

基于全生命周期与复杂系统脆性理论的高层建筑 铝模板坍塌事故安全评价

李强年, 田嘉玉

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030, E-mail: tianjy0502@163.com)

摘 要:为解决高层建筑施工中频发的铝模板坍塌事故,根据相关规范及全生命周期理论将铝模板坍塌过程定义为设计及方案编制、原材料采购、施工及管理、运营维护、拆除 5 个阶段,由事故调查统计总结出 22 个发生频率较高的铝模板坍塌事故致因因素;运用事故树分析方法(FTA)对以上因素进行梳理,结合改进层次分析法得出各级因素的权重,再基于复杂系统脆性理论进行权重分析,并采用模糊综合评价法(FCE)对铝模板的安全程度进行定量评价。结果表明,该评价模型适用于一般的铝模板工程,对找出工程中的潜在坍塌风险从而减少坍塌事故具有一定的理论指导和实践意义。

关键词: 铝模板; 全生命周期; 复杂系统脆性; 事故树

中图分类号: TU714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-8859(2022)04-105-06 **DOI:** 10.13991/j.cnki.jem.2022.04.019

Safety Evaluation of Aluminum Formwork Collapse Accidents for High-rise Buildings Based on the Theory of Full Life Cycle and Complex System Brittleness

LI Qiang-nian, TIAN Jia-yu

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730030, China, E-mail: tianjy0502@163.com)

Abstract: To solve the frequent aluminum formwork collapse accidents in the construction of high-rise buildings, this study defines the processes of aluminum formwork collapse as five stages, including design and program preparation, raw material procurement, construction and management, operation and maintenance, and demolition based on relevant specifications and the whole life cycle theory. 22 high-frequency cause factors for aluminum formwork collapse accident were summed up by accident investigation and statistics, and the above factors were sorted out by the FTA method. Afterwards, the weights of the factors at all levels were obtained by the improved AHP, and then the weights are analyzed based on the brittleness theory of complex systems. Finally, the safety degree of the aluminum formwork is quantitatively evaluated using the Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE) method. The results show that the evaluation model is suitable for general aluminum formwork projects. It has theoretical guidance and practical contributions for identifying potential collapse risks in projects and reducing collapse accidents.

Keywords: aluminum formwork; full life cycle; brittleness of complex systems; accident tree

建筑事故“五大伤害”中的坍塌事故一旦发生会造成群死群伤的后果,不仅会危害人员的身体健康,还会带来不可估量的经济损失,影响社会的稳定^[1]。铝模板作为一种绿色环保的建筑材料在工程中得到了广泛使用,具有重量轻、刚度高、循环使用次数多、施工方便安全等特点,但其坍塌事故近年来也常有发生。

目前,我国针对建筑工程中的坍塌事故印发了《建筑工程预防坍塌事故若干规定》,先后颁布了《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ162-2008)、《建筑施工模板和脚手架试验标准》(JGJ/T414-2018)等。学术研究方面,张军等^[2]在 2007 年最先用事故树分析找出模板坍塌导致伤亡率高的原因及预防事故的有效途径。徐桂花等^[1]总结出我国 4 种主要坍塌事故类型,并对其成因及对应的防治措施进行阐述。何芳东等^[3]从多方面对比统计 5 年间的模板

收稿日期: 2022-02-30.

基金项目: 甘肃省住房和城乡建设厅项目(JK2019-24).

支撑体系坍塌事故,提出了针对性预防措施。彭蔚锋^[4]对 3 种危害率较高的坍塌事故危险源进行分析,通过粗糙集理论和模糊综合评价对建筑工程中的坍塌事故危险源进行安全评价。李卉^[5]基于事故致因理论,构建了一个模板坍塌事故致因链,为解决现实问题提供了新思路。

综上,研究内容基本集中在模板坍塌事故影响因素识别等方面,从全生命周期的角度来进行某类模板坍塌事故的安全评价研究较少。鉴于此,本文针对一般高层建筑工程中常见的铝模板,结合复杂系统脆性理论,从全生命周期角度建立了以事故树与层次分析法结合确定权重、模糊综合评价法进行评价的综合评价模型。该模型能够针对性分析铝模板工程,并对事故潜在致因进行管控,以期为我国建筑工程中的铝模板坍塌事故研究和相关管理人员提供参考。

1 研究理论和方法

1.1 全生命周期理论

模板工程在建设工程施工中具有循环、重复作业等特点。因此,本文将全生命周期理论运用到对高层建筑铝模板工程的安全评价中,有助于更全面地对其进行系统性分析。从全生命周期角度出发,在前期设计时可以进行主动控制、在施工运营及拆除阶段可以进行被动控制,两种控制相结合可以更好地防治铝合金模板坍塌事故。

1.2 复杂系统脆性理论

复杂系统指的是数量一定且内部各要素之间存在耦合作用的系统,在复杂系统中,当其一个子系统在受到外力打击或内力作用下发生子系统崩溃现象,与之进行物质信息交换的各子系统也因此崩溃,从而导致复杂系统整体崩溃,这就是“复杂系统的脆性”^[6]。因此,将铝模板工程和复杂系统脆性理论相结合,分析各子系统相互关联性以及在复杂系统中的诱发条件,可以防微杜渐、科学有效地提出措施来防止模板工程这一复杂系统发生一系列崩溃现象。

1.3 事故树分析方法

事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA),又称故障树分析,是一种图形演绎的故障分析方法。它不仅能详细找出系统各种潜在的危险因素,还能简洁形象地表示出事故和各种原因之间的因果逻辑关系。因此,本文运用事故树分析方法来分析高层建筑铝模板坍塌事故和原因之间的逻辑关系,计算

各因素的结构重要度^[7]。

1.4 改进层次分析法

本文将事故树分析方法和层次分析模型相结合,根据事故树算出各阶段每个因素结构重要度求和,构造判断矩阵进行两两比较,代替了专家打分环节,相对于传统方法更客观具体。

1.5 模糊综合评价法(FCE)

模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)是一种基于模糊数学的综合评价方法。它具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决^[8]。基于此,本文将多级模糊综合评价法应用于铝模板坍塌的安全评价中。

多级模糊综合评价的一般步骤:

(1)将因素 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 划分为若干组,得到 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$, 其中 $U=\sum_{i=1}^k U_i$, $U_i \cap U_j = \Phi(i, j)$, 称 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ 为第一级因素集。

(2)设评语集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 先对第二级因素集 $U_i=\{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_n^{(i)}\}$ 的 n_i 个因素进行单因素评判,得到单因素评判矩阵:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{11}^{(i)}, r_{12}^{(i)}, \dots, r_{1m}^{(i)} \\ r_{21}^{(i)}, r_{22}^{(i)}, \dots, r_{2m}^{(i)} \\ \vdots \\ r_{n_i 1}^{(i)}, r_{n_i 2}^{(i)}, \dots, r_{n_i m}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

设 $U_i=\{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_n^{(i)}\}$ 的权重为 $A=\{a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_n^{(i)}\}$, 求得综合评价为

$$B_i = A \cdot R_i (i=1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

(3)对一级因素集 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ 作综合评价,设其权重为 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, 则总评判矩阵

$$\text{为: } R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_k \end{pmatrix}, \text{ 从而得出综合评价为 } B = A \cdot R \text{ 按最}$$

大隶属度原则即得相应结果。

2 铝模板坍塌事故评价模型构建

2.1 识别铝模板坍塌事故致因因素

本文检索了住建局、中国安全生产网等网站 2017~2019 这 3 年内发生的铝模板坍塌事故共 60 起,根据事故调查报告找出所有致因因素共 40 个,利用统计学中的集中趋势分析对致因因素出现频数进行统计,筛选出其中出现较多的 22 项因素,结果如图 1 所示。



图1 铝模板坍塌事故频数分布统计图

将铝模板工程全生命周期划分为5个阶段,即设计及方案编制阶段、原材料采购阶段、施工及管理阶段、运营维护阶段及拆除阶段。筛选出的22项致因因素根据铝模板工程施工规范及施工组织设计进行归纳整理,如表1所示。由表1中列举出的致因因素,建立事故树图,并构建层次分析模型^[7]。

2.2 事故树分析

以模板坍塌事故为顶事件,根据表1归纳总结导致顶事件发生的所有底事件,按照生产安全事故原则,以“人的不安全行为”和“物的不安全状态”为基础编制事故树图如图2所示。

2.2.1 利用布尔代数运算求最小割集

在事故树中,把引起顶事件发生的基本事件的集合称为割集。一个事故树中的割集一般不止一个,在这些割集中,凡不包括其他割集的叫作最小割集。利用布尔代数运算求得顶事件的最小割集如下:

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 \times A_2 \\
 &= (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) (B_5 + B_6 + B_7 + X_{41}) \\
 &= (X_{11} + X_{12} + X_{42} + X_{33} + X_{34} + X_{13} + X_{31} + X_{36} + X_{39} \\
 &\quad + X_{23} + X_{35}) \times (X_{21} + X_{22} + X_{32} + X_{37} + X_{38} + X_{43} + X_{44} \\
 &\quad + X_{45} + X_{51} + X_{52} + X_{41})
 \end{aligned}$$

化简之后可得顶事件 T 有121组割集,且这121组割集都是最小割集,说明导致模板坍塌事故发生的可能因素有121种。

2.2.2 求最小径集

最小径集是保证顶事件不发生的充分必要条件,与最小割集具有对偶性。该模型直接用最小割集求解过于复杂,因此使用最小径集求结构重要度

表1 铝模板坍塌致因因素

阶段	序号	含义	来源
设计及方案编制	X_{11}	铝模板施工组织设计不合理	GB50204-2020、JGJT429-2018
	X_{12}	铝模板深化设计不符规范	JGJT429-2018、JGJ162-2014
	X_{13}	技术交底落实不到位	JGJT429-2018、JGJ162-2014
原材料采购	X_{21}	支撑架及连接件材质不合格	GB50204-2020、[6]、[9]
	X_{22}	铝模板强度未达到设计要求	GB50204-2020、[6]、[9]
	X_{23}	重复使用材料未定期检查维护	GB50204-2020、[6]、[9]
施工及管理	X_{31}	现场搭设不符合设计及规范要求	JGJT429-2018、[6]
	X_{32}	铝模板临时堆放不合理	JGJT429-2018、JGJ162-2014
	X_{33}	施工单位资质核查未通过	GB50204-2020、[11]
运营维护	X_{34}	对违规施工未及时制止	GB50204-2020、[11]
	X_{35}	搭设过程质量控制验收未完成	JGJT429-2018、JGJ162-2014
	X_{36}	现场管理协调不力	GB50204-2020
拆除	X_{37}	安全防护设施不到位	[6]、[9]
	X_{38}	安装时未设置临时固定设施	JGJT429-2018、JGJ162-2014
	X_{39}	作业人员未进行安全培训及交底	[6]、[9]
运营维护	X_{41}	现场作业条件差	GB50204-2020、[5]
	X_{42}	浇筑方式设计不合理	JGJ162-2014、[11]
	X_{43}	模板拼缝不严	JGJT429-2018、JGJ162-2014
运营维护	X_{44}	模板固定不牢	JGJT429-2018、JGJ162-2014
	X_{45}	振捣过程不合理	JGJT429-2018、JGJ162-2014
拆除	X_{51}	模板及支架拆除过早	GB50204-2020、[12]
	X_{52}	拆模顺序不当	GB50204-2020、[12]

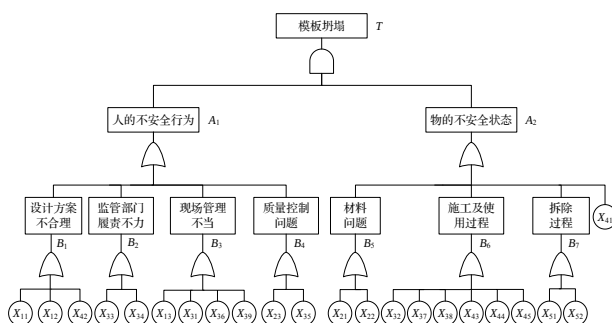


图2 铝模板坍塌事故树图

的方法,即通过逻辑门转换将模板坍塌事故树变为成功树,求出该成功树的最小割集即原事故树的最小径集。利用布尔运算求解如下:

$$\begin{aligned}
 T &= A'_1 + A'_2 \\
 &= B'_1 \cdot B'_2 \cdot B'_3 \cdot B'_4 + B'_5 \cdot B'_6 \cdot B'_7 \cdot X'_{41} \\
 &= X'_{11} X'_{12} X'_{42} X'_{33} X'_{34} X'_{13} X'_{31} X'_{36} X'_{39} X'_{23} X'_{35} \\
 &\quad + X'_{21} X'_{22} X'_{32} X'_{37} X'_{38} X'_{43} X'_{44} X'_{45} X'_{51} X'_{52} X'_{41}
 \end{aligned}$$

即事故树的最小径集有两组, 分别为:

$$P_1 = \{X_{11}, X_{12}, X_{42}, X_{33}, X_{34}, X_{13}, X_{31}, X_{36}, X_{39}, X_{23}, X_{35}\}$$

$$P_2 = \{X_{21}, X_{22}, X_{32}, X_{37}, X_{38}, X_{43}, X_{44}, X_{45}, X_{51}, X_{52}, X_{41}\}$$

2.2.3 结构重要度分析

结构重要度不考虑基本事件自身发生的概率, 仅根据事件的结构来分析各基本事件(底事件)对顶上事件发生所产生的重要程度。查阅文献可知结构重要度如下^[13]:

$$I_{\Phi(n)} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} (j \in k_j) \quad (3)$$

式中, K 为最小径集总数; n_j 为第 i 个基本事件所在 k_j 的基本事件总数。

根据最小径集求结构重要度可得:

$$I_{\Phi(11)} = I_{\Phi(12)} = I_{\Phi(42)} = I_{\Phi(33)} = I_{\Phi(34)} = I_{\Phi(13)} = I_{\Phi(31)} = I_{\Phi(36)}$$

$$= I_{\Phi(39)} = I_{\Phi(23)} = I_{\Phi(35)} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{11} = \frac{1}{22}$$

$$I_{\Phi(21)} = I_{\Phi(22)} = I_{\Phi(32)} = I_{\Phi(37)} = I_{\Phi(38)} = I_{\Phi(43)} = I_{\Phi(44)} = I_{\Phi(45)}$$

$$= I_{\Phi(51)} = I_{\Phi(52)} = I_{\Phi(41)} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{11} = \frac{1}{22}$$

2.3 确定指标权重

2.3.1 建立层次分析模型

本文基于事故树结构分析建立铝模板坍塌事故的层次分析模型, 该模型分为目标层、准则层和指标层。准则层从铝模板全生命周期角度出发, 通过查阅文献及相关规范将其全过程分为设计及方案编制阶段、原材料采购阶段、施工及管理阶段、运营维护阶段和拆除阶段; 指标层包括 22 项影响因素。

2.3.2 构建判断矩阵

传统的层次分析构造判断矩阵时利用 1~9 标度来进行评分, 具有很强的主观性; 将事故树分析方法和层次分析模型相结合, 通过比较各因素的结构重要度判断因子来确定判断矩阵, 相对于传统方法更为客观具体^[14]。

通过式(3)算出的各因素的结构重要度, 求出各个结构重要度分母的最小公倍数 L , 利用下式求出各因素的判断因子 $C^{[15]}$:

$$C(i) = I_{\Phi}(i) \cdot L \quad (4)$$

判断因子即各因素相对重要程度, 由于准则层下有不同的指标层, 利用相应准则层下指标层各判断因子的和, 即 $\sum_{i=1}^n C(i)$ 来进行两两比较, 可以构建出准则层的判断矩阵^[16], 最后运用 Matlab 软件计算出相应因素权重如表 2 所示。

先求出最小公倍数 $L=120$, 对于准则层:

表 2 准则层判断矩阵

准则层	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	W_i
X_1	1.00	1.00	0.33	0.60	1.50	0.1364
X_2	1.00	1.00	0.33	0.60	1.50	0.1364
X_3	3.00	3.00	1.00	1.80	4.50	0.4091
X_4	1.67	1.67	0.56	1.00	2.50	0.2273
X_5	0.67	0.67	0.22	0.40	1.00	0.0909
$CI=0$, 满足一致性检验						

设计及方案编制阶段 X_1 :

$$C(X_1) = \sum_{i=1}^3 C(i) = 120 \times \frac{1}{22} \times 3 = \frac{180}{11}$$

原材料采购阶段 X_2 :

$$C(X_2) = \sum_{i=1}^4 C(i) = 120 \times \frac{1}{22} \times 2 + 120 \times \frac{1}{22} = \frac{180}{11}$$

施工及管理阶段 X_3 :

$$C(X_3) = \sum_{i=1}^4 C(i) = 120 \times \frac{1}{22} \times 7 + 120 \times \frac{1}{22} \times 2 = \frac{540}{11}$$

运营维护阶段 X_4 :

$$C(X_4) = \sum_{i=1}^4 C(i) = 120 \times \frac{1}{22} + 120 \times \frac{1}{22} \times 4 = \frac{300}{11}$$

拆除阶段 X_5 :

$$C(X_5) = \sum_{i=1}^4 C(i) = 120 \times \frac{1}{22} \times 2 = \frac{120}{11}$$

根据对铝模板坍塌事故文献分析及数据统计结果确定指标层单一权重, 得出指标层权重如表 3 所示。

表 3 铝模板坍塌事故评价指标及权重

准则层	权重	指标层	单一权重	总权重
X_1	0.1364	X_{11}	0.30	0.0409
		X_{12}	0.36	0.0491
		X_{13}	0.34	0.0464
		X_{21}	0.35	0.0477
		X_{22}	0.31	0.0423
X_2	0.1364	X_{23}	0.34	0.0464
		X_{31}	0.14	0.0573
		X_{32}	0.11	0.0450
		X_{33}	0.08	0.0327
		X_{34}	0.12	0.0491
X_3	0.4091	X_{35}	0.14	0.0573
		X_{36}	0.09	0.0368
		X_{37}	0.13	0.0532
		X_{38}	0.07	0.0286
		X_{39}	0.12	0.0491
X_4	0.2273	X_{41}	0.22	0.0500
		X_{42}	0.22	0.0500
		X_{43}	0.19	0.0432
		X_{44}	0.19	0.0432
		X_{45}	0.18	0.0409
X_5	0.0909	X_{51}	0.51	0.0464
		X_{52}	0.49	0.0445

2.3.3 权重分析

由表 3 可知, X_{31} 、 X_{35} 两项在指标权重表中得分较高, 分别为现场搭建是否符合设计及规范、搭

设过程质量验收是否完成。结合复杂系统脆性理论,这两项都是铝模板工程的子系统,现场搭设不符合设计及规范和搭设过程质量验收未完成这两个子系统会导致后续施工搭设过程、使用和拆除过程中发生坍塌现象,存在很大的风险隐患。权重较高的子系统若不加以控制,会导致其相互影响的各阶段子系统产生错误,通过一系列连锁反应最终导致铝模板坍塌事故发生。因此,对这两项指标进行控制可以有针对性降低事故发生可能性。

3 案例分析

3.1 工程简介

兰州新区某保障房项目为二类居住用地,总建筑面积约 48 万 m^2 ;该项目由 40 个建筑单体工程组成,其中包括 18 栋住宅楼、11 栋带底层商业的住宅楼、1 栋综合服务中心、1 栋租赁式住房(框架结构),1 栋租赁式公寓等。项目由某国企施工单位承建,于 2019 年 10 月开工,2021 年 4 月完工。

3.2 模板坍塌事故安全评价

3.2.1 确定因素集 U

在模板坍塌事故中,因素集就是导致铝模板坍塌的各基本事件,也是表中的各项评价指标^[14]。本模型的因素集共有三级,第一级因素集为 $U = \{U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3}, U_{x_4}, U_{x_5}\}$;第二级因素集即 $U_{x_1} = \{U_{x_{11}}, U_{x_{12}}, U_{x_{13}}\}$ 等。

3.2.2 确定评语集 V

根据建筑施工易发事故防治安全标准^[20],本文将铝模板坍塌事故评语集划分为 5 个等级 $V = \{\text{安全}, \text{较安全}, \text{一般安全}, \text{较不安全}, \text{不安全}\}$,相应评语对应分值如表 4 所示。

表 4 评语级别分布

分值	中间值 V	评分标准
81~100	90	非常安全
61~80	70	较安全
41~60	50	基本安全
21~40	30	较不安全
<20	10	不安全

3.2.3 确立评价样本矩阵

拟从社会各界邀请对建筑施工过程及建筑安全生产事故有着深入了解的 80 名工人、专家及学者来对每一个二级指标进行评价,参与评价人员基本情况如表 5 所示。其中,经过调查经历过安全生产事故的人数为 55 人,占比 68.75%。由此可见,调研对象具有全面性。

例 $RX_{11} = \{0.2, 0.4, 0.4, 0, 0\}$ 为上述人员在对 X_{11}

表 5 评价人员基本情况

来源	岗位	人数	学历	工作年限
施工单位	项目经理	2	本科及以上	7~9 年
	技术员	8	本科	1~3 年
	安全员	6	本科	1~3 年
	基层工人	40	大专	4~6 年
业主单位	管理人员	4	本科及以上	4~6 年
监理单位	监理员	5	本科及以上	1~3 年
设计单位	工程师	5	本科及以上	4~6 年
高校	老师	4	研究生及以上	10 年及以上
	学生	6	研究生及以上	

项进行评价时,有 20%的人认为该项非常安全,40%的人认为较安全,40%的人认为一般安全,0 人认为其较不安全,0 人认为其不安全。

根据上述说明,对收集到的打分原始数据所建立的样本矩阵进行归一化后结果如下:

$$\begin{aligned}
 RX_1 &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}, RX_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\
 RX_3 &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.6 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.0 & 0.0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}, RX_4 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\
 RX_5 &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

根据式(2)可得:

$$B_{X_1} = X_1 \times R_{X_1} = (0.3060, 0.4700, 0.2240, 0.0, 0.0)$$

$$B_{X_2} = X_2 \times R_{X_2} = (0.3660, 0.4010, 0.2330, 0.0, 0.0)$$

$$B_{X_3} = X_3 \times R_{X_3} = (0.3480, 0.4330, 0.2190, 0.0, 0.0)$$

$$B_{X_4} = X_4 \times R_{X_4} = (0.4060, 0.4150, 0.1790, 0.0, 0.0)$$

$$B_{X_5} = X_5 \times R_{X_5} = (0.5000, 0.3510, 0.1490, 0.0, 0.0)$$

则根据以上可以得出一级模糊判断矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} B_{X_1} \\ B_{X_2} \\ B_{X_3} \\ B_{X_4} \\ B_{X_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3060 & 0.4700 & 0.2240 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3660 & 0.4010 & 0.2330 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3480 & 0.4330 & 0.2190 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.4060 & 0.4150 & 0.1790 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.5000 & 0.3510 & 0.1490 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

由上 $W_i = (0.1250, 0.1417, 0.3917, 0.2417, 0.1000)$

则二级模糊综合评判为:

$$B = X \times R = (0.3746, 0.4206, 0.2050, 0.0, 0.0)$$

最终模糊综合评价为 C : $C = B \times V^T = 73.3988$, 即该项目铝模板坍塌事故安全性评价得分 73.3988 分,安全程度为较安全。

3.3 结果分析

虽然该工程项目铝模板坍塌事故整体评价为较安全,但 X_{11} 、 X_{36} 这两项评价最终得分为 66 分,安全等级为基本安全,此项为该工程模板安全评价中得分最低的一项,需要提出相应的整改措施,具体分析如下:

(1) 针对评价较低的 X_{11} 项施工组织设计不合理,仅有 16 人对其打分为安全,说明方案编制存在问题。施工组织设计可以为拟建工程做出全面合理符合安全要求的计划安排,其重要性不言而喻。通过实地调研考察该项目发现该工程延期较长,直接导致费用增加、工人工资拖欠等经济损失,会造成影响工程质量和进度的严重后果。针对该问题进行整改,一是制定出在各层面都能合理实施的施工组织设计,以此来规避工程中的成本损失和不必要的工期拖延;二是加强对施工现场的管理与控制,避免造成材料浪费及施工现场环境不良的现象;三是注重加强施工组织设计编制人员的专业素养,加强各部门各阶段的相互交流与协作。

(2) 针对评价较低的 X_{36} 现场管理协调不力,评价得分为 66 分,安全评价等级为一般安全,说明该项目现场管理存在漏洞。铝模板工程的施工露天高空作业多,多工种联合作业,人员流动大,是事故隐患多发地段。加强建设单位现场管理协调能力不仅可以降低事故发生率,还可以提高工程质量和作业效率。此外,施工现场沟通及时、管理到位能改善人、物、环境三方面的结合状态,减少或消除施工现场的无效劳动,降低材料的浪费消耗,真正做到为施工企业节支增收。

4 结语

本文从全生命周期角度分析指标,对指标权重结合复杂系统脆性理论进行分析,更能精准找出各指标对每一阶段乃至整个系统产生的影响,对未来安全事故的评价研究提供参考。并且,在确定指标权重时采取事故树与层次分析相结合的方法,使得权重结果更客观。但是,本文仅统计了近 3 年内铝模板坍塌事故致因因素,数据样本量过少,精准性不高,未来需统计更多数据进行回归分析,深入挖掘模板坍塌的致因因素。在现场施工方面,利用智慧工地大数据平台和智慧工地全景监控系统等智能管理平台,结合 BIM、GIS 等技术,可以共享及备份数据、实现全天候现场监控,更精确地识别各部位安全隐患并加以控制;人员方面,对每个作业

人员进行 AI 模拟施工现场培训,设定培训合格标准,严格执行合格上岗制度,以期为安全管理提供参考。

参考文献:

- [1] 徐桂花,徐进,许高亮,等. 建筑施工现场坍塌事故调查研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(2): 119-122.
- [2] 张军,周晶,卢振勇. 事故树分析方法在建筑施工模板坍塌中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007(5): 706-708.
- [3] 何芳东,张潇,张伟,等. 模板支撑体系坍塌事故规律[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 137-145.
- [4] 彭蔚锋. 建筑工程坍塌事故危险源分析与评价研究[D]. 南京工业大学, 2012.
- [5] 李卉. 基于关联规则的建筑模板坍塌事故致因链研究[D]. 华侨大学, 2019.
- [6] 韦琦,金鸿章,郭健. 复杂系统崩溃的脆性致因的研究[J]. 系统工程, 2003, 21(4): 1-5.
- [7] 姚杰,任玉清,李玉伟. 基于事故树分析的海上交通事故的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(4): 348-352.
- [8] Mohandes S R, Sadeghi H, Mahdiyar A, et al. Assessing construction labours' safety level: a fuzzy MCDM approach[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 26(2): 175-188.
- [9] 刘春光,尹晓辉,浅议危险源辨识风险评价与生产安全[J]. 建筑安全, 2011(2): 52-54.
- [10] 王颂,张品,王雨枫. 基于事故树分析法的建筑施工安全评价研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(1): 140-144.
- [11] 刘浩研. 高支模坍塌事故致因分析与对策研究[D]. 中国矿业大学, 2019.
- [12] 陈宝春. 脚手架、模板工程安全事故原因分析及预防措施[J]. 工业建筑, 2005(5): 107-109.
- [13] 徐志胜,姜学鹏. 安全系统工程(第3版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [14] 石龙,张瑞芳,谢启源,等. 改进层次分析法在公共建筑火灾风险分析中的应用[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 329-336.
- [15] 王君莉. 煤矿电气火灾的 FTA-AHP 评价模型建构及应用[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 162-165.
- [16] Huang Z, Le T, Y Gao, et al. Safety assessment of emergency training for industrial accident scenarios based on analytic hierarchy process and gray-fuzzy comprehensive assessment[J]. IEEE Access, 2020, 8: 144767-144777.

作者简介:

李强年(1970-),男,副教授,研究方向:项目管理,装配式建筑施工技术等;

田嘉玉(1998-),通讯作者,女,硕士研究生,研究方向:项目管理,装配式建筑施工技术等。