

上海虹桥综合交通枢纽工程的灾害识别与评估^{*}

周红波¹, 高文杰¹, 刘成清²

(1. 上海市建科建设监理咨询有限公司, 上海 200032; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 综合利用历史记录法、成因分析法、预测法等灾害识别技术对上海虹桥综合交通枢纽工程的各种灾害及其因素进行初步识别, 确定虹桥枢纽可能遭受的灾害种类。再利用故障树方法对确定的各灾害进行作用机理分析, 最终确定虹桥枢纽的灾害清单。针对上海虹桥综合枢纽工程的复杂性和灾害的随机性、模糊性, 以及在运营时出现的一些灾害难以用非常准确的量化数据加以表达的特点, 将模糊综合评判法应用到交通枢纽工程的灾害等级评估中来。在国际隧道协会制定的灾害等级表的基础上, 建立灾害等级隶属函数, 使评价结果尽可能与国际标准接轨。

关键词: 上海虹桥; 交通枢纽工程; 灾害识别; 地震灾害故障树; 模糊综合评判法; 隶属函数; 灾害评估

中图分类号: X4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)02-0016-05

0 引言

上海虹桥综合交通枢纽是包括城际铁路、高速铁路、轨道交通、长途客运、市内公交等多种换乘方式于一体的交通“巨无霸”, 是将来上海最大的交通枢纽站, 具有重大示范效应和经济效应。因此, 展开防灾研究力求避免灾害发生或确保灾害发生时枢纽处于安全状态是十分必要的。

虹桥枢纽灾害识别与评估研究的成果能够指出枢纽的敏感灾害以及可能发生的严重程度等级, 有助于管理方在制定相关灾害应对措施时“有的放矢”, 从而能够利用有限的资源发挥最大的防灾救灾功能。针对其进行的灾害识别与评估工作, 能够为其他类似工程项目提供借鉴和参考。

1 灾害识别

1.1 灾害识别方法

人类与灾害斗争几千年, 不仅积累了丰富的防治灾害的实践经验, 而且摸索出了一套灾害研究的理论方法, 其中灾害识别的方法有历史记录法、成因分析法、预测法、故障树方法等。

1.1.1 历史记录法

通过查阅区域地方志可了解当地历史上的主要

灾害类型, 再根据区域开发活动的现状来分析历史灾害在当前条件下发生的可能性及其可能损失。

1.1.2 成因分析法

分析灾害发生原因, 找出其发生的规律, 从而揭示出灾害发生的可能性及时空分布。在对上海龙卷风的研究中发现: 龙卷风往往在气旋倒槽向陆上输送暖气、北方有冷空气南下的条件下发生; 龙卷风大多集中在金山与浙江交界处到松江南部南汇和浦东新区结合部至崇明岛东部一条由西向东北走向宽约30 km的地带; 龙卷风一般发生于中午至傍晚之间。地震与地质构造有关, 在上海有北东向的嘉兴上海断裂和北西向的江心州奉承断裂, 通过这两条断裂的交汇处是地震发生的危险地带。

1.1.3 预测法

根据区域的地理位置、自然条件来预测未来可能发生的灾害也是灾害识别的一种方法。

1.1.4 故障树方法

故障树分析(Fault Tree Analysis, 简称FTA)是综合识别和度量风险的有力工具, 由美国贝尔电话实验室的Watson和Meams等人, 于1961-1962年期间在分析和预测民兵导弹发射控制系统安全性时, 首先提出并采用的分析方法。该方法把所关心的结果事件作为顶事件, 用规定逻辑符号表示, 找出导致这一结果事件所有发生的直接因素

^{*} 收稿日期: 2008-06-14

基金项目: 上海市科委科研项目课题“上海虹桥综合交通枢纽防灾关键技术研究与应用”(08201201900)

作者简介: 周红波(1972-), 男, 湖北人, 博士, 高级工程师, 总工程师, 主要从事工程建设监理、项目管理、风险管理研究。

E-mail: zhouhongbo@online.sh

和原因,并处于过渡的中间事件,由此深入分析,直至找出事故基本事件为止。其步骤如下:①选择合理的顶事件,这是成功与否的关键;②收集技术资料,建造故障树;③对故障树进行简化;③对故障树进行定性或定量分析。

结合上海市主要灾害类型及各交通模式的易发灾害类型,可以看出虹桥枢纽可能遭受的主要自然灾害为水灾、风灾、火灾、地震,另外由于其对上海市及整个长江三角洲地区的重要辐射作用,容易成为恐怖袭击目标,所以虹桥枢纽的恐怖袭击灾害也是我们研究的重点之一。

2 灾害评估模型

在初步识别的基础上,采用故障树方法,对虹桥枢纽5类灾害进行分析,最后形成灾害评估模型——灾害树。灾害树的顶事件为虹桥枢纽灾害,下分5个具体灾害事件,它们呈现“或”的关系,灾害事件按照建筑单体划分(图1)。

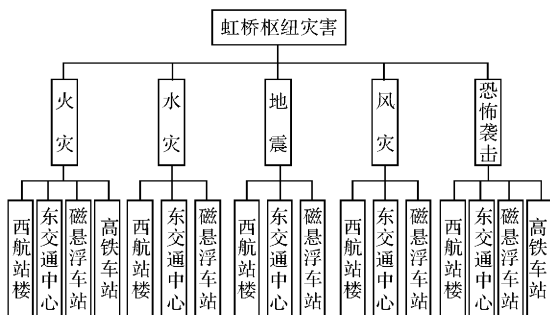


图1 虹桥枢纽灾害树

对灾害产生部位和原因分析,分析出各种灾害故障树,例如枢纽的西航站楼地震灾害故障数如图2。

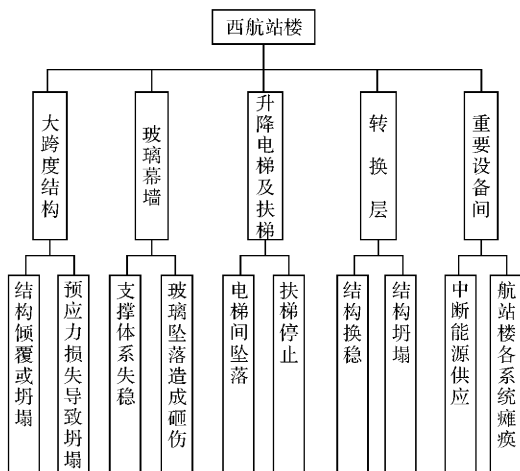


图2 西航站楼灾害树

3 灾害评估

虹桥枢纽工程的灾害采用模糊综合评价方法进行评估,该方法是将评价指标的隶属度与权重进行模糊运算使计算结果更加客观。

3.1 评价指标权重的确定

权重的确定是采用层次分析法(AHP),该方法是把同级各个因子两两相互比较(包括因子自身比较),按比较重要性大小在一个9标度表(表1)中进行仿数量化,各因子数量值构成一个“构造判断矩阵”,该矩阵在一致性检验后,其最大特征值对应的向量为对应各因子的权重向量,具体计算过程可参考文献[1~2]。

表1 9标度各因子重要性大小比较
仿数量化表

标度	两两因子重要性比较的结果说明
1	i 因子与 j 因子完全一样重要,或 i 与 j , j 与 j 自身比较
3	i 因子比 j 因子稍微重要一点
5	i 因子比 j 因子明显重要
7	i 因子比 j 因子重要得多
9	i 因子比 j 因子极为重要
2、4、6、8	两两因子重要性比较介于上述标度两值之间
倒数	上述重要性相反情况,即 j 比 i 重要的情况

3.2 风险等级隶属度的确定

风险事件对于风险等级的隶属度的计算首先是采用专家打分法来确定各风险事件的影响后果 C 的估值及发生概率 P 的估值,将 P 与 C 的乘积带入风险事件对于风险等级的隶属函数,便可得到风险事件对于风险水平的隶属度。

3.2.1 确定风险事件的影响后果 C [3]

根据盾构掘进施工的实际情况确定风险事件的影响后果,估值方法如表2所示。

表2 风险影响后果的估算方法

程度	估值	说明
轻微	1	风险不导致明显损失
中等	2	风险导致少量损失(10万元以内)
严重	3	风险导致可补偿损失(100万元以内)
重大	4	风险导致相当大并可补偿损失(1000万元以内)
灾难性	5	风险导致不可补偿损失(1000万元以上)

3.2.2 确定风险事件影响后果对应的概率 P

灾害发生概率分为5个等级,估算方法如表3所示。

表 3 风险发生概率的估算方法

概率	估值	发生频率	说明
罕见的	1	<0.000 3	灾害极难出现一次
偶见的	2	0.000 3~0.003	灾害不大会出现
可能的	3	0.003~0.03	灾害可能会出现
预期的	4	0.03~0.3	灾害会不止一次的发生
频繁的	5	>0.3	灾害会频繁发生

3.2.3 隶属度的计算

首先是隶属函数的确定^[4-6]。如果建立了灾害损失等级模糊集的隶属函数,则已知某一灾害损失估值和概率估值,可以计算出该灾害相对于各个灾度等级模糊集的隶属度,从而可以根据最大隶属度原则确定该灾害损失所属的模糊灾度概念等级。

灾度等级水平分为 5 个等级,其隶属函数 $r_{ij}(x)$ 如表 4 和图 3 所示。

表 4 隶属函数表达式

灾害等级	隶属函数
1 级	$r_{11} = \begin{cases} 1, & 0 < x \leq 2 \\ 3 - x, & 2 < x \leq 3 \\ 0, & x > 3 \end{cases}$
2 级	$r_{12} = \begin{cases} x - 2, & 2 \leq x < 3 \\ 1, & 3 \leq x \leq 4 \\ 5 - x, & 4 < x \leq 5 \\ x - 5, & 5 < x \leq 6 \\ \frac{8 - x}{2}, & 6 < x \leq 8 \\ 0, & x < 2 \text{ 或 } x > 8 \end{cases}$
3 级	$r_{13} = \begin{cases} x - 4, & 4 \leq x < 5 \\ 6 - x, & 5 \leq x < 6 \\ \frac{x - 6}{2}, & 6 \leq x < 8 \\ 1, & 8 \leq x \leq 12 \\ \frac{15 - x}{3}, & 12 < x \leq 15 \\ 0, & x < 4 \text{ 或 } x > 15 \end{cases}$
4 级	$r_{14} = \begin{cases} \frac{x - 12}{3}, & 12 \leq x < 15 \\ 1, & 15 \leq x \leq 20 \\ \frac{25 - x}{5}, & 20 \leq x < 25 \\ 0, & x < 12 \end{cases}$
5 级	$r_{15} = \begin{cases} \frac{x - 20}{5}, & 20 \leq x \leq 25 \\ 0, & x < 20 \end{cases}$

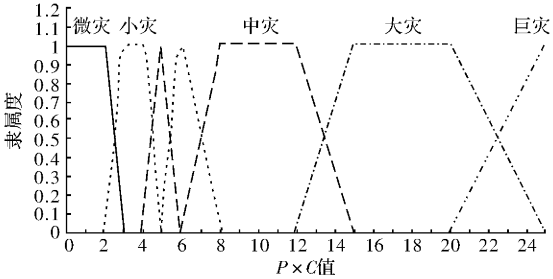


图 3 隶属函数图

4 灾害等级计算结果

4.1 灾害等级划分标准

不同的场所发生同样的灾害所产生的损失是不同的。目前,国内外对于单灾种的等级划分相对成熟,我国也颁布了相关的灾害等级划分标准。但是各灾种统一的等级划分尚未成型。统一的灾害等级划分标准能够给防灾减灾工程带来诸多便利,是提高防灾抗灾效率的一个环节,是提高组织水平和科学水平的一个表现,对政府管理人员、群众和专业人员都有很多方便。

灾害损失等级研究的主要目的是为了给公众一个灾情大小的概念,以便更好地进行灾情评估和分级管理。为此,所建立的灾害损失等级必须符合下列三条原则。

- (1) 可比性 即不同时间、不同地点、不同种类的灾害之间的灾情大小都能够进行比较。
- (2) 可操作性 即选用的因子(指标)能够较快、较易地取得,以便确定灾害等级,及时地指导抗灾救灾工作;
- (3) 可传递性 即建立的灾害等级必须简单易记,从而使灾情信息能够在普通百姓中互相传递。

我国学者马宗晋等结合我国具体国情,作出了相对成熟的研究,以其领衔的国家科委国家计委国家经贸委自然灾害综合研究组,建议采用灾度的概念划分灾情的大小。

本文借鉴“灾度”的概念,按照上述三原则确定“灾度”的三个衡量指标:死亡人数、重伤人数、经济损失。考虑到虹桥枢纽为一区域性工程,管理方要落实具体的防灾工作,同时在进行理论分析时,国际通行的概率评估标准和损失评估标准皆为五级,故本文结合实际情况,将原国家灾害损失等级增加一级,最终形式见表 5。

表 5 虹桥枢纽灾害损失等级划分标准

损失等级	估值	损失		
		死亡人数 d/人	重伤人数 g/人	经济损失 e/万元
巨灾	5	[30, +∞)	[100, +∞)	[10 000, +∞)
大灾	4	[20, 30)	[75, 100)	[7 500, 10 000)
中灾	3	[10, 20)	[50, 75)	[5 000, 7 500)
小灾	2	[3, 10)	[10, 50)	[1 000, 5 000)
微灾	1	(0, 3)	(0, 10)	(0, 1 000)

4.2 灾害概率评估标准

根据国内外资料,灾害概率的评估主要依靠经验来估算,目前常用的方法是历史资料统计法和专家经验法。国际上目前通常采用专家调查法来确定灾害事件发生的概率,把专家对某一事件可能出现的定性判断转化为可能出现的定量概率。国际上已有几种经验供参考,Steven G. Vick 和 J. Barneich 分别在 1992 和 1996 年提出了事件发生概率的定性描述和定量概率之间的转换关系表,后来美国垦务局于 1999 年,澳大利亚 2003 的风险评价导则提出了修正的转换关系表。国际隧协也提出了相应的概率估算表(表 6)。

表 6 发生概率的估算方法(国际隧协)

概率	估值	发生频率	说明
罕见的	1	<0.000 3	极难出现一次
偶见的	2	0.000 3 ~ 0.003	不大可能会出现
可能的	3	0.003 ~ 0.03	可能会出现
预期的	4	0.03 ~ 0.3	不止一次的发生
频繁的	5	>0.3	频繁发生

与其他估算方法相比,国际隧道协会给出的估算方法经过众多专家学者的引用验证效果良好,而且其给出了具体的估算方法,为后续的评估工作提供了便利,所以本文采用国际隧协的方法对灾害概率进行评估。

4.3 灾害风险评估标准

根据确定的灾害损失等级及概率评估标准,可以得到虹桥枢纽灾害损失 5 个指标等级划分标准(表 7)。

表 7 灾害损失等级划分标准

概率	灾害损失等级				
	5	4	3	2	1
5	5 级	4 级	4 级	3 级	3 级
4	4 级	4 级	3 级	3 级	2 级
3	4 级	3 级	3 级	2 级	2 级
2	3 级	3 级	2 级	2 级	1 级
1	3 级	2 级	2 级	1 级	1 级

5 级:灾害水平最高的等级,灾害后果是灾难

性的,并造成恶劣的国内外影响。

4 级:灾害水平很高的等级,灾害后果很严重,导致枢纽大面积停运,经济损失巨大。

3 级:灾害水平较高的等级,灾害后果较严重,灾害事故后果可以控制在一定范围内,对枢纽正常运营产生严重影响。

2 级:灾害水平较低的等级,灾害后果可以控制在一定范围内,对枢纽正常运营有一定影响。

1 级:灾害水平最低的等级,灾害后果基本可以控制,对枢纽运营影响不大。

4.4 灾害等级计算

采用前面介绍的评估方法对各灾害事件进行计算,首先通过专家打分来确定灾害事件的影响后果 C (包括 3 个指标,分别是死亡人数 C_1 、重伤人数 C_2 、经济损失 C_3 和 C 对应的概率 P ,将 $R_i = P \times C_j$ 值代入隶属函数,可得到各个灾害事件对灾害等级的隶属向量,然后根据最大隶属度原则,确定灾害事件的灾度等级。

然后对上一层“灾害部位”的隶属度确定,即运用 9 标度法进行两两比较,得到判断矩阵,该矩阵通过一致性检验后得到各个事件的权重向量,用 W_i 表示;如评价结果 $R' = W_i \times R_i$,为一正实数,将其代入隶属函数,然后根据最大隶属原则,则可以确定上一层“灾害部位”事件的灾害等级。

上述步骤得到的最终结果是灾害事件相对于不同的 3 个灾害损失指标的灾害等级,根据“从大原则”,对于同一个灾害事件其综合灾害等级应取对应 3 个指标的灾害等级的最高级(表 8)。

表 8 虹桥枢纽灾害等级

灾害种类	灾害等级				虹桥枢纽灾害等级			
	死亡人数等级	重伤人数等级	经济损失等级	综合等级	死亡人数等级	重伤人数等级	经济损失等级	综合等级
火灾	2	4	2	4				
水灾	2	2	3	3				
风灾	2	1	2	2	2	4	3	4
恐怖袭击	2	4	3	4				
地震	2	2	2	2				

5 结论

虹桥枢纽整体灾害等级为 4 级,这与国家及上海市对该工程的重视程度密切相关,课题组对工程相关单位人员进行了书面调研,其中施工一线人员占有很大的比例,但是反馈信息表明,无论是现场施工人员还是设计、管理人员都对虹桥枢纽整体防

灾水平有很高的评价, 经过课题组对收集数据分析计算, 其结果可以说与现场情况相符合。

有些局部区域不可避免存在高等级的灾害隐患, 本文将该区域或隐患称为“敏感带”。根据计算结果, 可以得到所有敏感带。例如, 虹桥枢纽整体建成后将成为功能齐全、设备先进的上海市又一现代化机场, 油是一种燃点很低的可燃物, 如周边有一点火源就可能起火燃烧, 酿成火灾。火灾引起的经济损失巨大, 其灾害等级被评为4级是与事实相符合的。

综上所述, 虹桥枢纽灾害等级结果合理、可信, 布置防灾工作时要重点突出, 主要防护火灾、恐怖袭击灾害, 对于各种灾害的敏感带要着重关注, 提前采取防范措施。

用模糊综合评估方法进行灾害等级评估可以解决评估中的非精确性问题, 对主观的概念进行量化, 方便了数学的处理, 减小了主观判断带来的差异, 使结果更为精确, 计算过程和结果更符合实际情况。模糊综合风险评估方法可以从底层向上逐层运算, 最后得出总体评价结果, 该方法操作性强, 具有一定的实用价值。

由于灾害等级是采纳了专家打分法的数据, 具有专业可靠性同时有一定的主观性。例如对上海影响大的地震记录为东边沿海, 实际烈度尚未达到Ⅵ度, 由专家打分得到的数据计算出来的地震等级偏高, 偏保守。

另外, 灾害发生后常常有伴生灾害出现, 关于上海虹桥综合交通枢纽伴生灾害的研究及其伴生灾害对灾害等级的影响, 作者已经在文献[7]中做了详细的论述。

参考文献:

- [1] Suyan. Seismic risk management and insurance analysis of underground structures in soft soil, [D]. Shanghai: Doctor Article of Tong Ji University, 2004, 85 – 105.
- [2] Shao R Q. A multi – level fuzzy synthetic evaluation on investment programs in shipping [J]. Transportation Engineering, 2004, 144(93): 497 – 502.
- [3] Maoru. Risk management on underground engineering [C]// International Proseminar Memoir about Engineering Managemengt, Hong Kong, 2004: 94 – 98.
- [4] V. carr, J. H. M. Tah. A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system [J]. Advances in Engineering Software, 2001, (32), 847 – 857.
- [5] Wang Zhuang – pei, Li hong – xing. Fuzzy system theory and fuzzy computer, [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1996.
- [6] Fang Shu – cheng, Wang ding – wei. Fuzzy mathematics and fuzzy optimization, [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1997.
- [7] 周红波, 高文杰, 刘成清. 上海虹桥综合交通枢纽灾害链及其在灾害评估中的应用[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 6 – 12.

Disaster Identification and Assessment for Shanghai Hongqiao Integrated Transport Project

Zhou Hongbo¹, Gao Wenjie¹ and Liu Chengqing²

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Using hazard identification technology such as historical record method, genesis analysis method and prediction method, disasters and causes for the Shanghai Hongqiao integrated transport project is preliminarily identified, and its disaster category is determined. A final list of disasters is given, using the malfunction factor method to analyze the mechanism of main disasters. Due to the complexity of the project and randomness of disasters, it is difficult to accurately quantify the data of disasters during the project. So, the disaster grade assessment is processed with the fuzzy comprehensive assessment method. On the basis of disaster grade table made by the international association of the tunnel, the affiliation function is established to make assessment results accord with the international standards as much as possible. This kind of disaster assessment ideas and methods can be a reference for later large-scale integrated transport projects.

Key words: Shanghai Hongqiao Integrated Transport Project; disaster identification; malfunction factor of seismic disaster; fuzzy comprehensive assessment; affiliation function; disaster assessment