

基于熵权-未确知测度理论的装配式建筑 施工安全风险评估

李文龙¹, 李慧民¹, 孟 海^{1,2}, 裴兴旺¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要: 为保障装配式建筑施工过程的安全, 降低事故发生率, 解决装配式建筑施工安全风险问题, 根据常见的施工安全问题, 并针对装配式建筑施工过程的特点, 结合实地调研及文献查阅, 构建了基于熵权-未确知测度理论的装配式建筑施工安全风险模型, 并将该模型应用于工程项目中, 取得了良好的效果。研究表明, 该模型计算过程简单, 结果合理可靠, 为有效进行装配式建筑施工安全风险提供了新的思路。

关键词: 装配式建筑; 安全风险; 未确知测度理论; 熵权法

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0369-06

Evaluation of construction safety risk for fabricated building based on entropy-uncertainty measure theory

LI Wenlong¹, LI Huimin¹, MENG Hai^{1,2}, PEI Xingwang¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Central Research Institute of building and Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to ensure the safety of fabricated building construction process, reduce the incidence of safety accidents and solve the problem of fabricated building construction safety risk assessment. According to the common construction safety problems, and the characteristics of fabricated building construction process, combined with field investigation and literature review, a safety risk assessment model of prefabricated building construction based on the entropy weight-uncertainty measurement theory was established, then the model was applied in engineering project, and the good result was obtained. It showed that the calculation process of is clear and the results are reasonable and credible, and it provides a new idea for the effective assessment of safety risk in the construction process of fabricated building.

Key words: fabricated building; safety risk assessment; uncertainty measure theory; entropy weight method

随着建筑业的快速发展, 建筑工业化进程在不断推进, 各个地区的装配式建筑得到了长足的发展。对于传统的现浇式结构, 具有良好的整体性能, 但存在着施工工期长、费工费料、生产较难实现工业化、管理复杂等缺点。装配式建筑的出现大力改善了这一状况, 装配式建筑中的梁、板、柱乃至楼梯、阳台等构件均能在工厂进行加工, 实现完全的工业化生产, 在施工现场进行拼装即可。

装配式建筑实现了设计标准化、制造工业化、安装机械化, 具有建设速度快、施工时间短、节

约劳动力、节约材料等优点, 能最大限度地满足环保节能、绿色施工的要求。但装配式建筑施工过程的安全风险问题一直是建筑工业化进程中的亟待解决的重点问题。目前, 国内专家学者对装配式建筑安全管理等方面进行了深入的研究, 并取得了一系列的成果。吴凤平^[1]等深入分析混凝土装配式住宅施工危险源及存在的安全问题, 并提出一系列安全预防措施; 黄桂林等^[2]将可拓学理论运用于装配式住宅施工安全风险评价中, 以评价装配式住宅施工过程中的安全风险状况; 汤彦宁^[3]通过运用系统动力学理论, 对装配式结构住宅施

收稿日期: 2018-03-21 修改稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51808424、51678479); 住建部科技项目资助(2018-R1-009)

第一作者: 李文龙(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为土木工程建造与管理, 土木工程结构安全检测、鉴定、加固修复。E-mail: 1536295967@qq.com

通信作者: 李慧民(1954—), 男, 教授、博士生导师, 主要研究方向为土木工程建造与管理, 土木工程结构安全检测、鉴定、加固修复。E-mail: li_huimin2005@126.com

工阶段安全风险进行评价;李高锋等^[4]对装配式住宅施工安全影响因素及相应管理应对措施进行研究,并在工程实例中得以运用;李颖等^[5]在施工危险源分析的基础上,对预制装配式建筑施工的安全和质量问题进行分析和评估;刘迪等^[6]深入研究了装配式建筑施工各阶段存在的安全风险,并提出了影响装配式建筑安全管理的因素和“人、机、料、法、环”5个方面的控制措施;陈伟等^[7]联合应用层次分析法及灰色聚类评价方法,对装配式建筑工程实际施工安全状态进行测评;罗杰等^[8]通过从多个方面剖析装配式建筑施工安全管理的关键问题,以指导安全生产管理工作;杨爽^[9]在事故致因理论、危险源辨识理论分析的基础上,研究了属性数学在装配式建筑施工安全评价中的应用;田黎^[10]运用风险矩阵的评估方法和管理策略,在各种风险分析、识别、量测、评估的基础上建立了系统的风险管理体系;张文佳等^[11]通过构建基于结构熵权-可信性测度理论的风险性评估模型,以掌握当前的不安全因素,从而展开安全预防及控制。上述学者虽然采用了不同方法对装配式建筑施工安全风险问题进行了大量研究,但由于影响装配式建筑的施工过程安全风险的因素众多,并且存在着诸多的复杂性和不确定性,装配式建筑施工安全风险的评估与管理还存在着不足,传统的评估体系难以得到满意的结果。

未确知信息及其数学处理理论是由我国学者王光远于1990年提出的一种新的不确定性信息理论^[12]。未确知测度理论能够处理多因素的不确定信息,已在多个领域得到广泛应用并取得良好效果^[13-16]。基于此,本文构建熵权-未确知测度理论的装配式建筑施工过程安全风险评估模型,以期今后装配式建筑施工过程安全风险评估和管理提供了新的方法和思路。

1 基于熵权-未确知测度理论

设评估对象 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 评估指标集 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$; 若 x_{ij} 表示第 i 个评估对象 X_i 关于第 j 个评估指标 I_j 的测量值, 则有 m 维向量 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}\}$ 。设评估等级空间 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$, 第 k 个评估等级 C_k 为 x_{ij} 的等级值; 设第 k 级比第 $k+1$ 级安全风险高, 记为 $C_k > C_{k+1}$ 若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 或 $C_1 < C_2 < \dots < C_p$, 则称 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 是 U 的一个有序分割类。

1.1 确定单指标未确知测度矩阵

若 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$ 表示测量值 x_{ij} 属于第 k

个评估等级 C_k 的程度, 且 μ 满足:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \\ (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in U) = 1 \\ (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$\mu \left| x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right| = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l) \\ (k = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

称式(1)为“非负有界性”, 式(2)为“归一性”, 式(3)为“可加性”。满足式(1)~式(3)的 μ 称为未确知测度, 简称测度。

构造单指标测度函数 $\mu(x_{ij} \in C_k)$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$) 求出评估对象 X_i 的各个指标测度值 μ_{ijk} , 则称 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 为单指标测度评估矩阵, 即

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & L & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & L & \mu_{i2p} \\ M & M & O & M \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & L & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 熵权法确定指标权重

设 w_j 表示测量指标 I_j 与其他指标相比具有的重要程度, 要求 w_j 满足: $0 \leq w_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 则 $w = (w_1, w_2, L, w_n)$ 为对应指标的权重。

若在 n 个评估对象 m 个评估指标评估中, 有 p 个评估等级, 则第 j 个评估指标的熵 H_j 为

$$H_j = -t \sum_{k=1}^m Q_{ijk} \ln Q_{ijk} \quad (5)$$

式中: $H_j > 0$; $Q_{ijk} = \mu_{ijk} / \sum_{j=1}^m \mu_{ijk}$; t 为系数, $k = 1/\ln p$; 当 $\mu_{ijk} = 0$ 时, $\mu_{ijk} \ln \mu_{ijk} = 0$, ($i = 1, 2, \dots, n$)。

第 j 个评估指标的偏差度 $d_j = 1 - H_j$, 第 j 个评估指标的熵权 w_j 为

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (6)$$

1.3 确定多指标未确知测度矩阵

若 μ_{ik} 满足: $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$, $\mu_{ik} = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \mu_{ijk}$ ($k = 1, 2, \dots, p$), 则称 $(\mu_{ik})_{n \times p}$ 为多指标未确知测度矩阵。

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & L & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & L & \mu_{2p} \\ M & M & O & M \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & L & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.4 置信度识别准则

为了得出最终评估结果,引入置信度识别准则. 设 λ 为置信度($\lambda \geq 0.5$, 通常取 $\lambda = 0.6$ 或 0.7), 若 $C_1 > C_2 > L > C_p$, 且令

$$p_0 = \min \left| p: \sum_{k=1}^p \mu_{ik} > \lambda, i = 1, 2, L, n \right| \quad (8)$$

则认为评估对象的风险性等级为 C_{p_0} .

2 装配式建筑施工安全风险评估指标体系的建立

根据常见的施工安全风险因素,并结合装配式建筑施工的特点,在广泛调研和文献综述的基础上,将影响施工安全风险的因素分为五大类:人为风险因素,技术风险因素,物料、设备风险因素,管理风险因素,环境风险因素,将上述五大类因素进行深入分析、筛选得到次级因素.

人为风险因素:人是施工过程的直接参与者,作业人员的身体与心理状况、专业技术水平以及安全意识会对施工安全风险起着决定性的作用,因此发挥人的主导作用,提高人的活动能力,才能保证装配式建筑的施工安全.

技术风险因素:在装配式建筑施工中,施工技术与工艺与一般施工技术有很大差别,包括PC构件安装、吊装作业等都会存在极大地安全隐患,必须严把安全关.

物料、设备风险因素:物料设备对施工安全

的影响主要体现在作业区域内PC构件的运输及堆放是否合理,机械设备是否定期检验及临时支撑的防护情况等.

管理风险因素:安全管理涉及的因素很多,包括建立健全安全生产责任制、监督使用安全防护措施、定期进行安全检查和安全隐患排查等,科学的安全管理也是保证装配式建筑施工安全的重要环节.

环境风险因素:施工现场环境也会对装配式建筑施工安全产生一定程度的影响,包括气候条件文明施工情况及安全防护状况等.

基于影响装配式建筑施工安全的因素,建立装配式建筑施工过程安全风险评估指标体系,一级指标即人为风险因素(I_1)、技术风险因素(I_2)、物料、设备风险因素(I_3)、管理风险因素(I_4)、环境风险因素(I_5),由一级指标经过细化、分析、整合,选取作业人员技术水平(I_{11})、作业人员安全意识(I_{12})、作业人员健康状况(I_{13})、作业人员安全防护佩戴情况(I_{14})、PC构件连接可靠程度(I_{21})、PC构件拼装定位准确程度(I_{22})、吊点设置合理程度(I_{23})、塔吊交叉作业干扰程度(I_{24})、其他技术复杂程度(I_{25})、时变结构的安全监测技术(I_{26})、作业区域PC构件堆放情况(I_{31})、机械设备定期检验情况(I_{32})、临时支撑及防护情况(I_{33})、安全防护措施使用情况(I_{41})、安全生产责任制落实情况(I_{42})、安全定期检查到位情况(I_{43})、安全风险管理及控制情况(I_{44})、作业区域气候条件(I_{51})、作业区域文明施工状况(I_{52})、四口、五临边防护状况(I_{53})作为二级评估指标,如图1所示.

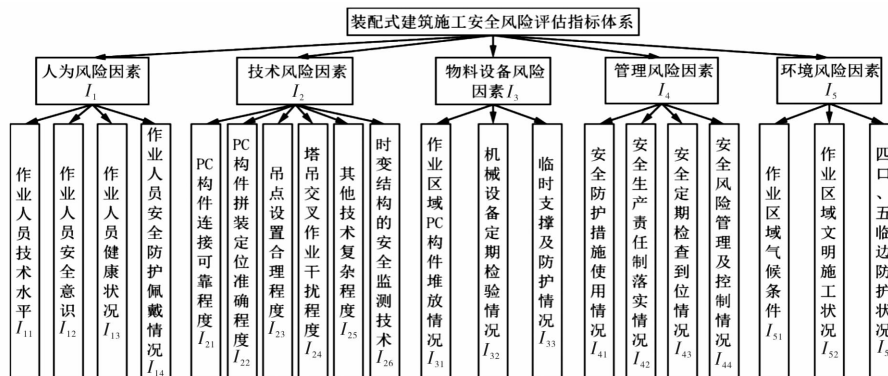


图1 装配式建筑施工安全风险评估指标体系

Fig.1 Construction safety risk assessment index system of prefabricated building

装配式建筑施工安全风险评估中,通过分级标准量化法将每个指标分为4个等级,将定性指标

转化为半定量指标,每个等级评分标准见表1.

表1 安全风险分级标准

Tab. 1 Safety risk grading standards

等级	描述	评分标准
I级	安全风险较低	9.0~10.0
II级	安全风险一般	7.0~8.9
III级	安全风险较高	6.0~6.9
IV级	安全风险高	<6.0

根据上述有关单指标测度函数的定义和评估指标的评分标准,可构建装配式建筑施工安全风险指标的测度函数。本文所研究的未确知测度函数采用直线型,构造出的各单因素评估指标的未确知测度函数如下:

$$\mu_{ij1} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 7.95 \\ \frac{x_{ij} - 7.95}{1.55}, & 7.95 < x_{ij} \leq 9.50 \\ 1, & x_{ij} > 9.50 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{ij2} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 6.45 \text{ 或 } x_{ij} > 9.50 \\ \frac{x_{ij} - 6.45}{1.50}, & 6.45 < x_{ij} \leq 7.95 \\ \frac{9.50 - x_{ij}}{1.55}, & 7.95 < x_{ij} \leq 9.50 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{ij2} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 3.00 \text{ 或 } x_{ij} > 7.95 \\ \frac{x_{ij} - 3.00}{3.45}, & 3.00 < x_{ij} \leq 6.45 \\ \frac{7.95 - x_{ij}}{1.50}, & 6.45 < x_{ij} \leq 7.95 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{ij1} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq 3.00 \\ \frac{6.45 - x_{ij}}{3.45}, & 3.00 < x_{ij} \leq 6.45 \\ 0, & x_{ij} > 6.45 \end{cases} \quad (12)$$

本文单因素指标测度函数,用图形来表示,即如图2所示。

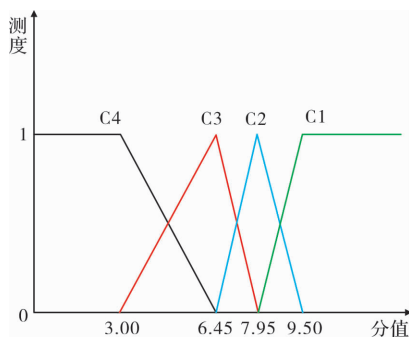


图2 单因素指标测度函数

Fig. 2 Single factor index measurement function

3 工程实例分析

为验证模型的有效性和可行性,本文选用本人实际参与的某ZT装配式住宅为案例,进行未确知测度理论模型的运用和分析。通过邀请9位相关专家进行打分,并采取去头、去尾再均分的数据统计原则,最后得出各个评估指标的取值,见表2。

表2 某装配式住宅施工安全风险评估指标取值

Tab. 2 Construction safety risk assessment

index value of prefabricated house

指标	取值	指标	取值	指标	取值	指标	取值
I_{11}	7.6	I_{22}	8.2	I_{31}	6.6	I_{43}	7.4
I_{12}	6.8	I_{23}	8.0	I_{32}	6.8	I_{44}	7.2
I_{13}	8.9	I_{24}	7.5	I_{33}	7.2	I_{51}	6.9
I_{14}	7.0	I_{25}	8.1	I_{41}	7.5	I_{52}	7.1
I_{21}	8.6	I_{26}	7.4	I_{42}	7.1	I_{53}	8.3

3.1 计算单指标未确知测度矩阵

根据单指标测度函数的定义和表1的分级标准,运用表2中的各个指标值带入图2构造的未确知测度函数,得到该装配式住宅楼的单指标未确知测度矩阵。

$$\mu_{20 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.77 & 0.23 & 0 \\ 0 & 0.23 & 0.77 & 0 \\ 0.61 & 0.39 & 0 & 0 \\ 0 & 0.37 & 0.63 & 0 \\ 0.42 & 0.58 & 0 & 0 \\ 0.16 & 0.84 & 0 & 0 \\ 0.03 & 0.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0.70 & 0.30 & 0 \\ 0.10 & 0.90 & 0 & 0 \\ 0 & 0.63 & 0.37 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.90 & 0 \\ 0 & 0.23 & 0.77 & 0 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.70 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0.43 & 0.57 & 0 \\ 0 & 0.63 & 0.37 & 0 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.30 & 0.70 & 0 \\ 0 & 0.43 & 0.57 & 0 \\ 0.23 & 0.77 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 确定指标权重

根据熵权法的思路,由单指标测度矩阵中的数据计算各指标的权重为: $w = (0.051, 0.051, 0.045, 0.046, 0.044, 0.056, 0.071, 0.048, 0.062, 0.046, 0.061, 0.051, 0.044, 0.048, 0.044, 0.046, 0.044, 0.048, 0.044, 0.051)$ 。

3.3 计算多指标综合测度评估向量

根据单指标未确知测度矩阵和各指标权重,

可得到该装配式建筑施工安全风险的多指标综合测度评估向量为

$$\mu_{1 \times 4} = \{0.075, 0.564, 0.361, 0.000\} \quad (14)$$

3.4 置信度识别

取置信度 $\lambda = 0.6$, 根据式(8), 结合已得到的多指标综合测度评估向量, 当 $p_0 = 2$ 时, 从小到大, $0.075 + 0.564 = 0.639 > 0.6$, 即施工安全风险等级为 II 级; 从大到小 $0.0361 + 0.564 = 0.925 > 0.6$, 即施工安全风险等级为 II 级。综合两次结果, 判定该装配式建筑施工安全风险评估等级为 II 级。

3.5 结果分析

由结果可知, 该 ZT 装配式住宅施工过程安全风险等级为 II 级, 即安全风险一般, 处于可接受的状态。本文采用置信度识别准则, 评估结果与实际情况吻合度较高, 结果合理可信。

说明基于熵权-未确知测度理论可用于装配式建筑施工过程中的安全风险评估。

4 结论

(1) 不同于一般现浇式建筑施工, 装配式建筑施工安全的影响因素众多且具有复杂性和不确定性。本文选用涉及人、技术、物料、设备、管理、环境等方面的诸多因素作为评估指标, 进行装配式建筑的施工过程安全风险评估。

(2) 采用熵权法来确定各个评估指标的权重, 充分利用了单指标未确知测度矩阵的数值, 减少了很多主观因素对评估结果的影响, 克服了传统方法确定权重的主观性、局限性问题, 使评估结果更加客观科学。

(3) 考虑到装配式建筑施工中的诸多不确定性, 将未确知测度理论应用于装配式建筑施工安全风险评估中, 建立了基于熵权-未确知测度理论的装配式建筑施工安全风险评估模型, 并将其应用于工程项目, 结果合理可信, 能为有效进行装配式建筑施工安全风险评估提供了新的思路, 并能为安全管理工作提供可靠依据。

参考文献 References

- [1] 吴凤平, 徐辉英, 卢佳宇, 等. PC 住宅楼工程施工现场安全管理探讨[J]. 建筑安全, 2016(4):16-19.
WU Fengping, XU Huiying, LU Jiayu, et al. Discussion on construction site safety management of PC residential building[J]. Construction Safety, 2016(4):16-19.
- [2] 黄桂林, 胡明路. 基于可拓学理论的装配式住宅施工

过程安全风险评价研究[J]. 工业安全与环保, 2017(2):33-38.

HUANG Guilin, HU Minglu. Research on safety risk assessment in prefabricated residential construction process based on extension theory[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017(2):33-38.

- [3] 汤彦宁. 基于系统动力学的装配式住宅施工安全风险研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
TANG Yanning. Research on estimation of construction safety risks for prefabricated housing based on system dynamics[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. and Tech., 2015.
- [4] 李高锋, 施佳呈, 郝风田, 等. 浅析预制装配式住宅施工安全管理与措施[J]. 价值工程, 2016(24):316-318.
LI Gaofeng, SHI Jiacheng, HAO Fengtian, et al. Construction safety management research of prefabricated residential building and measures[J]. Value Engineering, 2016(24):316-318.
- [5] 李颖, 李峰, 邹宇, 等. 预制装配式混凝土建筑施工安全 and 质量评估[J]. 建筑技术, 2016(4):305-309.
LI Ying, LI Feng, ZOU Yu, et al. Evaluations of safety and quality performances of precast concrete construction[J]. Architecture Technology, 2016(4):305-309.
- [6] 刘迪. 装配式混凝土建筑的安全施工管理[J]. 建筑施工, 2016(7):991-992.
LIU Di. Safety construction management of fabricated concrete building[J]. Building Construction, 2016(7):991-992.
- [7] 陈伟, 付杰, 熊付刚, 等. 装配式建筑工程施工安全灰色聚类测评模型[J]. 中国安全科学学报, 2016(11):70-75.
CHEN Wei, FU Jie, XIONG Fugang, et al. Grey clustering evaluation model for construction safety of fabricated building project[J]. China Safety Science Journal, 2016(11):70-75.
- [8] 罗杰, 宋发柏, 沈李智, 等. 装配式建筑施工安全管理若干要点研究[J]. 建筑安全, 2016(8):19-25.
LUO Jie, SONG Fabai, SHEN Lizhi, et al. Research on some key points of safety management of fabricated construction[J]. Construction Safety, 2016(8):19-25.
- [9] 杨爽. 装配式建筑施工安全评价体系研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2016.
YANG Shuang. Safety evaluation system of prefabricated building construction[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.
- [10] 田黎. 预制装配式混凝土(PC)住宅营建过程风险管理方法与策略[D]. 上海:华东理工大学, 2014.
TIAN Li. Risk Management methods and strategies for prefabricated concrete residence construction[D].

- Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [11] 张文佳,李慧民,赵地. 基于可信性测度理论的装配式建筑施工过程风险性评估[J]. 工业安全与环保, 2017,43(8):13-17,86.
- ZHANG Wenjia, LI Huimin, ZHAO Di. Risk assessment of prefabricated construction process based on the credibility measure[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017,43(8):13-17,86.
- [12] 王光远. 未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990,23(4):1-8.
- WANG Guangyuan. Uncertainty Information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990,23(4):1-8.
- [13] 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.
- [14] 阳富强,吴超. 基于未确知测度理论的硫化矿石爆堆自燃危险性评价[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010,41(6):2373-2380.
- YANG Fuqiang, WU Chao. Risk assessment on spontaneous combustion of sulfide ore dump in stope based on uncertainty measurement theory [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010,41(6):2373-2380.
- [15] 宫凤强,李夕兵,董晓军,等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(2):323-330.
- GONG Fengqiang, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2):323-330.
- [16] 王新民,王石,鄢德波,等. 基于未确知测度理论的充填管道堵塞风险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2012,22(4):151-156.
- WANG Xinmin, WANG Shi, YAN Debo, et al. Risk assessment on blocking of filling pipeline based on uncertainty measurement theory [J]. China Safety Science Journal, 2012,22(4):151-156.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 354 页)

- [11] 杨明辉,李军,赵明华. 考虑侧阻增强效应的基桩极限承载力解析算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(5): 1032-1038.
- YANG Minghui, LI Jun, ZHAO Minghua. Analytical algorithm for ultimate bearing capacity of piles based on lateral resistance enhancement effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, (5): 1032-1038.
- [12] 高翔,张可能,郭勇,等. 考虑负摩阻力的刚性桩复合地基桩土应力比计算[J]. 四川建筑科学研究, 2016 (2):64-69.
- GAO Xiang, ZHANG Keneng, GUO Yong, et al. Calculation of pile-soil stress ratio of rigid pile composite foundation based on negative friction[J]. Sichuan Architectural Science Research, 2016(2): 64-69.
- [13] 张钦喜,刘新. CFG 桩复合地基承载力计算新公式模拟研究[J]. 广东土木与建筑, 2014(2):3-6.
- ZHANG Qinxi, LIU Xin. A simulation study of a new formula for calculating the bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. Guangdong Civil and Architecture, 2014(2): 3-6.
- [14] 张钦喜,郑玉苹,陈鹏. CFG 桩复合地基沉降计算方法的修正[J]. 岩土工程技术, 2015(2):100-104.
- ZHANG Qinxi, ZHENG Yuping, CHEN Peng. Modification of settlement calculation method for CFG pile composite foundation [J]. Geotechnical Engineering Technology, 2015(2): 100-104.
- [15] 佟建兴,胡志坚,闫明礼,等. CFG 桩复合地基承载力确定[J]. 土木工程学报, 2005(7):87-91.
- TONG Jianxing, HU Zhijian, YAN Mingli, et al. Determination of bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. Journal of Civil Engineering, 2005(7): 87-91.

(编辑 吴海西 沈 波)