

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.009

城市地下空间多灾种安全综合评价

李英民^{1,2}, 王贵珍^{1,3}, 刘立平^{1,2}, 杨 远⁴

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 450045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
3. 重庆工程职业技术学院, 重庆 400037; 4. 广东省华城建筑设计有限公司重庆分公司, 重庆 400034)

摘要: 针对灾害越来越多地以综合形式出现, 而目前仅考虑单灾种对城市地下空间安全的影响不能反映实际情况的问题, 结合城市地下空间的特点, 在地下空间致灾机理研究的基础上, 考虑各灾种的致灾特点及其相互影响, 建立了由“灾害本身危险性”、“地下空间抗灾性能”2 个一级指标、12 个二级指标、43 个三级指标组成的城市地下空间多灾种安全综合评价指标体系, 并采用模糊综合评价法对城市地下空间的安全进行分析评价。实例应用结果表明, 仅考虑单灾种对城市地下空间安全的影响是不全面、不科学的, 必须考虑各灾种间的相关性。

关键词: 地下空间; 灾害; 安全评价; 指标体系; 层次分析法

中图分类号: TU9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)03-0285-05

我国以城市地铁、隧道和大面积地下建筑等为主的城市地下空间正处于大规模开发利用时期^[1], 然而由于缺乏多灾种安全综合评判, 致使建设不合理甚至顾此失彼、先建后改、建后弃用的现象时有发生。随着自然、社会条件的变化, 灾害越来越多地以综合形式出现^[2], 一灾多果或多灾一果的现象日益增多, 这些现象表明应在建设之初对多灾种安全进行综合评价, 做到统筹兼顾。如何科学、合理评价城市地下空间在自然灾害、各种人为和非人为事故, 以及可能出现的恐怖事件等灾害影响下的安全程度, 建立一套具有科学性、系统性及可操作性的评价标准和方法, 成为当前迫切需要研究和解决的问题。

地下空间的内部防灾与地面建筑的防灾, 在原则上是基本一致的, 但是不能不注意到, 地下环境的一些特点使地下空间内部防灾问题更复杂、更困难, 因防灾不当所造成的危害也就更严重。事实表明, 灾害的发生一般都不是孤立的, 大的方面如自然灾害和人为灾害、原生灾害和次生灾害、地面上部空间灾害和地下空间灾害等; 具体如爆炸往往引起火灾, 火灾引起爆炸并造成空气污染, 地震的发生易引起火灾和洪灾, 施工事故引起火灾和爆炸, 水灾破坏地下网线从而影响交通和通讯等, 它们之间都存在着一定的内在联系, 往往都是相伴发生的, 所以仅考虑单灾种对地下空间安全的影响不能反映实际情况, 是片面的、不科学的。

现行地下空间安全评价已有单灾种抗灾理论和设计方法, 在此基础上进行综合评判可采用以下两种思路: 第一种是基于原因的综合评判, 有两种途径来实现。其一是分别就每个灾种(火灾^[3]、水灾、爆炸、地震等)进行单独评价, 若有不满足安全要求的因素, 则需对其进行加强和改进, 直至各灾种均满足安全要求。此方法没有考虑灾种间相关性, 评判易顾此失彼, 甚至彼此之间是矛盾的。其二是针对各灾种致灾因素, 探索其致灾机制, 考虑各灾种间的相互关联进行综合评价^[4]。此方法全面且能真实地反映地下空间安全状况, 但因其复杂性还有待研究。第二种是基于后果的综合评判, 即通过分析各灾种可能引起后果出现的频率高低^[5], 构建城市地下空间多灾种安全评价指标体系。

本文通过分析城市地下空间灾害特征和各灾种间相关性, 提出了基于后果的城市地下空间综合评判思路, 经数据分析并就现有各灾种对城市地下空间安全造成影响的因子进行整理和分析, 得到地下空间多灾种安全评价指标并最终构建城市地下空间多灾种安全评价指标体系。此方法充分考虑了各灾种间的相关性, 但避开了指标对灾种间相关性的过分依赖, 可操作性强。

收稿日期: 2010-05-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA11Z125)

作者简介: 李英民(1968—)男, 山东无棣人, 教授, 博士, 主要从事地震工程和结构抗震研究。E-mail: liyingmin@cqu.edu.cn

1 评价指标体系的建立

城市地下空间安全因素分为灾害本身危险性和地下空间抗灾性能两方面,因此对城市地下空间进行动态评价,其指标体系应涵盖这两个方面的内容.建立城市地下空间多灾种安全综合评价指标体系时,需要对城市地下空间安全所涉及的各个方面进行多层次的分析.

1.1 评价指标的初选和筛选

指标体系能否全面、真实、准确地描述和反映城市地下空间多灾种安全的整体情况,关键因素在于所选取的指标是否全面、真实、准确地反映了城市地下空间安全各方面的要求^[6].根据城市地下空间的特性,运用频度统计法和理论分析法,选择在地下空间安全评价体系中使用频度较高的指标,构成预选指标集.再对预选指标的特性进行分析,按照指标出现的频度和对城市地下空间安全影响程度的大小,筛选出数目足够少但却能表征对城市地下空间安全影响最重要性的指标构成指标体系,为下一步城市地下空间多灾种安全综合评价指标体系的建立提供参考.

把城市地下空间作为一个系统来看,各灾种之间的关联性,是多灾种评价指标体系中不可缺少的部分,又由于地下空间灾害的复杂性和多样性,安全评价中很难包含所有灾害种类.从各灾种出现频率统计和灾害事故对比可以看出,火灾^[7]、空气污染^[8]、施工事故、爆炸事故和水灾^[9]是最常发生且损失最严重的灾害事故,占有所有灾害事故的76.4%,足可以反映整个城市地下空间的安全情况,因此本文初步设计的评价指标体系仅包含上述地下空间发生次数多、破坏程度严重的主要灾害.

其次是评价指标的筛选.项目咨询了25位地下空间防灾和评价方面的专家,请他们对指标体系的研究提供建议,并对上述指标体系填写问卷,对指标的重要程度做出判断.咨询的专家都曾主持或参与过地下交通、地下商场或人防工程的建设,来自高校、施工单位、设计单位和监理单位等.

专家意见咨询表分为两个部分:第一部分是对上述初步建立的评价指标体系采用利克特(Likert)量表将指标分为很重要、重要、一般重要、不太重要和不重要5个等级,分别赋予5、4、3、2、1分值,请专家对指标的重要性进行量化打分.第二部分有两个开放性问题,一是请专家对不合理的指标提出修改意见,二是请专家对指标体系进行补充,增加他们认为重要的指标.

采用各指标所得分值的算术平均值表示专家的“意见集中度”,用变异系数表示专家的“意见协调度”.变异系数越小,指标的专家意见协调程度越高,并以算术平均值大于3.5和变异系数小于0.25为筛选标准,结合专家的具体意见对指标框架及指标内涵进一步加以筛选和修正,以此来检验指标体系的效度和信度^[10].根据以上方法对专家问卷所获得的数据进行统计,计算上述各个指标的“意见集中度”和“意见协调度”.

通过调查问卷,多位专家建议,虽然地下结构具有较好的抗震能力,但是近二三十年来全球范围内发生的几次强烈地震特别是阪神地震,地下结构均有明显破坏,这对以往“地下结构在地震时是安全的”这一传统观点提出了质疑,所以本文最终的评价指标体系里增加了地震这一破坏能力极强的灾害.

1.2 评价指标体系的提出

地下空间防灾与地面建筑的防灾,在原则上是基本一致的,但地下空间由于其自身的特点使防灾问题更复杂、更困难.因此进行城市地下空间多灾种安全评价必须从其特征出发,在借鉴地面建筑和地下空间单灾种安全指标体系^[11]的基础上,建立符合城市地下空间多灾种安全的评价指标体系.通过专家咨询,对指标进行分析、筛选和补充,结合城市地下空间特点,最终确立了由“灾害本身危险性”、“地下空间抗灾性能”2个一级指标、12个二级指标(即因素层)、43个三级指标(即指标层)组成的城市地下空间多灾种安全综合评价指标体系(表1).

2 评价指标体系中指标权重的确定

由于城市地下空间潜在的灾害和有害因素的不确定性、随机性和相关性,因此城市地下空间多灾种安全评价是一个多准则多目标的复杂问题.采用层次分析法^[12]通过定量和定性的分析,对影响城市地下空间安全的各个因素层次化,并按照因素间的相互关联影响以及隶属关系形成一个多层次的分析结构模型,对各个评价指标赋值.

表 1 城市地下空间多灾种安全综合评价指标体系及各指标的权重

Table 1 Comprehensive multi-disaster safety evaluation index system for urban underground space and weights of various indices

准则层	准则权重	因素层	因素权重	指标层	指标权重	准则层	准则权重	因素层	因素权重	指标层	指标权重
灾害本身危险性	0.500	火 灾	0.223	阻断通讯	0.068	地下空间抗灾性能	0.500	抗火灾能力	0.203	预防火灾	0.120
				空气污染	0.152					避难措施	0.203
				引起爆炸	0.390					灭火救助	0.152
				人员伤亡	0.390					预防扩大蔓延	0.281
		空气污染	0.138	氮氧化物	0.312			抗空气污染能力	0.194	防灾中心	0.154
				可吸入颗粒	0.125					通风状况	0.549
				总悬浮颗粒	0.237					空调运转情况	0.451
				一氧化碳	0.326					施工质量	0.312
		施工事故	0.101	影响周围建筑安全	0.470			抗施工事故能力	0.105	施工现场安全管理	0.559
				引起爆炸	0.152					施工人员素质	0.084
				造成火灾	0.076					施工单位资质	0.045
				人员伤亡	0.302					安全设施	0.332
		爆炸事故	0.221	引起火灾	0.232			抗爆炸能力	0.215	应急救援	0.315
				二次爆炸	0.190					监测系统	0.353
				空气污染	0.288					防排水工程措施	0.343
				人员伤亡	0.290					围岩及地下水情况	0.219
		水 灾	0.202	破坏空间防护设施	0.331			抗水灾能力	0.131	自然地理状况	0.170
				破坏地下网线	0.423					施工质量	0.268
				人员伤亡	0.246					抗震等级	0.425
		震 灾	0.115	引起火灾	0.389			抗震能力	0.152	所处烈度区	0.412
				引起爆炸	0.235					自然地理状况	0.163
				人员伤亡	0.376						

2.1 确定判断矩阵并作一致性检验

根据以上思路,在参考专家意见的基础上,确定各因素之间的相对重要性并赋以相应的分值,构造出各层次中的所有判断矩阵,利用 Matlab 计算权向量并作一致性检验,计算结果见表 1。

2.2 层次总排序

计算指标层和因素层对准则层的组合权重,指标层相对于准则层的组合权重为

$$w_{ij} = w_iw_j$$

(1)

式中: w_{ij} ——组合权重; w_i,w_j ——对应于各准则的分权重。

则式 1 得到指标层对应于准则层的权重^[13]。利用同一层次中所有层次单排序的结果,计算出针对上一层次而言的本层次所有元素的重要性权重值,得到层次总排序。指标层中有些指标具有交叉性,如“空气污染”、“引起爆炸”、“引起火灾”、“人员伤亡”、“施工质量”等,层次总排序中对这些指标进行了汇总。

3 评价方法的选定

根据上述选择的依据,即充分考虑操作的可行性、信息可得性和时间 3 个方面,对城市地下空间多灾种安全进行评价。本文采用模糊综合评价法^[14],这样既可以避免过分依赖专家,又可以避免过分依赖现场数据,使得评价结果尽可能地接近真实情况。

4 实例分析

对某新建的地铁,应用现有城市地下空间各单灾种指标体系,对该工程各系统存在的危险、有害因素进行辨识和分析,并采用模糊综合评价法对各系统进行了分析评价。通过对各单灾种指标体系的应用分析,表明该地铁严格执行了相关建设标准,结构满足功能要求,遵循了安全使用、经济合理原则;火灾、地震、洪水、爆炸等各危险因素均得到有效控制,且在线路走向选择、系统设计、设备选择、运行模式及安全管理等方面采取了安全应对措施。针对各单灾种,该工程的建设在安全上是可行的,建成投入运营后可以保证系统的安全和高效运行。

下面应用本文建立的评价指标体系和选取的评价方法对该地铁进行多灾种安全综合评价。通过构建该

地铁多灾种安全综合评价指标体系,计算各指标的隶属度,进行模糊综合判断,可得总目标的综合评价: $Z = (0.013 \ 0.143 \ 0.312 \ 0.396 \ 0.136)$ 。

根据模糊综合评价法,为了对各评价指标进行定量分析需要确定各指标的评价集,采用5级百分制评价把评价集 V 划分5个评价等级,即 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{极小}, \text{很小}, \text{小}, \text{较大}, \text{大}\}$,其中 v_1 为城市地下空间多灾种危险性“极小”,评分区间为90~100,中值为95; v_2 为危险性“很小”,评分区间为80~89,中值为84.5,依此类推。选择各区间的中值作为等级的参数,则5个等级所对应的参数分别为95,84.5,74.5,64.5,49.5,其参数列向量为 $v = (95 \ 84.5 \ 74.5 \ 64.5 \ 49.5)^T$,将综合评价结果分别乘以相应的决策分值,即得该地铁安全评级分数为68.84分,得分处在60~69区间,所以该地铁危险性“较大”,该地铁的安全水平为“较差”,即安全状况较差,安全措施需要进一步补充和完善。

4 结 语

由实例评价结果可知,用单灾种评价指标体系对该地铁进行评价,表明该地铁安全状况是良好的,用本文建立的地下空间多灾种安全综合评价指标体系进行评价则得出不一样的结论,认为此地铁安全状况较差,需要改进和完善。这就表明对地下空间安全的评价,若分开考虑各个灾种对地下空间安全的影响,则忽略了各灾种间的相关性,与真实情况不符。一种灾害往往导致另外灾害的发生,各灾害并不都是彼此独立的,有的是相互关联、相互作用的。实例分析还表明,对地下空间安全的评价,仅考虑单灾种对其安全的影响是不全面、不科学的。验证了本文建立的城市地下空间多灾种安全综合评价指标体系和选取的评价方法是可行且有效的,达到了预期的目的。

参考文献:

- [1] 童林旭. 地下空间与城市现代化发展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 10-35.
- [2] 周云, 汤统壁, 廖红伟. 城市地下空间防灾减灾回顾与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 467-474. (ZHOU Yun, TANG Tong-bi, LIAO Hong-wei. Review and prospect of disaster prevention of urban underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 467-474. (in Chinese))
- [3] 孔军, 赵超阳. 地下空间防火系统的安全评价研究[J]. 四川建筑, 2003, 23(5): 55-56. (KONG Jun, ZHAO Chao-yang. The research of underground space fire system of safety evaluation[J]. Sichuan Architecture, 2003, 23(5): 55-56. (in Chinese))
- [4] 聂高众, 汤懋苍, 苏桂武, 等. 多灾种相关性研究进展与灾害综合机理的认识[J]. 第四纪研究, 1999(5): 466-475. (NIE Gao-zhong, TANG Mao-cang, SU Gui-wu, et al. Progresses in the research on multi-hazard correlation and the understading of comprehensive hazard-formation mechanisn[J]. Quarter Sciences, 1999(5): 466-475. (in Chinese))
- [5] 易立新. 城市火灾风险评价的指标体系设计[J]. 灾害学, 2000, 15(4): 90-92. (YI Li-xin. Index system design for urban fire risk assessmen[J]. Journal of Catastrophology, 2000, 15(4): 90-92. (in Chinese))
- [6] 潘海泽, 黄涛, 杨海静, 等. 铁路运营隧道渗漏水灾害成因分析及评价指标体系建立[J]. 工程勘察, 2008, 233(12): 21-25. (PAN Hai-ze, HUANG Tao, YANG Hai-jing, et al. The causes of railway operation tunnels leakage water and the evaluation index system is establishe[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008, 233(12): 21-25. (in Chinese))
- [7] 李树涛. 地下建筑火灾烟气危害及对策探讨[J]. 武警学院学报, 2005, 21(6): 25-26. (LI Shu-tao. On the damage caused by smoke of underground building and measures[J]. Journal of Chinese Peoples Armed Police Force Academy, 2005, 21(6): 25-26. (in Chinese))
- [8] 李铁柱, 王伟, 武勇. 城市道路交通空气污染灰色聚类决策评价[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 57-60. (LI Tie-zhu, WANG Wei, WU Yong. Grey clustering decision-making evaluation on city street traffic atmospheric pollution[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2001, 31(3): 57-60. (in Chinese))
- [9] 吕康成, 崔凌秋. 隧道防排水工程指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [10] 高杰, 孙林岩, 李满圆. 区间估计: AHP 指标筛选的一种方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(10): 73-77. (GAO Jie, SUN Lin-yan, LI Man-yuan. Range estimation priority: a method to sift out weak-weighted criteria in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(10): 73-77. (in Chinese))
- [11] 张伟, 姜韦华, 张卫国. 城市地下交通隧道火灾的防护[J]. 地下空间, 2002, 22(3): 268-270. (ZHANG Wei, JIANG Wei-hua, ZHANG Wei-guo. Prevention of fire in urban underground traffic tunnel[J]. Underground Space, 2002, 22(3): 268-270. (in Chinese))
- [12] 徐慧, 罗超, 刘志刚. 层次分析法评价指标筛选方法探讨[J]. 中国海上油气, 2007, 19(6): 415-418. (XU Hui, LUO Chao, LIU

Zhi-gang.Study on the selection method of evaluation indexes by AHP[J]. China Offshore Oil and Gas ,2007 ,19(6) :415-418.(in Chinese))

[13] 魏邦龙.应用层次分析法(AHP)确定农业科研项目评估指标的权重[J].甘肃科学学报 ,1997 ,9(3) :73-76.(WEI Bang-long. Determination of weight indexes in evalvating scientific research projects of agriculture by using analytic hierarchy proces[J]. Journal of Gansu Sciences ,1997 ,9(3) :73-76.(in Chinese))

[14] 褚廷湘,杨胜强,刘国忠,等.模糊综合评价对采空区自然发火的评价及应用[J].中国安全生产科学技术 ,2008 ,4(1) :124-127.(CHU Ting-xiang ,YANG Sheng-qiang ,LIU Guo-zhong æt al.Fuzzy comprehensive evaluation on the spontaneous combustion in goaf and its application[J]. Journal of Safety Science and Technology ,2008 ,4(1) :124-127.(in Chinese))

Comprehensive multi-disaster safety evaluation for urban underground space

LI Ying-min^{1 2} , WANG Gui-zhen^{1 ,3} , LIU Li-ping^{1 2} , YANG Yuan⁴

(1. College of Civil Engineering , Chongqing 400045 , China ;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area
(Chongqing University) , Ministry of Education , Chongqing 400045 , China ;

3. Chongqing Vocational Institute of Engineering , Chongqing 400037 , China ;

4. Chongqing Branch of Guangdong Provincial Huacheng Architectural Design Co. , Ltd. , Chongqing 400034 , China)

Abstract : Since more and more disasters have occurred in an integrated form , considering the influence of only one kind of disaster on the safety of urban underground space currently cannot reflect the actual situation. Based on the characteristics of the urban underground space as well as the researches on the hazard-formation mechanism , a comprehensive multi-disaster safety evaluation index system for the urban underground space , consisting of 2 first-level indices of "Risk of disaster itself " and "Disaster resistant performance of underground space " , 12 second-level indices and 43 third-level indices , was established by considering hazardous characteristics and interaction of various disasters. The safety of urban ground space was analyzed by use of the fuzzy comprehensive evaluation method. The results of case studies indicate that considering the influence of only one kind of disaster on the safety of urban ground space is incomplete and unscientific , and the correlation among various disasters should be taken into account.

Key words : underground space ; disaster ; safety evaluation ; index system ; AHP