

文章编号: 1005-0523(2010)01-0006-06

基于层次分析法的城市交通系统抗灾风险分析

潘晓东¹, 隋永芹^{1,2}

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 苏州科技学院 土木工程系, 江苏 苏州 215011)

摘要: 现代化城市中各种重大突发灾害事件时有发生。为了提高城市交通系统抗灾变风险能力,以层次分析法(AHP)为基础,根据城市交通系统功能特点,分析了当前城市交通系统抗灾变风险因素,从人员因素、抗灾救灾设施设备、道路交通运输和组织管理等方面,选定14个因素作为其风险评价指标,构建了城市交通系统抗灾变风险因素的层次分析模型,得出了各评价指标的合成权重;并按各项因素指标对总风险影响大小进行了排序,分析了城市交通系统抗灾变最为关键的因素。分析结果表明:道路交通设施是影响城市交通系统灾变风险的首要因素,提出注重道路交通建设是降低抗灾变风险的重要举措。

关键词: 交通运输工程; 风险分析; 层次分析法; 城市交通系统; 重大灾害事件

中图分类号: U121

文献标识码: A

城市经济迅速发展和城市化进程加快的同时,很多城市面临的灾害形势却日益严重,因自然因素、人为因素等造成的突发性重大灾害事件的发生不仅造成生命财产的巨大损失,而且还会影响社会稳定,甚至危及国家安全,对经济社会发展全局产生重大影响^[1],同时也对城市交通系统造成不同程度的破坏。而城市交通系统贯穿于整个城市,是向灾区运送紧急救援人员与物资的重要设施,是灾区救援和急需修复的交通生命线,交通阻断造成的救援延误会引起更为惨重的引发损失。因此,城市交通系统的抗灾变水平直接关系到能否对各种突发性事件进行有效控制,使损失最小化,避免灾难扩大,加强城市交通系统抗灾变风险分析是形势发展变化的迫切需要,也是我国目前城市交通系统建设所面临的重要课题。

AHP层次分析法通过一定模式使决策思维过程规范化,具有分析思路清晰,能将复杂的思维过程系统化、数学化和模型化的优点^[2]。采用层次分析法对城市交通系统抗灾变风险进行研究,对影响城市交通系统抗灾变因素进行定量分析,为城市交通系统降低灾变风险提供决策依据。

1 城市交通系统抗灾变风险因素分析

城市交通抗灾变系统是包含各种交通土建工程、交通运输工具、救援避难设施以及与之相应的组织管理等多学科、多专业、多风险因素于一体的复杂体系。其灾害风险形成的原因是多方面的,文章从硬件设施和软件环境两大方面对风险因素进行分析研究,主要从人员、灾害救援设施设备、道路交通网络和组织管理体系等方面建立风险评价分析指标。

1.1 影响因素分析

1.1.1 硬件设施

重大突发性灾害对城市交通系统中道路、桥梁、救援避难设施等工程硬件设施破坏严重。如,2008年罕见的特大低温雪凝灾害袭击了我国中南部十多个省、市,波及21个省、市、区,持续低温雨雪冰冻极端天气造成了道路结冰、道路堵塞等现象;在2008年的汶川地震中,灾区随处可见的滑坡和崩塌、大规模的断层错动以及强地面运动,对交通系统造成了毁灭性的打击,严重阻碍了震后救援^[3]。

1.1.2 软件环境

相对硬件设施因素而言,软件环境包含的内容更为丰富^[4]。其中与城市交通系统抗灾相关的灾害管

收稿日期: 2009-09-08

作者简介: 潘晓东(1960-),男,博士,教授,研究方向为道路交通安全与环境管理、交通工效学及应用技术、道路交通规划设计。

理体制、技术立法、道路交通组织管理等构成了城市交通系统的抗灾变软件体系。有效的软件体系能够加强公众的安全文化、法制教育,提高公众的防灾减灾意识;并通过普及防灾减灾的基本知识,使公众掌握各种应急自救方法,消除对灾害的恐惧感,提高个人的灾害应急能力,实现从灾后的反应文化向灾前预防文化的转变。

1.2 风险分析指标

1.2.1 人员因素

城市交通抗灾变系统中涉及的人员有救援决策人员、救援执行人员^[9]和受灾群众。救援决策人员和救援执行人员通过有机组织和管理,形成了救援组织管理的主体,起到救援主导的作用,而受灾群众则是灾害事件中的直接关系人,其灾害时的心理、生理行为直接影响抗灾救灾效果,对抗灾救灾工作的开展有很大影响。

1.2.2 抗灾设施设备

城市交通系统中抗灾救灾设施主要由救援设施设备和避难场所两部分组成。救援设施包括救援车辆及装备、救援物资的接受与分配、消防和医疗救护等方面。另外,当城市发生重大突发事件时,应该能及时将受灾居民疏散到用于民众躲避危险地区的应急避难所,这是城市应对重大突发事件、减小人员伤亡和财产损失的重要措施之一^[9]。

1.2.3 道路交通网络系统

城市道路交通系统是城市生命线系统的主动脉,是保障城市其他生命线的紧急修复和城市各项基本功能正常运转的交通生命线,在生命线工程中处于“生命线中的生命线”地位。城市道路网络是由道路桥梁等交通基础设施组成,是应急救援的载体。城市一旦发生突发事件,道路交通网络是人员疏散、救援人员施救及物资运送的通道,是生死攸关的生命线之一。而城市道路桥梁等基础设施的好坏直接影响到救援路网的通达性,反映道路交通供需情况的交通网络直接关系到救灾的效率。诸多实例表明,很多大地震中救援工作迟缓的一个主要原因就是交通系统的瘫痪。因此,道路交通网络的抗灾性能好坏,对于保证救灾救护和物资运输的高效性非常重要。

1.2.4 组织管理

城市是一个社会、经济、科技、文化等方面高度集中的综合性开放系统,管理是一个庞大的社会系统工程,需要多部门多机构以及多资源参与协作。城市交通抗灾组织管理系统包括组织机构和模式,法规、预警机制、应急预案等环节,是影响城市交通系统抗灾变的重要软件环境因素。灾害发生时,仅仅依靠其中某一个或几个环节来提高救援工作是不可行的,必须形成比较科学的组织机构和管理体制,使整个城市交通抗灾管理系统有机地运行起来。

2 城市交通系统抗灾变风险分析

2.1 层次分析法基本原理与步骤

层次分析法(AHP)是由美国运筹学教授T. L. Saaty提出的一种系统分析方法^[9]。它把一个复杂问题中的各种因素通过划分互相联系的有序层次使之条理化,根据对一定客观现实的判断,就每一层次的相对重要性给予定量表示,利用数学方法确定表示每一层次的全部元素的相对重要性次序的数值,并通过排序结果分析和解决问题^[9]。

层次分析法解决问题的基本思路^[9]:

- (1) 把系统各因素之间的隶属关系由高到低排成若干层次,分析系统中各因素的关系,建立系统的递阶层次结构;
- (2) 根据判断,就每一层次的因素的相对重要度给予定量表示;
- (3) 利用数学方法确定每一层次全部因素的相对重要程度值;
- (4) 通过排序问题进行分析和决策。

2.2 明确问题,建立层次结构模型

根据城市交通系统抗灾变影响因素分析,提出将人员、抗灾救援设施设备、道路交通系统和组织管理系统 4 个因素作为准则层,将救灾决策人员、救灾执行人员、受灾群众、救灾车辆、救援物资、消防医护设施、避难设施、道路桥梁基础设施、道路网络结构、交通网络运营结构、政府组织机构、抗灾救灾相关法律法规、预警机制和应急预案等 14 个因素作为因素层,按 3 层建立递阶层次结构模型图,如图 1 所示。

2.3 构造判断矩阵

从层次结构的方案开始,将隶属于同一指标的各指标之间的相对重要性进行比较,形成判断矩阵。一般地,隶属于指标 A 的指标 $B_j (j=1,2,\cdots,n)$ 的判断矩阵为

$$B = (b_{ij})_{n \times n}, \quad i, j = 1, 2, \cdots, n \quad (1)$$

B_{ij} 表示在隶属于 A 的诸指标中,指标 i 与指标 j 相比的重要程度,采用 Saaty 提出的 1~9 比率标度法(见表 1)^[8]。文章采用专家评价方法确定了各指标的重要程度,目标层 A 到准则层 B_j 及 $B_j \sim C_i$ 层的判断矩阵分别见表 2~6。

表 1 判断矩阵标度及含义

标度	含义
1	B_i 和 B_j 同等重要
3	B_i 比 B_j 稍微重要
5	B_i 比 B_j 明显重要
7	B_i 比 B_j 强烈重要
9	B_i 比 B_j 极端重要
倒数	$B_{ji} = 1/B_{ij}$ (与上述说明相反)
2,4,6,8	重要程度介于上述奇数之间

表 3 $B_1 \sim C_i$ 层判断矩阵及指标权重计算

B_1	C_1	C_2	C_3	权重 W
C_1	1	2	4	0.558
C_2	1/2	1	3	0.320
C_3	1/4	1/3	1	0.122
一致性检验	$\lambda_{\max} = 3.018, C_1 = 0.009, R_1 = 0.52, C_R = 0.018 < 0.1$ 。通过一致性检验。			

表 5 $B_3 \sim C_i$ 层判断矩阵及指标权重计算

B_3	C_8	C_9	C_{10}	权重 W
C_8	1	2	2	0.500
C_9	1/2	1	1	0.250
C_{10}	1/2	1	1	0.250
一致性检验	$\lambda_{\max} = 3.00, C_1 = 0.00, R_1 = 0.52, C_R = 0.00 < 0.1$ 。通过一致性检验。			

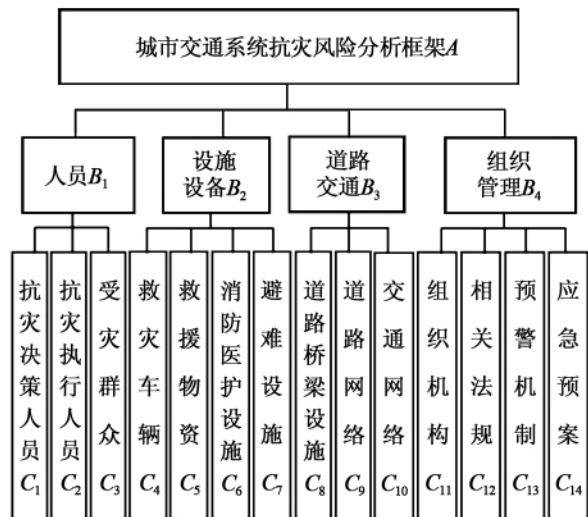


图 1 城市交通系统抗灾风险评价层次结构图

表 2 $A \sim B_j$ 层判断矩阵及指标权重计算

A	B_1	B_2	B_3	B_4	权重 W
B_1	1	1/5	1/9	1/3	0.053
B_2	5	1	1/3	3	0.270
B_3	9	3	1	3	0.541
B_4	3	1/3	1/3	1	0.137
一致性检验	$\lambda_{\max} = 4.115, C_1 = 0.038, R_1 = 0.89, C_R = 0.042 < 0.1$ 。通过一致性检验。				

表 4 $B_2 \sim C_i$ 层判断矩阵及指标权重计算

B_2	C_4	C_5	C_6	C_7	权重 W
C_4	1	2	3	5	0.483
C_5	1/2	1	2	3	0.271
C_6	1/3	1/2	1	2	0.156
C_7	1/5	1/3	1/2	1	0.088
一致性检验	$\lambda_{\max} = 4.0145, C_1 = 0.005, R_1 = 0.89, C_R = 0.005 < 0.1$ 。通过一致性检验。				

表 6 $B_4 \sim C_i$ 层判断矩阵及指标权重计算

B_4	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	权重 W
C_{11}	1	2	1/5	1/5	0.093
C_{12}	1/2	1	1/7	1/7	0.055
C_{13}	5	7	1	1	0.425
C_{14}	5	7	1	1	0.425
一致性检验	$\lambda_{\max} = 4.015, C_1 = 0.005, R_1 = 0.89, C_R = 0.005 < 0.1$ 。通过一致性检验。				

2.4 权重计算及一致性(相容性)检验

针对上述判断矩阵,按需要将本层所有元素排出优劣顺序。采用科学实用的“方根法”计算被比较元素对于选定准则的相对权重,依据权重值进行单排序。

以 $A \sim B_j$ 为例,对给定的判断矩阵 B ,令

$$\omega_{bi} = \frac{(\prod_{j=1}^4 a_{ij})^{\frac{1}{4}}}{\sum_{k=1}^4 (\prod_{j=1}^4 a_{kj})^{\frac{1}{4}}}, \quad i, j, k = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

并以

$$W_B = (\omega_{b1}, \omega_{b2}, \omega_{b3}, \omega_{b4})^T = (0.053, 0.270, 0.541, 0.137)^T \quad (3)$$

作为权重向量。

为进行判断矩阵的一致性检验,计算一致性比率 C_R

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} = 0.038 / 0.89 = 0.042 \quad (4)$$

当 $C_R < 0.10$ 时,认为具有满意的一致性。

其中一致性指标:

$$C_I = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} = (4.115 - 4) / 3 = 0.038 \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; n 为成对比较因子的个数; R_I 为平均随机一致性指标(见表7)。

$A \sim B_j$ 层的一致性检验结果见表2。

同理,计算 $B_j \sim C_i$ 层次因素矩阵权重一致性检验指标,结果见表3~6,其 C_R 皆小于0.1,每个判断矩阵的一致性都满足要求。

从表2计算结果看,在城市交通系统抗灾变风险分析的各因素中,道路交通系统(0.541)是首要因素,其次是设施设备(0.270)和组织管理(0.137),人员因素(0.053)排在最后,应该注重道路交通系统的建设。

2.5 合成权重计算及一致性检验

对同一层次中所有层次单排序的基础上,可以计算出 C_i 层次对 A 层次重要性的合成权重值,进行总层次总排序。该过程是从最高层次到最低层次逐层进行,即利用层次单排序的结果,综合对更上一层的优劣顺序。

设 B_j 层次对 A 层次单排序值的权重向量为 W_B , C_i 层次中的因素对 B_j 层次中各元素的单排序权重向量为

$$C = (c_{ij}), i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

则 C_i 层次中各元素对 A 层次各因素合成权重排序为,

$$W = W_B \cdot C = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$$

其中

$$\omega_i = \sum_{j=1}^4 \omega_{bj} c_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, 14 \quad (7)$$

总排序随机一致性比率检验

$$C_R = \frac{\sum_{j=1}^4 C_{ij} w_{bj}}{\sum_{j=1}^4 R_{ij} w_{bj}} = \frac{(0.009, 0.005, 0.005, 0.005) (0.053, 0.270, 0.541, 0.137)}{(0.58, 0.96, 0.58, 0.96) (0.053, 0.270, 0.541, 0.137)} = 0.003 \quad (8)$$

当 $C_R = 0.003 < 0.1$ 时,总排序结果具有满意一致性。

表7 随机一致性指标 R_I 的取值

n	R_I
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41
9	1.46

城市交通抗灾害系统影响因素合成权重及层次总排序计算结果如表 8 所示。

表 8 指标合成权重

B	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
$B_1 = 0.053$	0.558	0.320	0.122											
$B_2 = 0.270$				0.483	0.272	0.157	0.088							
$B_3 = 0.517$								0.500	0.250	0.250				
$B_4 = 0.137$											0.093	0.056	0.426	0.426
合成权重	0.030	0.017	0.006	0.130	0.073	0.042	0.024	0.270	0.135	0.135	0.013	0.008	0.058	0.058

注: B_j, C_i 层因素名称见图 1。

从表 8 可以看出, 14 个主要影响因素由大到小排序为: 道路桥梁设施 C_8 、道路网络 C_9 、交通网络 C_{10} 、救灾车辆 C_4 、救援物资 C_5 、预警机制 C_{13} 、应急预案 C_{14} 、消防医护设施 C_6 、救灾决策人员 C_1 、避难设施 C_7 、执行人员 C_2 、组织结构 C_{11} 、相关法规 C_{12} 、受灾群众 C_3 。该排序基本上反映出城市交通系统抗灾害风险各因素的重要程度。

上述分析说明, 若要增加城市交通系统抗灾, 要想减少事故发生的概率, 首先要注重道路交通网络的建设, 特别是保证道路桥梁基础设施建设, 保障通达的交通要道, 注重救灾设施的建设。

3 结语

重大突发性灾害事件对城市破坏性较大, 灾害下城市交通系统是城市抗灾救援的重要载体。文章利用层次分析方法对城市交通系统抗灾变风险进行了分析, 具有一定的实用价值。然而层次分析方法的关键是因素分析以及专家判断的可靠性, 并且 AHP 方法本身也具有一定的局限性, 评价指标体系以及判断矩阵也还有待进一步完善。其评价结论的可信度受到一定影响。在实际运用中, 城市交通系统是一项复杂的系统工程, 要想更好地评价影响因素, 不应局限于某种特定的方法, 应该采用加速遗传算法、神经网络算法等与 AHP 模型结合的多种方法, 提高计算精度, 以得到更加合理准确的评价。

参考文献:

- [1] 李志伟. 基于 AHP 法与 BP 神经网络的应急物流风险评估与预测模型 [J]. 物流技术, 2008, 27(9): 75-77.
- [2] 宋洪涛, 张力, 王以群, 廉士乾. 用层次分析法分析核电站中影响人误的组织因素 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 32-36.
- [3] 刘爱文, 夏珊, 徐超. 汶川地震交通系统震害及震后抢修 [J]. 震灾防御技术, 2008, 3(3): 243-250.
- [4] 尤建新, 陈桂香, 陈强. 城市生命线系统的非工程防灾减灾 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 194-198.
- [5] 彭春露. 城市突发事件紧急救援管理可靠性问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006: 58.
- [6] 黄典剑, 吴宗之, 蔡嗣经, 蒋仲安. 城市应急避难所的应急适应能力——基于层次分析法的评价方法 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 52-58.
- [7] 彭祖赠, 孙毓玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 90.
- [8] 沈群, 黄晓明, 卞凤兰. 基于层次分析法的收费公路债务风险评价 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(1): 154-157.
- [9] 陈水利, 李敬功. 模糊集理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 242.

Risk Analysis on Disaster Resistance of Urban Transportation System Based on Analytical Hierarchy Process

Pan Xiaodong¹, Sui Yongqin^{1,2}

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Various unexpected disasters often occur in modern cities. In order to improve capabilities of disaster resistance, based on the analytic hierarchy process (AHP), according to the characteristics of urban transportation systems, risk factors of disaster resistance are analyzed. 14 assessment indexes are selected as risk assessing indicator in terms of human factors, disaster relief equipment and facilities, road transportation system, and organizational management. Then, AHP model of disaster-resistant factors is designed, which achieves integrated weight of evaluation indexes. The various factors are ranked based on the risk degree, and several key factors for the systems are studied. Analyzing results indicate that the main factors affecting the disaster resistance of urban transportation systems are facilities of road and traffic. Therefore, strengthening their construction is important measures to reduce hazards in cities.

Key words: transportation engineering; risk analysis; analytical hierarchy process (AHP); urban transportation system; tremendous disaster

(责任编辑 刘棉玲 吴泽九)