimation for Performance-based Earthquake Engineering[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2007.
- [77] BAKER J W, SCHUBERT M, FABER M H. On the Assessment of Robustness [J]. *Structural Safety*, 2008, 30(3): 253-267.
- [78] 国家地震局震害防御司未来地震灾害损失预测研究组. 中国地震灾害损失预测研究[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
National Earthquake Disaster Defense Department of Earthquake Disaster Loss Prediction Research in the Future. China's Earthquake Disaster Loss Prediction Research[M]. Beijing: Seismological Press, 1990.
- [79] 刘锡荟, 王孟玫, 汪培庄. 震害预测的模糊数学模型[J]. *建筑结构学报*, 1984, 5(1): 26-43.
LIU Xi-hui, WANG Meng-mei, WANG Pei-zhuang. Application of Fuzzy Set Theory to Earthquake Damage Forecast[J]. *Journal of Building Structures*, 1984, 5(1): 26-43.
- [80] 刘锡荟, 李 荷, 何 进. 地震损失估计和经济决策模型[J]. *地震工程与工程振动*, 1985, 5(4): 1-12.
LIU Xi-hui, LI He, HE Jin. A Framework for Seismic Losses Estimation[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1985, 5(4): 1-12.
- [81] 尹之潜, 李树桢, 杨淑文, 等. 震害与地震损失的估计方法[J]. *地震工程与工程振动*, 1990, 10(1): 99-108.
YIN Zhi-qian, LI Shu-zhen, YANG Shu-wen, et al. Estimating Method of Seismic Damage and Seismic Loss[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1990, 10(1): 99-108.
- [82] 尹之潜. 地震灾害损失预测的动态分析模型[J]. *自然灾害学报*, 1994, 3(2): 72-80.
YIN Zhi-qian. A Dynamic Model for Predicting Earthquake Disaster Losses[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1994, 3(2): 72-80.
- [83] 肖光先. 震后灾害损失快速评估[J]. *灾害学*, 1991, 6(4): 12-17.
XIAO Guang-xian. Rapid Assessment of Disaster Losses in Post-earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, 1991, 6(4): 12-17.
- [84] 尹之潜, 赵 直, 杨淑文. 建筑易损性和地震损失与地震加速度谱值的关系(上)[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(4): 195-200.
YIN Zhi-qian, ZHAO Zhi, YANG Shu-wen. Relation Between Vulnerability of Buildings and Earthquake Acceleration Spectra (1)[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(4): 195-200.
- [85] 郭章林, 刘明广, 解德才. 震灾经济损失评估的遗传神经网络模型[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(6): 92-96.
GUO Zhang-lin, LIU Ming-guang, XIE De-cai. Genetic Algorithm-neural Network-based Economic Losses Assessment of Seismic Disaster[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(6): 92-96.
- [86] 马宏旺, 吕西林, 陈晓宝. 建筑结构地震直接经济损失估计方法[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(3): 38-43.
MA Hong-wang, LU Xi-lin, CHEN Xiao-bao. An Estimation Method for the Direct Losses of Earthquake-induced Building Damages[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(3): 38-43.
- [87] 都吉夔, 张 勤, 宋立军, 等. 四川汶川 8.0 级地震间接经济损失评估方法[J]. *灾害学*, 2008, 23(4): 130-133.
DU Ji-kui, ZHANG Qin, SONG Li-jun, et al. Assessment Method of Indirect Economic Loss from Wenchuan M8.0 Earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(4): 130-133.
- [88] WU J D, LI N, HU A J. Modeling Economic Impact of Wenchuan Earthquake on Sichuan Province Based on ARIO Model[R]. Beijing: Beijing Normal Univer-

- sity, 2009.
- [89] 刘晓静,王慧彦,李志伟. 工业设备地震灾害直接经济损失评估方法[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 258-262.
- LIU Xiao-jing, WANG Hui-yan, LI Zhi-wei. Study on Estimation of Direct Economic Losses of Industrial Equipment Due to Earthquakes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 258-262.
- [90] 周光海,洪 亮,刘 纯. 基于 GIS 的地震建筑直接经济损失评估研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(10): 56-59.
- ZHOU Guang-hai, HONG Liang, LIU Chun. Research on Assessment of Building Direct Economic Lose of Earthquake Based on GIS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(10): 56-59.
- [91] 林均岐,钟江荣,申选召. 地震企业停减产损失评估[J]. 世界地震工程, 2006, 22(4): 18-21.
- LIN Jun-qi, ZHONG Jiang-rong, SHEN Xuan-zhao. Assessment of Earthquake Induced Production Stop and Reduction Loss[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2006, 22(4): 18-21.
- [92] 胡少卿,郭恩栋,戴君武,等. 基础设施工程地震直接经济损失评估方法[J]. 世界地震工程, 2012, 28(4): 137-141.
- HU Shao-qing, GUO En-dong, DAI Jun-wu, et al. Assessment Method of Earthquake Direct Economic Loss of Infrastructure Engineering[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 137-141.
- [93] 林均岐,钟江荣. 地震间接经济损失研究综述[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 1-5.
- LIN Jun-qi, ZHONG Jiang-rong. Review on Study of Seismic Indirect Economic Loss[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003, 19(3): 1-5.

《空间结构》2016 年征订通知

《空间结构》是由国家教育部主管、浙江大学主办的全国性专业科技期刊,1994 年创刊,面向国内外公开发行,目前是《中文核心期刊要目总览》核心期刊,中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊。《空间结构》主要刊载空间结构的理论研究、分析设计、试验与实测、建筑造型、施工工艺、管理经验、工程实例、信息报道及有特色的空间结构工程照片等方面的内容。读者对象为科研单位、设计院、生产施工单位、质检管理部门的科技人员及大专院校师生。

《空间结构》为季刊,大 16 开本,96 页,每期定价 15 元,全年共 60 元;兼营广告,10 月起征订下一年度广告。《空间结构》自办发行,请直接汇款至本编辑部订阅,发行组收到汇款后即寄发票并按期寄给订户。订购款按以下方式汇寄:

银行汇款:

账 户:浙江大学《空间结构》杂志编辑部

开户行:工商银行杭州市浙大分理处

账 号:1202024619914482876

(务请在汇款用途栏内注明订购《空间结构》份数及年限)

邮局汇款:

地 址:杭州玉泉浙江大学空间结构研究中心《空间结构》杂志编辑部

邮 编:310027

(务请在附言栏内注明订购《空间结构》份数及年限)

电 话:(0571)87952414(带传真)

E-mail:kjjgzz@163.com