

文章编号 1000-5013(2004)01-0054-04

地震人员伤亡的动态评估

周素琴 郭子雄

(华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362011)

摘要 引入初始人员伤亡矩阵的概念, 确定老旧民房、砌体结构、混凝土框架结构的初始人员伤亡矩阵. 在综合考虑初始伤亡状态、被困环境、被困时间、人员素质等因素的基础上, 建立了地震人员伤亡的动态评估方法. 使用该方法对 1996 年丽江地震的人员伤亡进行动态测算, 测算结果与震后统计结果较为接近.
关键词 地震, 人员伤亡矩阵, 动态评估, 初始人员伤亡
中图分类号 O 212.2: P 316 **文献标识码** A

强烈地震往往会造成巨大的生命损失, 因而长期以来为世界各国人民和政府所关注. 现场调查及国内外研究表明, 地震人员伤亡的主要原因是建筑物倒塌破坏, 使得人员被覆压或困于其中得不到及时抢救而造成的. 目前, 减灾的首要目标仍是减少人员伤亡, 震后初期应急救援的重点是人员救援. 即利用一切可能的方法, 将被困在倒塌建筑内的人员抢救出来. 地震造成的人员伤亡与结构破坏在机制上是不同的. 就某个具体被困在倒塌建筑中的人员而言, 在一定的受困环境、初始伤亡状态和身体素质条件下, 其伤势将随时间逐步变化. 因此, 应该采用动态评估方法, 对被困在倒塌建筑中人员的伤亡状态进行分析. 自 70 年代以来, 国内外学者对地震造成的人员伤亡估计的理论和方法, 进行了大量的研究工作^[1]. 然而, 以往的人员伤亡评估往往忽略了地震受困环境中人员伤亡发展变化这一重要环节. 为此, 本文引入了初始人员伤亡矩阵和人员伤亡状态函数两个概念, 进而建立了地震人员伤亡的动态评估方法.

1 地震人员伤亡的动态评估方法

1.1 人员伤亡指数和伤残等级的划分标准

人员伤亡指数是表征在破坏性地震中受困人员的身体受到的伤残程度的量度. 定义 $c = 0$ 表示无伤残, $c = 1$ 表示人员已死亡. 在 $c(0, 1)$ 区间内, 再分为 5 个区间, m 值取 1, 2, 3, 4 和 5 分别对应于人员 5 个伤残等级. 即基本无伤残、轻微伤残、中等伤残、严重伤残和生命垂危. 其伤残指数则分别为 $0 \sim 0.1$, $0.1 \sim 0.3$, $0.3 \sim 0.6$, $0.6 \sim 0.9$, $0.9 \sim 1.0$ ^[2].

1.2 地震人员伤亡状态函数

地震造成的人员伤亡与建筑物地震破坏, 在机制上是不同的. 建筑物的地震破坏状态, 在其遭受地震袭击后的短时间内即可基本确定, 而人员伤亡程度则是随着初始伤亡状态、被困环境、被困时间长短、人员素质等因素而变化的. 综合上述因素进行统计分析^[2], 可建立人员伤亡状态函数为

$$c(t) = (c_0^{\frac{1}{n}} + S_i)t^n. \tag{1}$$

式(1)中, c_0 为初始伤残指数, $0 \leq c_0 \leq 1$; S_i 为第 i 受困环境分级的环境参数, 具体取值如表 1 所示. n 为身体素质指数, 根据身体素质条件好坏, n 分别取为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 共 5 个等级; t 表示人员被困陷的时间(h). 受困环境参数 S_i 在人员初始伤残指数 c_0 确定的情况下比身体素质指数 n 更具影响力, 因此需要分析 S_i 的分布. 在分析中假定 $S_i(t) = S_i$, 即受困人员所处的环境不随时间 t 而变化, 且 S_i 服

收稿日期 2003-07-29

作者简介 周素琴(1974-), 女, 助教, 硕士, 主要从事高层建筑抗震分析的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(E0010028)

从 $N(\mu, \sigma)$ 的正态分布. 由此分布可以计算出各级 S_i 的概率值. 此概率值即遭受各伤残等级 c_m 的人员在不同环境状态 S_i 下的分布比例, 如表 1 所示.

表 1 受困环境的划分及对应概率^[2]

环境分级	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
取值范围	[0.004, 0.006]	[0.006, 0.01]	[0.01, 0.02]	[0.02, 0.04]	[0.04, 0.10]
应概率	0.150	0.264	0.380	0.191	0.015

1.3 初始人员伤亡矩阵

强烈地震中人员初始伤亡的轻重, 在很大程度上取决于结构的破坏状况. 因此, 有必要将结构破坏等级同人员伤亡等级联系起来. 结构震害矩阵 A 是在某一烈度下各种破坏等级(取 5 个等级)的发生概率矩阵. 当震害等级 j 等于 1, 2, 3, 4, 5, 分析表示建筑物基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 倒塌, 其发生概率则分别为 a_1, a_2, a_3, a_4 和 a_5 在某一震害等级下, 5 种人员伤亡等级的分布概率构成的矩阵 C . 在发震时刻 t_0 的初始伤亡概率矩阵, 可以依照表 2 确定. 表中, TR 表示倒塌结构中受困人员所占的比例, NTR 表示倒塌结构中非受困人员所占的比例, 非受困人员指地震中逃离毁坏建筑的人员. 受困率 TR 与地震烈度、发震时间、结构类型等因素有关, 详细参见文献[3]. 计算房屋各破坏等级对应的人

表 2 初始人员伤残概率分布矩阵 C

房屋破坏等级	伤残状态				
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
$j = 1$	$P(c_1 j = 1)$	$P(c_2 j = 1)$	$P(c_3 j = 1)$	$P(c_4 j = 1)$	$P(c_5 j = 1)$
$j = 2$	$P(c_1 j = 2)$	$P(c_2 j = 2)$	$P(c_3 j = 2)$	$P(c_4 j = 2)$	$P(c_5 j = 2)$
$j = 3$	$P(c_1 j = 3)$	$P(c_2 j = 3)$	$P(c_3 j = 3)$	$P(c_4 j = 3)$	$P(c_5 j = 3)$
$j = 4$	$P(c_1 j = 4)$	$P(c_2 j = 4)$	$P(c_3 j = 4)$	$P(c_4 j = 4)$	$P(c_5 j = 4)$
$j = 5(NTR)$	$P(c_1 NTR)$	$P(c_2 NTR)$	$P(c_3 NTR)$	$P(c_4 NTR)$	$P(c_5 NTR)$
$j = 5(TR)$	$P(c_1 TR)$	$P(c_2 TR)$	$P(c_3 TR)$	$P(c_4 TR)$	$P(c_5 TR)$

员初始伤残分布时, 因为伤残等级越高的人员所占比率越小, 所以可以引入描述“越高越少”法则的 Zeta 分布函数, 以此来表示其分布规律^[4], 即

$$P(m) = \frac{(\frac{1}{m^a})}{(\sum_{j=1}^n (\frac{1}{j^a}))}.$$

(2)

在式(2)中, m 为人员伤亡等级, 计算时分别取 1~ 5; j 为房屋破坏等级, 计算时分别取 1~ 4; a 为计算参数, 可以按以下方法确定. 根据震害统计资料, 函数拟合中约定 3 个表征值, 以确定参数 a , 即老旧民房、多层砌体结构、RC 结构. 在严重破坏($j = 4$)下, 伤残等级 $m = 5$ (死亡), 它们的分布概率(10^{-3})分别为 0.8, 1.0, 1.6. 中等破坏($j = 3$)下, 伤残等级 $m = 4$ (重伤), 它们的分布概率(10^{-4})分别为 0.8, 1.0, 1.6. 轻微破坏($j = 2$)下, 伤残等级 $m = 3$ (中等伤残), 它们的分布概率(10^{-5})分别为 0.8, 1.0, 1.6. 在房屋破坏等级 $j = 5$ (倒塌)下, 其伤亡原因和分布与上述 4 个等级有所不同, 并且对于受困和非受困人员的死亡也不能用同样的分布来表示. 对于非受困人员的伤亡分布, 可用 β 分布函数加以拟合. β 分布函数的表达式为^[4]

$$P(m) = \int c^{\gamma-1} (1 - c)^{b-1} / B(\gamma, b) dc,$$

(3)

式中 c 为伤残指数, γ, b 为计算参数, $B(\gamma, b)$ 为 β 分布密度函数算子. 拟合参数 γ, b 时, 在假定重伤与死亡分布概率之和为 10^{-4} 的情况下(即非受困人员中发生重伤与死亡的可能性极小), 以及假定老旧民房、多层砌体结构和 RC 结构在倒塌非受困情况下, 基本无伤残的概率分别为 10%、6% 和 4%. 在 $t = 0$ 时刻, 结构内受困人员的伤残分布在 $[0, 1]$ 区间适合于用指数衰减来量化研究. 指数分布函数的表达式^[5] $P(m) = \int \lambda e^{-\lambda c} dc$. 其中 c 为伤残指数, λ 为计算参数. 拟合计算参数 λ 时, 假定老旧民房受困人员发生重伤和死亡这两个伤残水平的概率和为 3%. 即对于受困者, $P(c_4 + c_5|j = 5) = 3\%$. 而对砌体结构和 RC 结构, 该值概率分别取 9% 和 15%. 利用上述不同房屋破坏等级下的概率分布, 可以分析计算出

前在中国仍广泛存在的老旧民房、多层砌体结构以及 RC 结构的初始人员伤亡分布矩阵 C . 限于篇幅, 本文仅给出砌体结构的初始人员伤亡概率分布矩阵的计算结果, 如表 3 所示.

表 3 多层砌体初始人员伤亡概率分布矩阵

房屋破坏等级	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
$j = 1$	1. 0	0	0	0	0
$j = 2$	0. 999	$7. 01 \times 10^{-4}$	$1. 00 \times 10^{-5}$	0	0
$j = 3$	0. 990	$9. 95 \times 10^{-3}$	$6. 57 \times 10^{-4}$	$1. 00 \times 10^{-4}$	$2. 27 \times 10^{-5}$
$j = 4$	0. 938	$4. 92 \times 10^{-2}$	$8. 78 \times 10^{-3}$	$2. 58 \times 10^{-3}$	$1. 00 \times 10^{-3}$
$j = 5(NTR)$	0. 060	0. 765	0. 175	0	0
$j = 5(TR)$	0. 331	0. 370	0. 210	0. 063	0. 027

1. 4 地震人员伤亡的动态评估

依据结构震害矩阵 A 、初始人员伤亡矩阵 C 和受困环境 S_i 的分布, 可以确定受困环境 S_i 中, 某一初始伤残状态 c_m 下的人员数 $N(TR_{mi})$. $N(TR_{mi}) = N(TR) \cdot P(c_m) \cdot P(S_i)$, 其中 $N(TR)$ 为受困环境中的人数, $P(c_m)$ 为人员处在 c_m 伤残状态下的概率, $P(S_i)$ 为人员处于受困环境 S_i 下的概率. 当时间从初始时刻 t_0 发展至 $t_k(k = 1, 2, \dots)$ 时刻, 根据式 (1), 伤残状态由 c_{mi} 跃升至 c_{mik} . 如果 t_k 时刻被救人数共为 R_k (R_k 不仅与该地区房屋主要结构类型有关, 而且还与震后救援力量的组织、震前民众的防震意识等有关. 它难以用统一的模式或方法在震前给出). 那么, S_i 受困环境中 c_{mik} 状态下的被救人员数 $R_{mik} = R_k \cdot P(c_m) \cdot P(S_i)$. c_{mik} 相互之间数值上是不同的, 但它必然落入 c_1, c_2, c_3, c_4 和 c_5 中的一个区间. 把其中 c_m 相同的 R_{mik} 相加, 就是震后所有被救人员在 5 种不同伤残状态下的数量分布. 这种相加是依时刻不同而作相应的计算. 表 4 以初始伤残状态 c_2 为例, 给出了相应的计算方法^[5]. 计算步骤. (1) 根

表 4 被救的受困人员伤亡水平分量的动态估计

c_0	c_1	$c_0= c_2$			$P(c_2)$	c_3	...
S_0		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
$P(S_i)$...	$P(S_1)$	$P(S_2)$	$P(S_3)$	$P(S_4)$	$P(S_5)$...
$P(c_m)P(S_i)$		$P(c_2)P(S_1)$	$P(c_2)P(S_2)$	$P(c_2)P(S_3)$	$P(c_2)P(S_4)$	$P(c_2)P(S_5)$	
		$c_{2i}(t)=(C_2^{1/n}+S_t)^n$			$t=t_1-0$		
t_1		c_{211}	c_{221}	c_{231}	c_{241}	c_{251}	
R_1	...	$R_{211}=$	$R_{221}=$	$R_{231}=$	$R_{241}=$	$R_{251}=$...
		$P(c_2)P(S_1)R_1$	$P(c_2)P(S_2)R_1$	$P(c_2)P(S_3)R_1$	$P(c_2)P(S_4)R_1$	$P(c_2)P(S_5)R_1$	
		$c_{2i}(t)=(C_2^{1/n}+S_t)^n$			$t=t_2-0$		
t_2		c_{212}	c_{222}	c_{232}	c_{242}	c_{252}	
R_2	...	$R_{212}=$	$R_{222}=$	$R_{232}=$	$R_{242}=$	$R_{252}=$...
		$P(c_2)P(S_1)R_2$	$P(c_2)P(S_2)R_2$	$P(c_2)P(S_3)R_2$	$P(c_2)P(S_4)R_2$	$P(c_2)P(S_5)R_2$	
t_k							
R_k

据地震烈度确定结构震害矩阵 A , 利用现有震害资料和统计分布确定结构初始人员伤亡概率分布矩阵 C , 则地震发生后结构在初始时刻 t_0 的人员伤亡概率分布矩阵为 $M_0 = A \times c_0$ (2) 根据人员伤亡状态函数 $c(t) = (c_0^{1/n} + S_i t)^n$, 动态分析地震发生后的 t_k 时刻, 结构在某受困环境 S_i 中人员伤亡概率分布矩阵 $M_k = A \times c_k$ 表 4. (3) 设某类结构的人员数为 N , 则其受困人员数为 $N(TR) = N \times TR$. 经汇总分析就可以得到该类结构在某地震作用下, t_k 时刻逃离和被救人员的各伤残状态人数为 $N \times (1 - TR) \times M_0 + \sum N(TR) \times M_k$. 如 7 d 后仍未获救的人员便认为均已死亡. (4) 将各类结构处于相同伤残等级的人员数相加, 这样统计便可得到某地区在某地震作用下人员伤亡的情况.

2 应用实例

1996 年 2 月 3 日晚, 云南丽江与中甸县交界处(北纬 $27^{\circ}18'$, 东经 $100^{\circ}13'$) 发生了里氏 7.0 级地震^[6,7]. 房屋震害情况, 如表 5 所示. 表中 S 代表面积, η 代表比例. 按上述方法, 可以分析计算出丽江地震后 5 天内, 丽江县城的地震人员伤亡动态评估汇总结果, 如表 6 所示. 表中人员统计按 98% 在室率计.

算. 从表中的比较可知, 计算与实际统计结果基本相符. 因此, 进行地震人员伤亡预测时采用动态评估法, 可以更加合理地预测地震中人员伤亡的数量.

表 5 钢筋砼房屋震害指数(122 幢)

统计源	项目	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	合计	平均震害指数
122 幢 钢筋砼房	s/m^2	105 243	42 549	25 148	5 953	0.0	178 893	0.127
	$\eta/(%)$	58.83	23.78	14.06	3.33	0.0	100	
216 幢 砌体结构房	s/m^2	97 410	33 440	14 940	7 900	2 260	155 950	0.132
	$\eta/(%)$	62.46	21.44	9.58	5.07	1.45	100	
216 幢 老旧民房	s/m^2	11 090	2 910	5 350	1 750	730	21 830	0.21
	$\eta/(%)$	50.80	13.33	24.51	8.02	3.34	100	

表 6 丽江地震人员伤亡动态评估汇总结果

项 目	伤亡状态/ 人				
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$
$j=1\sim 4$	984 273	9 829	644	95	21
$j=5$ (人员非受困)	326	3364	777	0	0
$j=5$ (人员受困)	5 761	5 856	2 990	868	361
计算汇总 101.516 5 万人	990 630	19 049	4 411	963	382
实际统计 106.91 万人	$1.054\ 5\times 10^6$	10 573		3 706	311

3 结 束 语

(1) 地震人员伤亡是受多个因素影响的动态可变过程, 它有别于结构破坏. 因此, 采用动态评估法更符合实际情况. (2) 本文对 1996 年丽江地震人员伤亡的动态估计, 与实际统计结果基本相符. 这说明本文采用的动态评估法可以用于预测地震中人员伤亡的数量. (3) 随着实际震害资料的积累, 可进一步确定动态评估模型中的参数选择方法和范围.

参 考 文 献

1 邹其嘉, 毛国敏. 地震人员伤亡易损性研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 14(3): 60~ 68

2 赵振东, 李 杰. 地震人员伤亡指数与人员伤亡状态函数[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 98~ 105

3 程家喻, 杨 哲. 唐山地震人员伤亡率与房屋倒塌率的相关分析[J]. 地震地质, 1993, 15(1): 28~ 34

4 方开泰, 许建伦. 统计分布[M]. 北京: 统计出版社, 1987. 89~ 90

5 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

6 潘 文, 叶燎原. 1996 年丽江 7.0 级地震县城现代房屋震害指数评定[J]. 工程抗震, 1998, (2): 37~ 39

7 云南省统计局编. 云南统计年鉴 1997[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997. 91~ 93

Dynamic Assessment of Seismic Casualties

Zhou Suqin Guo Zixiong

(College of Civil Eng. , Huaqiao Univ. , 362011, Quanzhou, China)

Abstract A concept of initial casualty matrix was led into the assessment of seismic casualties; and the initial casulty matrix of old folk house and masonry structure and RC frame structure were detemined. Considering such factors as state of initial casualties, trapped environment, trapped time and physical status of casualties, a method was fomed for dynamically asseseing seismic casualties; and had been used for evaluating the casualties caused by 1996 Lijiang earthquake. A comparison between post earthquake statistics and analytir cal results indicates good agreement. **Keywords** earthquake, casualty matrix, dynamic assessment, initial casualty