

胡淑荣. 强震后既有建筑火灾危险性的模糊数学评估模型研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(1): 201-207. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.201

HU Shurong. A Fire Risk Assessment Model Based on Fuzzy Mathematics for the Existing Buildings after Strong Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 201-207. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.201

强震后既有建筑火灾危险性的 模糊数学评估模型研究

胡淑荣

(国家林业局管理干部学院, 北京 102600)

摘要: 在强烈地震发生后, 会引发建筑火灾等次生灾害, 涉及因素较多, 传统火灾危险性数学模型忽略了强震后既有建筑发生火灾时不同因素的随机性与模糊性特性, 难于建立健全的评估数学模型, 导致评估精度低。为解决该问题, 通过分析强震后既有建筑火灾影响, 用因素模糊数学方法建立强震后既有建筑火灾危险性评估数学模型及评估体系。具体方法是对评估指标体系中各层因素针对上层因素影响进行评分, 建立判断矩阵, 获取权重。确定隶属度矩阵, 获取强震后既有建筑火灾危险性评估的因素集与评语集, 构造单因素评判, 给评估集中的因素赋予权重, 进行一级模糊评估。把一级评估结果当成二级评估的单因素评估, 通过模糊数学理论完成对强震后既有建筑火灾危险性的评估, 得到综合评估结果。实验结果表明, 采用所提模型进行危险性评估, 得到结果符合实际情况, 与其他模型相比, 所提模型评估精度高。

关键词: 模糊数学; 强震后既有建筑; 火灾; 危险性评估; 模型

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0201-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.201

A Fire Risk Assessment Model Based on Fuzzy Mathematics for the Existing Buildings after Strong Earthquakes

HU Shurong

(State Academy of Forestry Administration, Beijing 102600, China)

Abstract: Strong earthquakes may result in secondary disasters, such as building fires, which involve several factors. The traditional mathematical models that are used for assessing the fire risk ignore the randomness and fuzziness of different factors observed in the existing buildings after the occurrence of strong earthquakes, leading to low evaluation accuracy. To solve this problem, a mathematical model was established using a fuzzy mathematics method for assessing the fire risk in existing buildings after the occurrence of strong earthquakes. Further, the factors influen-

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673138)

作者简介: 胡淑荣(1963—), 女, 山东东平人, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 高等数学教学及微观经济学教学。

E-mail: oommss6655@163.com。

cing the occurrence of fire in existing buildings after a strong earthquake were analyzed, and a fire risk assessment system was established for the existing buildings after a strong earthquake. The factors belonging to each layer in the evaluation index system were graded according to their influence on the factors of upper layer. The judgment matrix was further established, and the weight was obtained. The factor and comment sets required for assessing the fire risk in the existing buildings after the occurrence of strong earthquakes were obtained by determining the membership matrix. Single factor evaluation was further performed to realize first-grade fuzzy evaluation. The first-grade evaluation result was considered to be the single factor for performing second-grade evaluation. The fire risk assessment of the buildings after the occurrence of strong earthquakes was completed using the fuzzy mathematical analysis. The experimental results denoted that the proposed model is more suitable for real-life situations and more accurate when compared to other models.

Keywords: fuzzy mathematics; existing buildings after strong earthquake; fire; risk assessment; model

0 引言

地震给人们带来的破坏是巨大的。在地震发生后,引发次生灾害的危害性是不容忽视的,火灾就是地震引发的次生灾害中破坏能力最强的一种。建筑业逐渐兴起,由此出现了很多安全隐患。在发生地震后,由于部分早期建筑不满足当前防火规范,且很多新型建筑改变了原有使用功能与建筑材料,使得其对既有建筑存在的隐患进行了很大的改变^[1-3]。怎样对强震后既有建筑火灾危险性进行评估,是建筑科学改造、避免震后火灾发生、最大程度降低火灾损失的关键,这也成为亟需解决的问题。

强震后既有建筑火灾涉及因素多,不同因素存在随机性与模糊性特性^[4]。传统方法注重性能参数设计,没有考虑对引起火灾各因素的分析,未构造健全的评价模型,导致危险性评估具有一定的局限性^[5-6]。

模糊数学主要用于解决定性问题的定量描述与研究,把主观因素与客观规律结合在一起,利用科学有效的推理,获取可信结论,对解决强震后既有建筑火灾危险性评价问题非常有效^[7]。模糊数学评价依据模糊数学理论和统计学理论,让评估结果建立在量的比较基础上,有更好的科学性。

模糊数学评估过程如下:

- (1) 确定影响强震后既有建筑火灾危险性的因素,构造评估指标体系;
- (2) 确定不同指标的权重,获取隶属度函数;
- (3) 建立一级评估数学模型和二级评估数学模

型,进行综合评估,给出强震后既有建筑火灾危险性评估结果。

下面按照上述步骤建立强震后既有建筑火灾危险性评估数学模型。

1 强震后既有建筑火灾危险性评估指标体系建立

强震后既有建筑火灾是若干火灾因素相互作用的结果,主要影响因素有以下几种^[8]:

(1) 强震后既有建筑物自身情况。既有建筑内部构件、墙体以及装修材料性质、火灾载荷、防火设计等,对控火能力有很大的影响。

(2) 消防安全管理情况。健全科学的消防安全管理制度、震后火灾疏散方案、巡逻人员、易燃设备检修为发现火灾隐患,避免出现火灾的有效方式。

(3) 强震后既有建筑物性质。强震后既有建筑物出现火灾,建筑物中物品及装置易燃性占很大程度,了解易燃物规模、物品燃烧性能,对其进行定期检查,是一种有效的火灾预防方式。

(4) 人群管理。合理约束强震后既有建筑物人流量,提高业主消防安全意识和逃生技能^[9-10],为降低火灾损失的主要方式。

在上述分析的基础上,建立强震后既有建筑火灾危险性评估体系(表1)。

2 强震后既有建筑火灾危险性评估数学模型

2.1 权重确定

评估指标权重是强震后既有建筑火灾危险性评

估指标体系各因素影响危险性水平关键程度的体现^[11]。通常依据历史建筑火灾资料、相关火灾专家以及研究者的经验获取,对评估指标体系中各层因素针对上层因素影响进行评分,建立判断矩阵,获取权重^[12-13]。本节假设强震后既有建筑火灾危险值 R 在 $0 \sim 5$ 范围内取值,危险值和危险等级间的对应关系用表 2 进行描述。

表 1 强震后既有建筑火灾危险性评估体系
Table 1 Fire hazard assessment system for existing buildings after strong earthquake

一级指标	二级指标
建筑自身情况	建筑材料
	火灾载荷
	防火设计
	建筑结构
消防安全管理	墙体导热情况
	火灾疏散方案
	安全职责分配
建筑性质	物品规模
	物品存储方式
	物品燃烧性能
人群管理	人流量
	人员安全意识
	人员身体状态
	人员逃生技能

表 2 危险值和危险等级间的对应关系
Table 2 Correspondence between hazard value and hazard degree

危险值 R 的取值范围	火灾危险等级
$0 \leq R < 1$	危险性很低
$1 \leq R < 2$	危险性较低
$2 \leq R < 3$	危险性一般
$3 \leq R < 4$	危险性较高
$4 \leq R \leq 5$	危险性很高

依据专家打分结果求出权重,通常专家人数需高于 20 人,低于 40 人。专家数量用 m 进行描述, k 代表第 k 个专家^[14-15],则权重向量可通过下式求出:

$$\omega = \frac{\sum_{k=1}^m \omega_k}{m} \quad (1)$$

2.2 隶属度矩阵确定

分析表 1 可以看出,建立的强震后既有建筑火灾危险性评估体系包括 4 个一级指标和 14 个二级指标^[16]。通过专家打分法获取指标权重值,确定隶属度矩阵,为构造评估数学模型提供依据。

假设强震后既有建筑火灾危险性评估结果等级被划分成 n_p 个,共有 n_z 个评价指标,用 $x_{i,j}$ 与 $x_{i,j+1}$ 描述第 i 个评估指标第 j 个评估等级的上下限,用

x_i 描述第 i 个指标值。则可做出以下规定:

指标 i 的 j 类指标等级上限值 $x_{i,j}$ 对模糊理论的隶属度为 1,其下限值 $x_{i,j+1}$ 对模糊理论的隶属度为 0,处于二者之间的标准值隶属度在 $0 \sim 1$ 范围内,可通过线性内插值方法进行规格化处理^[17]:

$$q_{ij} = \frac{x_{i,j} - x_{i,n_p+1}}{x_{i,j} + x_{i,n_p+1}} \quad (2)$$

其中: q_{ij} 用于描述数据的规格化处理结果。

为了保证安全性,将指标各级标准值区间上限当成标准值,则标准指标隶属度矩阵可描述成:

$$Q = [q_{ij}]_{n_z \times n_p} \quad (3)$$

n_z 个强震后既有建筑火灾危险性评估指标值可描述成:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_{n_z}]^T \quad (4)$$

通过下式进行规格化处理,则有:

$$s_i = \frac{x_i - y_{i,n_p+1}}{y_{i,j} - x_{i,n_p+1}} \quad (5)$$

对指标进行规格化处理,获取指标隶属度向量:

$$S = [s_1, s_2, \dots, s_{n_z}]^T \quad (6)$$

矩阵 Q 可给出 n_p 个评估等级对某模糊概念的标准指标隶属度值。向量 S 代表不同指标对某模糊数学理论的隶属度。说明规格化处理不但能够解决指标物理量纲存在差异的问题,还有明确的含义,也就是不同指标标准值和对象指标值对某模糊概念的隶属度。

2.3 评估数学模型

2.3.1 一级评估数学模型

建立一级评估数学模型的详细过程如下:

(1) 获取强震后既有建筑火灾危险性评估的因素集与评语集,因素集就是影响评估结果的各因素构成的集合,即建立评估体系中的评估指标,用 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ 进行描述。评语集即评估强震后既有建筑火灾危险性不同因素的评估结果构成的集合,用 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ 进行描述,其中, V_1 代表强震后既有建筑火灾危险性很高, V_2 代表强震后既有建筑火灾危险性较高, V_3 代表强震后既有建筑火灾危险性一般, V_4 代表强震后既有建筑火灾危险性较低, V_5 代表强震后既有建筑火灾危险性很低^[18]。

(2) 构造单因素评判。针对单因素中的 U_i 进行评估,得到评估结果 V_j ,通过模糊向量描述成 S ,其中 $s_{ij} = f_s(U_i, V_j)$,代表某指标经隶属函数映射后的结果,是对应隶属度的体现。针对每个单因素构造以上关系,即可获取模糊关系矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 为评估因素集 U 中的因素赋予权重向量, 记作 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{nz}]$ 。

(4) 模糊评估, 进行模糊变换 $\omega \cdot S = B = (b_1, b_2, \dots, b_{nz})$, 如果 $\sum b_i \neq 1$, 则认为:

$$B' = [1 / (\sum b_i)] \times (b_1, b_2, \dots, b_{nz}) \quad (8)$$

按照 B' 最大隶属度原则获取一级评估数学模型对强震后既有建筑火灾危险性的评估结果。

2.3.2 二级评估数学模型

二级评估数学模型即把一级评估结果当成二级评估的单因素评估, 则有:

$$P = \omega \cdot B' = \begin{bmatrix} \omega_1 \cdot S_1 \\ \omega_2 \cdot S_2 \\ \dots \\ \omega_c \cdot S_c \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: c 用于描述第一层因子数量; ω_i 用于描述第二层 i 类因子的权重向量。

2.3.3 模糊数学综合评估

在强震后既有建筑火灾危险性评估因素权重集合向量 ω 和评估关系矩阵 S 确定后, 即可通过模糊数学理论完成对强震后既有建筑火灾危险性的评估^[19], 从而求出 $P = (P_1, P_2, \dots, P_c)$, 将其作为综合评估结果。

3 应用结果及分析

3.1 应用背景

首先在 2018 年 6 月, 采用本文模型对发生地震后某大型购物商城进行火灾危险性评估。该大型购物商城于 2005 年建成并使用, 整体结构是钢筋混凝土框架结构, 耐火等级是二级, 共四层。第一层到第三层是商品售卖区域, 第四层是办公区域, 共 2.8 万 m^2 左右, 人流量约为 6 500 人/天。其周围建筑密度较大, 整个商城有三个安全出口, 二楼~四楼各 2 各安全通道, 防火分区不显著。

然后将文献[5]模型和文献[6]模型作为对比, 对和上述商城相邻建筑火灾危险性进行评估, 将评估结果和实际结果相比, 验证本文模型评估结果是否准确。

3.2 本文模型对大型购物商城火灾危险性评估结果 针对评估体系计算各因素权重向量, 用表 3 进

行描述。

表 3 危险性评估体系各因素权重向量

Table 3 Weight vector of each factor in risk assessment system

一级指标	权重	二级指标	权重
建筑自身情况	0.26	建筑材料	0.21
		火灾荷载	0.16
		防火设计	0.32
		建筑结构	0.18
		墙体导热情况	0.13
消防安全管理	0.39	火灾疏散方案	0.41
		安全职责分配	0.59
建筑性质	0.12	物品规模	0.22
		物品存储方式	0.31
		物品燃烧性能	0.47
人群管理	0.23	人流量	0.26
		人员安全意识	0.21
		人员身体状态	0.14
		人员逃生技能	0.39

计算不同一级指标的隶属度矩阵, 结果如下:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.42 & 0.36 & 0.11 & 0.11 \\ 0.1 & 0.23 & 0.35 & 0.26 & 0.06 \\ 0.15 & 0.18 & 0.29 & 0.16 & 0.22 \\ 0.06 & 0.29 & 0.13 & 0.25 & 0.27 \\ 0 & 0.31 & 0.15 & 0.29 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0.19 & 0.52 & 0.11 & 0.08 & 0.10 \\ 0.31 & 0.29 & 0.12 & 0.19 & 0.09 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.36 & 0.21 & 0.08 & 0.17 \\ 0.41 & 0.15 & 0.09 & 0.22 & 0.13 \\ 0.25 & 0.14 & 0.25 & 0.31 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} 0.09 & 0.16 & 0.34 & 0.26 & 0.15 \\ 0.24 & 0.29 & 0.25 & 0.19 & 0.03 \\ 0.21 & 0.18 & 0.09 & 0.21 & 0.31 \\ 0.16 & 0.35 & 0.14 & 0.24 & 0.11 \end{bmatrix} \quad (13)$$

按照表 3 获取研究商城建筑火灾危险性评估一级指标的权重分配向量, 依次为 $\omega_1 = (0.21, 0.16, 0.32, 0.18, 0.13)$ 、 $\omega_2 = (0.41, 0.59)$ 、 $\omega_3 = (0.22, 0.31, 0.47)$ 、 $\omega_4 = (0.26, 0.21, 0.14, 0.39)$ 。

则一级指标建筑物自身情况模糊评价向量为:

$$B_1 = \omega_1 \cdot S_1 = (0.21, 0.16, 0.32, 0.18, 0.13) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0.42 & 0.36 & 0.11 & 0.11 \\ 0.1 & 0.23 & 0.35 & 0.26 & 0.06 \\ 0.15 & 0.18 & 0.29 & 0.16 & 0.22 \\ 0.06 & 0.29 & 0.13 & 0.25 & 0.27 \\ 0 & 0.31 & 0.15 & 0.29 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (14)$$

对其进行规格化处理有 $B'_1 = (0.06, 0.29, 0.22, 0.16, 0.27)$, 按照同样的方式获取 B_2, B_3, B_4 , 获取 $B' = (B'_1, B'_2, B'_3, B'_4)$ 。继续建立二级评估数学模

型,即 $P = \omega \cdot B'$, 获取综合评价结果为 $P = (0.19, 0.31, 0.39, 0.11)$ 。

依据最大隶属度原则,综合评估研究地震后大型购物商城的火灾危险性评估等级为危险性较低等级,危险性最大表现在建筑性质方面,该大型购物商城中堆放了大量鞋、衣物、电器等易燃物品,容易引发震后火灾的发生,符合实际情况。其次是消防安全管理方面,一旦出现火灾,损失和危害将扩大,建议加强消防管理防范措施。

3.3 区域建筑火灾危险性评估

为了验证本文模型对强震后既有建筑火灾危险性评估准确性,将文献[5]模型和文献[6]模型作为对比,对上述大型购物商城周围建筑进行火灾危险性评估测试,该区域建筑大多较为破旧。

研究区域强震后既有建筑物实际火灾危险性情况用图 1 进行描述。采用本文模型、文献[5]模型和文献[6]模型对该区域强震后既有建筑火灾危险性

评估结果用图 2 进行描述。

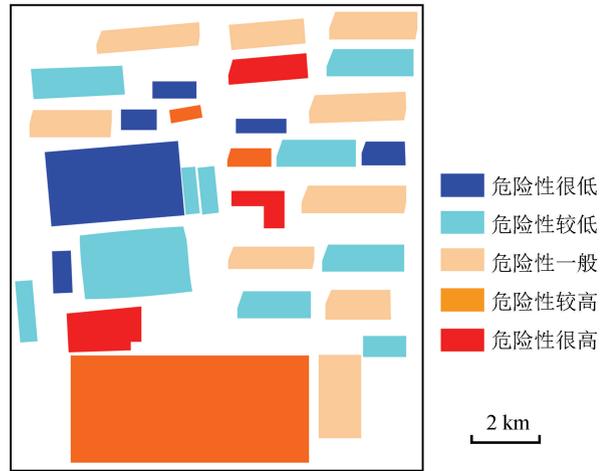


图 1 研究区域强震后既有建筑物实际火灾危险性情况

Fig.1 Actual fire risk of existing buildings after strong earthquake in the study area

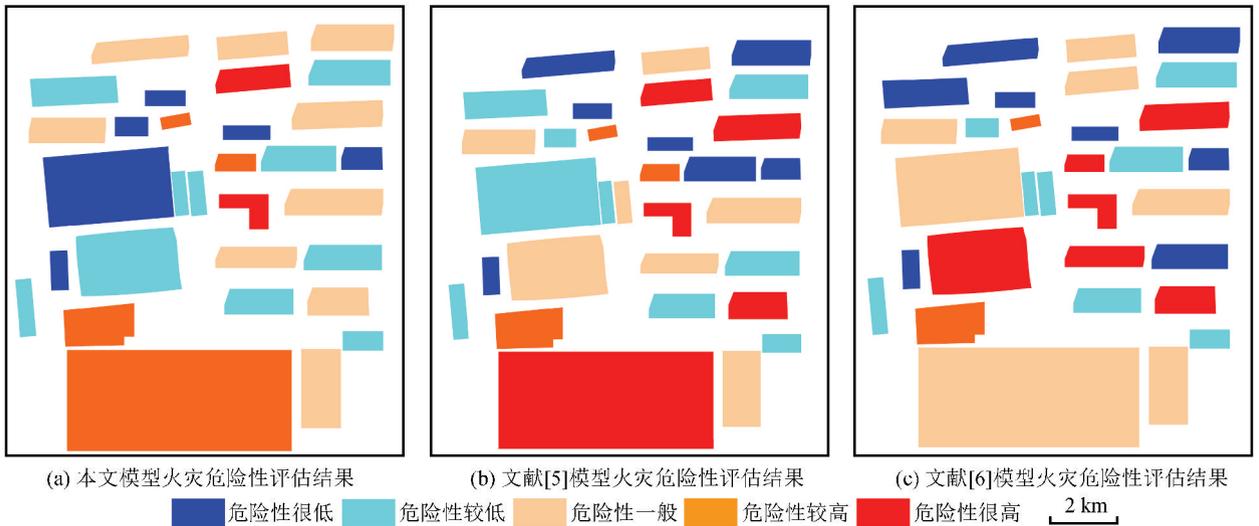


图 2 三种模型危险性评估结果比较

Fig.2 Comparison between risk assessment results with three models

综合分析图 1 和图 2 可知,采用本文模型对研究区域强震后既有建筑火灾危险性进行评估,得到的评估结果和实际危险性情况基本吻合,只有一处评估错误。而文献[5]模型和文献[6]模型的火灾危险性评估结果和实际情况相差较大,说明本文模型的评估精度高。

4 结论

本文通过分析强震后既有建筑火灾影响,用模糊数学方法建立强震后既有建筑火灾危险性评估数学模型,考虑到地震发生的次生灾害,依据专家以及

研究者的经验获取评分,计算权重,确定隶属度矩阵,以解决指标物理量纲存在差异的问题。建立一级评估数学模型,把一级评估结果当成二级评估的单因素评估构造二级评估数学模型,在强震后既有建筑火灾危险性评估因素权重集合和评估关系矩阵确定后,通过模糊数学理论完成对强震后既有建筑火灾危险性的评估,得到综合评估结果。

在进行实验的过程中,采用所提模型对某大型购物商城进行火灾危险性评估,发现所提模型评估结果符合实际情况。

将文献[5]模型和文献[6]模型作为对比,对和

研究商城相邻建筑火灾危险性进行评估,将评估结果和实际结果相比,发现所提模型评估结果和实际结果吻合,评估精度高。

参考文献(References)

- [1] 付东青,郭晓旋.基于模糊数学的煤矿瓦斯危险性区域预测研究[J].煤炭技术,2014,33(1):138-139.
FU Dongqing, GUO Xiaoxuan. Prediction of Coal Mine Gas Hazard Areas Based on Fuzzy Mathematics[J]. Coal Technology, 2014, 33(1): 138-139.
- [2] 潘晓菲,吕品.凹型建筑外立面火灾烟气蔓延特性研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):45-51.
PAN Xiaofei, LÜ Pin. Study on Fire Smoke Spread Characteristics of Facade in Concave Building[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(2): 45-51.
- [3] 史华.基于复杂网络的建筑物强震下抗毁性估计模型[J].地震工程学报,2017,39(6):1024-1028.
SHI Hua. Invulnerability Estimation Model of Buildings with Complex Networks under Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1024-1028.
- [4] HAN L, SONG Y H, DUAN L, et al. Risk Assessment Methodology for Shenyang Chemical Industrial Park Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5185-5192.
- [5] 李天华,袁永博.地震重灾区诱发次生地质灾害风险评价研究[J].地震工程学报,2018,40(1):111-115.
LI Tianhua, YUAN Yongbo. Risk Assessment of Secondary Geological Disasters Induced in an Earthquake-stricken Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 111-115.
- [6] Q S, et al. Fuzzy Risk Assessment for Life Safety Under Building Fires[J]. Fire Technology, 2014, 50(4): 977-991.
- [7] 杨尧,李功权.火灾发生率空间分异及影响因素研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(9):158-163.
YANG Xiao, LI Gongquan. Study on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Fire Incidence[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(9): 158-163.
- [8] 侯文萃,陈能远,高洁.基坑排桩对建筑抗震性的影响分析[J].地震工程学报,2018,40(2):252-257.
HOU Wencui, CHEN Nengyuan, GAO Jie. Influence of Foundation Pit Pile Rows on the Seismic Performance of Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 252-257.
- [9] 梁力丹,郑达,巨能攀,等.基于灰色关联与模糊数学的重力式挡土墙震害评估[J].工程地质学报,2014,22(6):1234-1240.
LIANG Lidan, ZHENG Da, JU Nengpan, et al. Seismic Safety Evaluation of Gravity Retaining Wall Using Grey Correlation and Fuzzy Mathematics[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1234-1240.
- [10] 张靖岩,朱娟花,韦雅云,等.基于本质安全理念的建筑综合防灾技术体系构建[J].中国安全生产科学技术,2018(6):171-176.
ZHANG Jingyan, ZHU Juanhua, WEI Yayun, et al. Construction of Technology System for Comprehensive Disaster Prevention of Buildings Based on Intrinsic Safety Concept[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018(6): 171-176.
- [11] 张文.基于模糊数学的震后建筑火灾危险性评估模型研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1372-1377.
ZHANG Wen. A Model of Fire Risk Assessment of Post-earthquake Buildings Based on Fuzzy Mathematics[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1372-1377.
- [12] 米红甫,肖国清,王文和,等.基于Fuzzy-DS模型的建筑火灾风险评估方法研究[J].中国安全生产科学技术,2018(6):187-192.
MI Hongfu, XIAO Guoqing, WANG Wenhe, et al. Research on Risk Assessment Method of Building Fire Based on Fuzzy-DS Model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018(6): 187-192.
- [13] 徐亮.可燃建筑材料火灾危险性综合评价指标[J].消防科学与技术,2016(7):1016-1019.
XU Liang. Fire Risk Assessment Index of Combustible Building Materials[J]. Fire Science and Technology, 2016(7): 1016-1019.
- [14] 郭志宇,郭安宁,白雪见,等.基于视频监控系统的突发灾害应急评估技术可行性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):122-127.
GUO Zhiyu, GUO Anning, BAI Xuejian, et al. Feasibility Study on Emergency Assessment Technology of Sudden Disaster Based on Video Surveillance System[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(5): 122-127.
- [15] 裴兴旺,李慧民,孟海,等.多因素耦合作用下建筑火灾后加固施工过程风险性评估[J].中国安全生产科学技术,2016,12(7):156-162.
PEI Xingwang, LI Huimin, MENG Hai, et al. Risk Assessment on Reinforcement Construction Process of Post-fire Building by Multiple-factor Coupling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 156-162.
- [16] 任丽超,栗振锋.基于博弈论和模糊数学的桥梁风险评价模型[J].公路工程,2017,42(1):163-169.
REN Lichao, LI Zhenfeng. A New Model Based on the Games Theory and Fuzzy Mathematics in Bridge Engineering Risk Assessment[J]. Highway Engineering, 2017, 42(1): 163-169.
- [17] 郭小东,徐帅,宋晓胜,等.基于灰色模糊分析法的古建筑木结构安全性评估[J].北京工业大学学报,2016,42(3):393-398.
GUO Xiaodong, XU Shuai, SONG Xiaosheng, et al. Safety Assessment of Ancient Timber Buildings Based on Gray-fuzzy Analytical Method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(3): 393-398.
- [18] 夏正霖,夏登友.基于模糊规则推理的商业综合体火灾情景构

建方法研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(10):75-79.
XIA Zhenglin, XIA Dengyou. Study on Scenario Construction Method of Commercial Complex Fire Based on Fuzzy Rule Reasoning[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(10): 75-79.

[19] 张立宁,张奇,安晶,等.高层民用建筑火灾风险综合评估系统研究[J].安全与环境学报,2015,15(5):20-24.
ZHANG Lining, ZHANG Qi, AN Jing, et al. Comprehensive Fire Risk Evaluation System for High-rise Civil Buildings[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5): 20-24.

(上接第 130 页)

研究[J].铁道工程学报,2016,33(4):65-69.

CUI Yong, CHU Xiaogang, DONG Jia, et al. Prediction Research on the Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation Based on Neural Network[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(4): 65-69.

[22] 王成华,张薇.人工神经网络在桩基工程中的应用综述[J].岩土力学,2002,23(2):173-178.

WANG Chenghua, ZHANG Wei. Application of Artificial

Neural Networks to Pile Foundation Engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 173-178.

[23] 徐世强,梁武星,屈战辉.BP神经网络在预测路基沉降中的应用[J].西安工业大学学报,2006,26(5):452-456.

XU Shiqiang, LIANG Wuxing, QU Zhanhui. Application of BP Neural Networks in Forecast the Final Settlement of Highway Roadbed[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2006, 26(5): 452-456.