

李媛媛, 苏国峰, 翁文国, 等. 地震人员伤亡评估方法研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 223 - 227. [ Li Yuanyuan, Su Guofeng, Weng Wenguo, et al. A Review of Researches on Seismic Casualty Estimation[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 223 - 227. ]

## 地震人员伤亡评估方法研究<sup>\*</sup>

李媛媛, 苏国峰, 翁文国, 袁宏永

(清华大学 工程物理系 公共安全研究院, 北京 100084)

**摘 要:** 我国是一个地震频发的国家, 由于我国地震震源较浅, 人口密度大, 地震的发生往往造成巨大的经济损失和人员伤亡。震后根据地震参数和震区情况进行快速的人员伤亡评估, 对于应急救援具有重要意义。在对地震致灾因素进行分析的基础上, 对国内外地震人员伤亡评估方法进行了总结。首先, 对目前常用的三种评估方法, 基于地震参数的经验模型, 基于历史资料的震害矩阵法和基于性能的易损性分析方法进行了归纳, 然后, 介绍了近几年出现的两种新方法, 基于最优化方法的经验模型和基于时间序列的动态模型。最后, 对这些方法的优缺点及适用范围进行了分析。

**关键词:** 地震; 人员伤亡; 评估

**中图分类号:** P315.9; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2014)02 - 0223 - 05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.041

我国处于欧亚板块的东南部, 受印度洋板块和太平洋板块的挤压, 地震活动非常强烈。同时, 由于我国地震震源较浅, 人口密度又大, 一次地震往往造成巨大的人员伤亡。例如, 1976 年河北唐山 7.8 级地震造成 24.2 万人死亡, 2008 年四川汶川 8.0 级地震, 造成 69 227 人死亡, 17 923 人失踪。这些重大地震事件, 不仅造成惨重的人员伤亡和经济损失, 其巨大破坏性也容易引起群众的恐慌, 以致造成社会动荡而带来损失。

根据《国家地震应急预案》<sup>[1]</sup>, 我国对地震应急响应的分级是以人员死亡数作为划分标准, 其中特别重大、重大、较大、一般地震灾害分别对应于 300 人以上, 50 ~ 300 人, 10 ~ 50 人, 10 人以下的人员死亡。也就是说, 人员死亡数是震后应急中制定地震响应级别的一个重要依据。但在实际应急响应中, 由于突发性强, 危害性大, 地震往往造成基础设施诸如路网, 电网、通讯网络的严重破坏, 导致震害区的信息无法及时获取。因此, 地震发生后, 依据地震动参数和震害区的情况对人员伤亡做出快速的评估就显得尤为重要, 这不仅可以为应急响应分级的制定和应急物资的分配提供参考, 对于应急救援和医疗救援的人力安排, 以及震后人员安置和重建方案的制定也具

有参考价值。从长远意义上来说, 能够根据现有建筑物设防水平下的人员伤亡数, 以社会的可接受地震死亡率为标准, 制定出合理的工程抗震设防标准。

### 1 地震造成人员伤亡的原因

学者们以致死性地震为研究对象<sup>[2-3]</sup>, 对地震造成人员伤亡的原因进行了研究。影响地震致灾程度的因素很多, 研究表明, 地震中 75% 的人员死亡来自于建筑物的破坏和倒塌。地震波作用于建筑, 导致其不同程度的破坏, 而在建筑里的未能逃离的人员, 直接致死或者被困, 被困的人员最终因抢救不及时而死亡。作用于这个过程的因素造成了地震的致灾性, 这些因素分为地震动参数和社会因素两部分。宏观上来说, 地震动参数中震级被认为是决定人员死亡数的重要因素之一, 同时, 地震动烈度决定了建筑物的破坏程度, 地震发生的时间决定了人员的在室率<sup>[4]</sup>。社会因素包括震区人口密度和建筑设防标准等。学者们也研究了地震次生衍生灾害引起的人员伤亡, 包括

\* 收稿日期: 2013 - 11 - 11 修回日期: 2013 - 12 - 17

基金项目: 国家自然科学基金(91024024); 十二五国家科技支撑计划(2011BAK07B01, 2011BAK07B04)

作者简介: 李媛媛(1986 -), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事震后人员伤亡评估方法研究。

E-mail: liyuanyuanreborn@126.com

地震引发的火灾、海啸、泥石流和滑坡等<sup>[5-6]</sup>。最常见的次生衍生灾害是火灾，海啸、泥石流等只发生在特别地质条件区域，并不属于普遍的次生灾害。近些年，有些学者开始从流病学和生理学角度研究震后人员的行为特征对地震伤亡率的影响<sup>[7-9]</sup>，主要通过统计地震被困人员在逃离建筑物和被困期间的行为，分析其行为与年龄、性别的关联性。也有中国的学者<sup>[10-12]</sup>开始运用数学方法对震后人员死亡数随时间的变化趋势进行研究，从而通过人员死亡数的报道数推测最终的人员死亡数。

## 2 地震人员伤亡评估方法

通过对地震致灾因素的分析 and 总结，学者们进行了地震后人员伤亡评估方法的研究。总体而言，国内外目前的评估方法分为两类，一类是不考虑建筑破坏情况，通过回归分析历史震害数据得到的基于地震参数（主要是震级和烈度）的人员死亡数或死亡率经验公式；另一类是通过建筑易损性分析得到的基于建筑破坏率的人员死亡率模型。下面对两种评估方法下出现的公式和模型进行介绍。

### 2.1 基于地震参数的经验模型

基于快速评估的需要，震级和烈度是震后最容易和快速取得的数据，因此早期地震伤亡快速研究集中于建立基于震级和烈度的经验模型。Samardjieva 等人<sup>[13-15]</sup>对全球 1990 年以来的地震案例进行了研究，以人口密度为划分标准（25 人/km<sup>2</sup> 以下；25 ~ 50 人/km<sup>2</sup>；50 ~ 100 人/km<sup>2</sup>；100 ~ 200 人/km<sup>2</sup>；200 人/km<sup>2</sup> 以上），得到了全球尺度下 1990 - 1950 年和 1950 - 1999 年的地震死亡数与震级经验公式。同时，在 Oike<sup>[16]</sup>研究的基础上，针对日本 1890 - 1990 年的地震案例得到了日本地区的经验公式。国内学者也针对中国案例进行了这方面的研究，但多数是针对某一次地震案例进行的研究。肖光先<sup>[17]</sup>以人口密度为参数得到基于烈度的人员死亡率。其中，陈颢等人<sup>[18-19]</sup>对 1989 年到 2004 年的 207 个地震案例进行了研究，以 2000 年不变价格表示的人均 GDP 2 700 元为分类阈值，得到生命损失率与地震烈度的关系。陈棋福<sup>[20]</sup>对国内 1980 - 2000 年的地震案例进行了研究，得到了以人口密度为划分标准的人员死亡数与震级经验公式。

基于震级或烈度的经验模型优点是输入

的参数少，适应于震后快速评估的需要。但是，由于各地区的历史强震数据有限，建立的经验公式多是全球尺度或国家尺度，应用到地区的准确程度不是很高。

### 2.2 基于建筑易损性的人员伤亡评估方法

基于建筑易损性的人员评估，总体框架如图 1 所示，首先基于建筑分类和建筑质量，得到地震参数  $E$  下的建筑破坏程度，然后构建  $g(D)$  函数得到不同建筑破坏程度下的人员伤亡率。其中，构建适合的函数  $f(E, T)$  和  $g(D)$  公式是震后人员损失评估研究的关键。

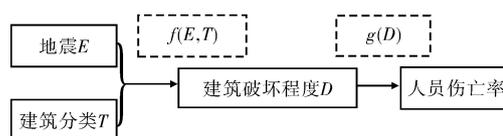


图 1 基于建筑易损性的人员伤亡评估方法

#### 2.2.1 基于历史资料的震害矩阵法

目前，评估建筑破坏的方法主要有两种，① 基于历史资料和专家经验的震害矩阵法<sup>[21-24]</sup>，② 基于性能的易损性分析方法<sup>[25-28]</sup>。

震害矩阵方法是通过统计震后各类建筑的破坏情况，并参考专家的经验，将某一地区的建筑物分类，以破坏概率的形式给出不同烈度下建筑物不同破坏状态的概率。1980 年代，美国联邦紧急事务管理局 (FEMA) 委托应用技术委员会 (ATC) 对加利福尼亚州的建筑类型进行了分类和研究，推出了 ATC - 13<sup>[21]</sup> 震害矩阵方法，对加利福尼亚州未来的地震损失估计进行了系统的研究。国内尹之潜及其研究小组<sup>[23-24]</sup>地震损失预测领域开展过许多研究工作，提出了建筑物及设施的地震易损性分类方法、各类房屋结构的易损性分析方法、地震灾害损失预测方法等，他在《地震灾害及损失预测方法》<sup>[24]</sup>一书中系统总结了预测地震灾害和损失的基础理论及实用方法。何玉林<sup>[22]</sup>通过对四川省境内 10 个地震震例的经验统计得到四川省不同地区的房屋建筑易损性矩阵。

震害矩阵方法的优点是可以快速简洁地进行评估，对承灾体载体的数据详细程度要求程度不高；缺点是对建筑类别的划分比较粗，受当地地震历史条件的限制，震害矩阵的准确度和可信度会受到影响。

#### 2.2.2 基于性能的易损性分析方法

基于性能的易损性分析方法使用模型计算方法，通过地震波传播的衰减方程，计算得到震区

地震动情况,以地震动参数(如 PAG、PGV、PGD、反应谱值)作为建筑易损性分析的输入参数,然后采用建筑结构的数学模型(例如,能力谱方法),输出地震动参数下建筑物不同破坏程度的破坏概率。1990 年代,美国首先对这种方法进行了研究,FEMA 委托美国建筑科学研究所(NIBS)组织包括大学、研究所、咨询公司在内的各方面专家,对近年来地震损失预测技术进行了全面的总结,推出了 HAZUS 地震损失软件<sup>[25-26]</sup>。2005 年又进行了改进能力谱方法研究<sup>[27]</sup>,推出了 HAZUS - MH5 版本。之后,挪威 NORSAR 的研究人员也基于能力谱法(capacity spectrum methods (CSM)),推出了 SELENA (Seismic Loss Estimation using a Logic Tree Approach) 地震风险和损失评估平台<sup>[28]</sup>。

基于性能的易损性分析方法的优点是充分考虑结构类型、建筑高度和层数、建筑年代、抗震设防等级等参数的影响,对地震人员伤亡进行了系统的计算;缺点是需要对地区的建筑进行详细分类和细致调查,并建立详细的建筑数据库,进行大量的数值计算和统计分析。特别需指出的是,HAZUS 地震评估方法是基于美国本土数据库和建筑类型建立的,在其他国家和地区使用时,需要进行模块的改进。

### 2.3 人员伤亡率计算方法

人员伤亡率的计算即构建  $g(D)$  函数公式的过程,基于现场调查和专家经验,得到不同建筑各种破坏状态下的人员死亡率和受伤率。在死亡率的研究中,不同的研究者制定了不同的标准,ATC - 13 中对除了轻质钢筋和木质结构之外的建筑结构进行了研究,并将建筑破坏情况分为 moderate、heavy、major 和 destroyed 四个等级,相应的人员死亡率分别为 0.000 1, 0.001, 0.01 和 0.2; 在受伤人数的研究中,将重伤和轻伤人数与死亡人数的比值设置为 30:4:1。HAZUS(2003)中对钢筋混凝土结构进行了研究,将 extensive damage, complete damage (no collapse) 和 complete damage (collapse) 建筑破坏状态下的人员死亡率设为 0.000 01, 0.000 1 和 0.1; HAZUS(2003)将受伤类型分为具有死亡危险的受伤和需要就医的重伤两类,两者与死亡人数的比值分别为 0.5:2:1。

国内学者针对我国建筑类型进行了研究,目前常用的人员伤亡评估公式有以下几个。

(1)以房屋的毁坏比为主要参数,建立死亡人数与房屋毁坏比的关系<sup>[24]</sup>:

$$\log RD = 12.479A^{0.1} - 13.3. \quad (1)$$

式中:RD 为死亡人数,A 为房屋毁坏比,受伤人数取死亡人数的 3 ~ 5 倍。

(2)以烈度、建筑物破坏率为参数,考虑发震时间对人员死亡率的影响,分别建立白天和夜间的死亡率公式,其中白天发震的情况是<sup>[24]</sup>:

$$RD = 0.00097 \exp[0.5(I_j - 7)] \times D_p, \quad (2)$$

$$RI = 0.008829 \exp[0.5(I_j - 7)] \times D_p. \quad (3)$$

夜间发震:

$$RD = 0.0126 \frac{I - 4.76}{I + 0.25} \exp[0.75(I - 7)] \times D_p, \quad (4)$$

$$RI = \frac{0.0686}{1 + 0.25} \exp[0.75(I - 7)] \times D_p. \quad (5)$$

式中:RD 为死亡率;RI 为受伤率;I 为地震烈度; $D_p$  为建筑破坏率。

(3)考虑房屋倒塌率、人员密度、发震时间及烈度因素,采用最小二乘法,进行人员伤亡估算<sup>[29]</sup>:

$$\log RD = 9.0D_p^{0.1} - 10.07, \quad (6)$$

$$ND = f_i f_p RD \times M. \quad (7)$$

式中:RD 为人员死亡率;ND 为地区人员死亡数估计值; $D_p$  为房屋的倒塌率;M 为该地区总人口; $f_p$  人口密度修正系数(如表 1 所示), $f_i$  为地震发生时间的修正系数。

表 1 人口密度修正系数

人口密度 $\rho$ / (人/km <sup>2</sup> )	< 50	50 ~ 200	200 ~ 500	> 500
修正系数 $f_p$	0.8	1.0	1.1	1.2

发震时间通过影响在室率而影响死亡人口数量。发震时间不同,人员在室率不同,在人口密度和人口总人数不变的情况下,夜间地震导致的人员死亡数多于白天地震导致的死亡数。在烈度为 VI ~ XI 度时,地震发生在白天的死亡率与发生在晚间的死亡率之比分别为 0.06, 0.13, 0.25, 0.43, 0.74, 0.98。因此,将白天的时间修正系数取为 1,可取夜晚的时间修正系数如表 2 所示。

表 2 时间修正系数

烈度	VI	VII	VIII	IX	X
时间修正系数	17	8	4	2	1.5

### 2.4 近期出现的地震人员伤亡评估方法

(1)美国 USGS 的 Jaiswal 和 Wald 等人<sup>[30]</sup>采用了最优化方法得到了基于地震烈度的人员死亡率。具体方法是首先通过地震危险性分析,重建地震场景,得到烈度分布;然后设置每一烈度区域的人员死亡率,并根据人口密度得到每一烈度区人口死亡

人数,最后运用最优化方法使得总人口死亡计算值与统计值差值最小,从而确定每个烈度下的人员死亡。

Wald用这种方法对全球的地震案例进行了研究,做出了国家尺度的烈度-人员死亡率,但对具体地区的研究并不深入。

(2) 基于时间序列的动态模型。近年来由于网络的发展,地震发生后,媒体会及时公布各个时间段的人员伤亡情况。因此,通过数学方法,由某一时间的人员伤亡报道数推测最终的人员伤亡成为近期的一个研究热点。我国刘倬等学者对这种方法进行了研究<sup>[10-11]</sup>,他们将人员死亡数的变化设定为指数增长,公式如下:

$$N(t) = N_0[1 - \exp(-\alpha t)], \quad (8)$$

$$\frac{dN}{dt} = \alpha(N_0 - N)。 \quad (9)$$

式中: $N(t)$ 表示报道时刻的人口死亡数; $N_0$ 表示最终死亡数; $\alpha$ 是参数。

具体方法是对已有震例进行拟合分析,得到参数 $\alpha$ 的值;然后分析震例的最大烈度与 $\log(\alpha)$ 的关系,最后根据得到的置信区间为95%的最大烈度与 $\log(\alpha)$ 关系曲线预测最终死亡人数。

这个模型比较简单粗略,纯粹从数学角度出发,而且使用的震例来源于多个国家和地区,拟合结果并不能很好的应用于我国地震。

### 3 总结

目前震后人员伤亡评估模型众多,但不同的模型估算结果差异比较大。差异一方面来源于地震灾害数据的收集,另一方面来源于评估模型本身。首先,从地震人员伤亡数据来说,目前历史震害的数据库并不完善,多数人员伤亡数据库仅仅是记录地震动参数和人员总体伤亡情况,更为详细的可能是基于县市一级的人口伤亡数据。而想要建立基于建筑易损性的人员伤亡评估模型,这些数据精确度是远远不够的,模型不仅需要建筑类型、建筑层数、建筑损坏程度数据,甚至需要不同损坏程度的建筑物内的人员伤亡数据。这些数据的采集在地震发生后的实施过程中具有很大的难度,因此,数据精确度的欠缺也影响了人员伤亡评估模型的准确性。

第二,从模型角度来说,基于地震参数的经验公式基于统计规律,对历史数据的依赖性比较强,选取的历史数据集合不同对建立的计算方法

会产生很大影响,但简单的参数获取比较适用于震后人员伤亡快速评估的需要。基于建筑破坏的人员伤亡评估,在建筑物破坏方面,地震学、建筑工程学领域进行了大量的研究工作,已经存在科学系统的方法,但在人员伤亡评估方面还没有形成比较系统的理论方法。其中,基于性能的易损性分析方法代表了目前的研究方向,但由于建筑类型和地域差异性等因素的存在,在将HAZUS应用于我国的震后伤亡评估时,需要进行内部模块的完善。

因此,在应对震后人员快速评估的需要时,经验公式是一个比较理想的模型,但前提是建立比较系统准确的人员伤亡数据库。而在基于建筑易损性方法的模型研究方面,由于我国缺乏详细的震后建筑物人员伤亡数据,借鉴国外模型,进行内部模块的完善,得到适用于我国建筑物特点的评估模型,不失为一种有效的方法。

### 参考文献:

- [1] 国家地震应急预案[EB/OL]. (2006-01-12) [2013-05-08]. <http://www.china.com.cn/chinese/PI-c/1091583.htm>.
- [2] Tsai Y B, Yu T M, Chao H L, et al. Spatial distribution and age dependence of human-fatality rates from the Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of 21 September 1999[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 2001, 91(5): 1298-1309.
- [3] 李永强, 杨杰英, 曹刻, 等. 云南相似大震人员伤亡差异因素分析[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 40-43.
- [4] 程家喻. 地震发生时间对人员伤亡影响的概率[J]. 灾害学, 1993(2): 13-16.
- [5] Spence R J, So E, Scawthorn C. Human casualties in earthquakes: Progress in modelling and mitigation [M]. Advances in Natural and Technological Hazards Research, 2009: 29.
- [6] Scawthorn C, Yamada Y. A model for urban post-earthquake fire hazard[J]. Disasters, 1981, 5(2): 125-132.
- [7] Ramirez M, Peek-Asa C. Epidemiology of traumatic injuries from earthquakes[J]. Epidemiologic Reviews, 2005, 27: 47-55.
- [8] Chou Y J, Huang N, Lee C H, et al. Who is at risk of death in an earthquake? [J]. Am J Epidemiol, 2004, 160(7): 688-695.
- [9] Liang N J, Shih Y T, Shih F Y, et al. Disaster epidemiology and medical response in the Chi-Chi earthquake in Taiwan [J]. Ann Emerg Med, 2001, 38(5): 549-555.
- [10] Li Y C, Wu Z L, Zhao Y Z. Estimating the number of casualties in earthquakes from early field reports and improving the estimate with time [J]. Nat Hazards, 2011, 56: 699-708.
- [11] Zhao Y Z, Wu Z L, Li Y T. Casualty in earthquake and tsunami disasters: internet-based monitoring and early estimation of the final death toll [C]//Proceedings of the 14th World Conference on

- Earthquake Engineering (WCEE), Beijing, October 12 - 17, 2008 (CD), Paper ID 09 - 01 - 01.
- [12] 吴新燕, 顾建华, 吴昊昱. 地震报道死亡人数随时间变化的修正指数模型[J]. 地震学报, 2009, 31(4): 457 - 463.
- [13] Christoskov L, Samardjieva E. An approach for estimation of the possible number of casualties during strong earthquakes [J]. Bulg Geophys, 1984, 4: 94 - 106.
- [14] Samardjieva E, Oike K. Modelling the number of casualties from earthquakes [J]. Nat. Disaster Sci, 1992, 1: 17 - 28.
- [15] Samardjieva E, Badal J. Estimation of the expected number of casualties caused by strong earthquakes [J]. Bull Seismol Soc Am, 2002, 92(6): 2310 - 2322.
- [16] Oike K. A discussion on the relation between the magnitude and the number of the dead by earthquakes [C]//Proc. of the Int. Seminar on Earthq. Prediction and Hazard Mitigation Technology. Tsukuba, 1991: 333 - 341.
- [17] 肖光先. 震后灾害损失快速评估 [J]. 灾害学, 1991, 6(4): 12 - 17.
- [18] 陈颢, 刘杰, 陈棋福, 等. 地震危险性分析和震害预测 [M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [19] 刘吉夫, 陈颢, 史培军, 等. 中国大陆地震风险分析模型研究(II): 生命易损性模型[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 404 - 407.
- [20] Qi-fu Chen, Hongliang Mi, Jing Huang. A Simplified Approach to Earthquake Risk in China Mainland [J]. Pure Appl. Geophys, 2005, 162: 1255 - 1269.
- [21] ATC (Applied Technology Council). Earthquake damage evaluation data for California (ATC-13) [M]. Redwood City, California: Applied Technology Commission, 1985.
- [22] 何玉林, 黎大虎, 范开红, 等. 四川省房屋建筑易损性研究 [J]. 中国地震. 2002, 18(1): 52 - 58.
- [23] 尹之潜. 地震灾害损失预测研究[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(4): 87 - 96.
- [24] 尹之潜. 地震灾害及损失预测方法 [M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [25] NIBS and FEMA (National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency). Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model, HAZUS® MH technical manual [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [26] Federal Emergency Management Agency (FEMA). HAZUS99 Earthquake Loss Estimation Methodology, Technical Manual [R]. Washington, DC, United States: Federal Emergency Management Agency, 1999.
- [27] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA 440 [R], Washington, DC, United States: Applied Technology Council, 2005.
- [28] Molinaa S, Lang D H, Lindholm C D. SELENA-An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure [J]. Puters & Geosciences, 2010, 36: 257 - 269.
- [29] 马玉宏, 谢礼立. 地震人员伤亡估算方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 140 - 147.
- [30] Jaiswal K S, Wald D J. An empirical model for global earthquake fatality estimation [J]. Earthquake Spectra, 2010, 26(4): 1017 - 1037.

## A Review of Researches on Seismic Casualty Estimation

Li Yuanyuan, Su Guofeng, Weng Wenguo and Yuan Hongyong  
(Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Earthquake is a frequent disaster in China, due to shallow source and high population density, an earthquake often leads to huge economic losses and casualties. A rapid assessment of casualties based on seismic parameters and condition in affected areas after the event play a significant role in emergency rescue. By analyzing seismic hazard factors, this paper summarizes the research on seismic casualty estimation all over the world. First, the three most commonly used methods, empirical models based on seismic parameters; building damage matrix methods based on historical data and performance-based vulnerability analysis method are presented. Then, two new methods in recent years are introduced: an empirical model based on optimization method, and a time series-based dynamic model. Finally, the advantages and disadvantages as well as application scope of all these methods are stated.

**Key words:** earthquake; casualty; estimation