

基于风险矩阵和层次分析法的现浇箱梁 模板支撑体系施工安全风险评估

王利杰

(1. 郑州大学 管理学院,河南 郑州 415000;2. 河南四达检测技术有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:在桥梁施工过程中,现浇箱梁模板支撑体系作为危险性较大的分部分项工程,施工过程中稍有不慎,极易造成各类安全事故,甚至是体系坍塌事故,引发群死群伤。文章结合相关规范及全生命周期理论,对模板支撑体系施工过程分析,并参考过往事故案例分析致因因素,运用L·S和AHP对各影响因素指标进行权重计算,借助实际项目施工案例对模板支撑体系安全程度进行定量安全评价,将所有致因因素排序,评估不同致因因素的风险等级,并结合实际,制定针对性对策措施,以期对模板支撑体系施工过程风险管控提出合理化建议。

关键词:模板支撑体系; 现浇箱梁; 风险评估; 风险矩阵; 层次分析法

中图分类号:TD926.4

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)03-0060-07

doi:10.13402/j.gejs.2024.03.039

Construction safety risk assessment of cast-in-place box girder formwork support system based on risk matrix and hierarchical analysis method

WANG Lijie

(1. School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 415000, Henan, China;

2. Henan Star Detection Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: In the process of bridge construction, the cast-in-situ box girder formwork support system is a sub-project with greater risk, and a little carelessness in the construction process can easily cause all kinds of safety accidents, and even system collapse accidents, causing mass deaths and injuries. Combined with the relevant specifications and the whole life cycle theory, the construction process of the formwork support system is analyzed. Referring to the past accident cases, the causal factors are analyzed. L·S and AHP are used to calculate the weights of each influencing factor index, and the safety degree of the formwork support system is quantitatively evaluated with the help of actual project construction cases. Finally, based on the results of the ranking of all causal factors, evaluate the risk level of different causal factors and formulate targeted countermeasures in the light of the actual situation, in order to put forward reasonable suggestions for the risk management and control of the formwork support system in the construction process.

Key words: formwork support system; cast-in-place box girder; risk assessment; risk matrix; hierarchical analysis method

现浇箱梁模板支撑体系施工作为道路桥梁施工中危险性较大的分部分项工程,其施工过程中的风险有害因素较多,一旦发生事故,极易造成

群死群伤,同时,还会带来不可估量的经济损失。尤其是近几十年来,体系坍塌事故常有发生。

目前,针对工程中各类模板支撑体系各类事

收稿日期:2023-10-12

作者简介:王利杰(1989—),男,助理工程师,从事工程项目管理方面的研究工作。

故频有发生的情况,我国也先后颁布了《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008)^[1]、《建筑施工模板和脚手架试验标准》(JGJ/T 414—2018)^[2]、《危险性较大的分部分项工程安全管理办法》^[3]等规范。与此同时,学术界对此也有较多的研究,张军等^[4]采用系统安全工程的事故树分析方法,阐述导致模板坍塌事故引起人员伤亡的主要原因,并找出事故预防的关键途径;何芳东等^[5]针对模板支撑体系坍塌事故多发的现状,基于其理论机理,对其事故规律研究分析,为进一步的研究积累数据基础;孙世梅等^[6]运用事故统计与分析方法,以行为安全“2-4”模型为理论依据对31起事故案例中的不安动作及规律进行研究,并提出相应措施。上述研究内容基本集中在坍塌事故影响因素识别分析方面。本文从模板支撑体系施工全过程着手,对跨路现浇箱梁模板支撑体系施工安全事故进行评价分析,并结合风险矩阵法和层次分析法建立评估模型,确定项目各指标因素权重,以期为实际施工项目中的潜在事故致因因素进行管控。

1 模板支撑体系施工坍塌事故风险辨识

为确保事故致因因素分析的合理性和有效性,特从安全管理网、易安网等专业网站中选取2015年—2022年发生的模板支撑体系坍塌事故案例86

起,分析其事故调查报告中的直接原因和间接原因;同时,结合工程实际和《生产过程危险和有害因素分类与代码》(GB/T 13861—2022)^[7],从方案设计到拆除全阶段分析可能造成模板支撑体系坍塌事故致因因素,构造风险评价结构,划分风险评价单元,建立模板支撑体系施工风险评价指标体系,如图1所示。

2 模板支撑体系施工坍塌风险评估模型建立

2.1 模板支撑体系施工坍塌风险矩阵分析

风险矩阵分析法作为一种风险可视化的工具,主要用于评估分析危险发生的可能性和伤害的严重程度,进而综合评估风险大小^[4]。模板支撑体系施工风险指标体系通过邀请安全专家、技术人员及现场人员分别进行综合打分,取每一项指标评分均值,得到各风险评价指标的严重程度 S 和事故发生的可能性 P 的具体数量值,然后计算对应风险评价指标的风险值 R ,具体表达式如式(1)所示,评价指标的严重程度 S 和事故发生的可能性 P 取值范围如表1所示。

$$L_i = f(P_i, S_i) \quad (1)$$

式中: L_i 为第 i 个评价指标的风险值; P_i 为第 i 个评价指标发生的可能性; S_i 为第 i 个评价指标的严重程度。

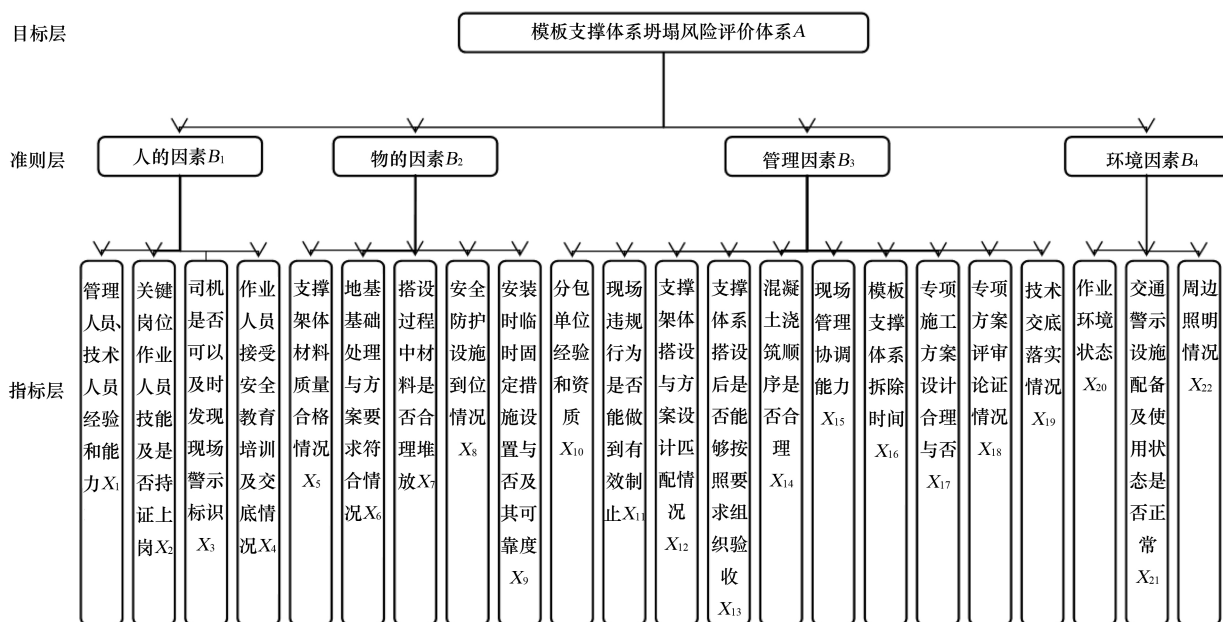


图1 模板支撑体系施工风险评价指标体系

表 1 评价指标的严重程度和事故发生的可能性分级量

指标名称	分级	指标值
严重程度	低	(0~1]
	较低	(1~2]
	严重	(2~3]
	较严重	(3~4]
	极严重	(4~5]
事故发生的可能性	几乎不发生	(0~1]
	可能发生	(1~2]
	偶尔发生	(2~3]
	可能性较大	(3~4]
	极可能发生	(4~5]

2.2 模板支撑体系施工风险层次分析法基本过程

2.2.1 层次分析法基本原理

层次分析法是定性分析与定量分析相结合的分析方法。在项目风险管理中,通过将复杂的风险问题分解成不同的组成因素,然后按支配关系分组形成有序的递阶层次结构,随后经两两比较方式,分析计算各要素的相对重要性,进而分析各评价因素相对重要性排序及风险水平的权重,并以此判断风险水平。

2.2.2 分析步骤

(1) 评价分析目标确定。根据模板支撑体系施工坍塌风险识别分析情况,将风险分析结果按照目标层、控制层、指标层 3 个层级进行划分,建立层次分析模型。在此模型中,最高层为目标层,只有一个元素,是分析问题的预定目标;中间层为准则层,有 4 个指标,是实现目标所涉及的中间环节;最底层为方案层,主要包括实现目标的各种措施。

(2) 原始判断矩阵建立。根据风险分析层次模型,邀请具有项目风险管理经验的专家对众多风险因素进行分析,参照风险因素比较标度表(表 2)进行两两比较评分,从而判断两元素的相对重要性。两两判断矩阵如式(2)所示。

对于多个因素而言,两两比较判断矩阵 A :

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为第 i 个元素与第 j 个元素的重要性比较结果,且 $a_{ji} = 1/a_{ij}$; i 为行数; j 为列数; $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$; n 为矩阵中行或列的元素个数。

表 2 风险因素比较标度

标度	含义
1	因素 i 与因素 j 同样重要
3	因素 i 比因素 j 略微重要
5	因素 i 比因素 j 稍微重要
7	因素 i 比因素 j 重要得多
9	因素 i 比因素 j 重要很多
2, 4, 6, 8	因素 i 与因素 j 相比,结果处于上述结果的中间反比较,如果风险因素 i 和 j 比较得 a_{ij} ,则风险
倒数	因素 j 和 i 比较得 $1/a_{ij}$

(3) 判断矩阵计算。将矩阵 A 的元素按行相乘后开 n 次方根,求出每行元素几何平均值 w_i ,再将 w_i 归一化处理,得到权重值 W ,随后计算矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$,公式如下。

$$w_i = \sqrt[n]{a_{i1} \times a_{i2} \times \cdots \times a_{in}} \quad (3)$$

$$W = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A_w)_i}{nw_i} \quad (5)$$

式中: a_{in} 为 i 行 n 列元素两两比较标度值; i 为行; n 为判断矩阵的阶数; $(A_w)_i$ 为向量 A_w 第 i 个元素。

(4) 一致性检验。将计算得到的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 带入式(6),计算一致性指标 P_{CI} ,随后将 P_{CI} 带入式(7),与查表 3 得到的平均随机一致性指标 P_{RI} 数值比较,得到一致性比率 P_{RI} 。

$$P_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$P_{CR} = \frac{P_{CI}}{P_{RI}} \quad (7)$$

式中: P_{CI} 为一致性指标; n 为阶数; P_{RI} 为比例系数; P_{CR} 为一致性比率。

当 $P_{CR} < 0.1$ 时,则判断矩阵满足一致性要求,否则,要对判断矩阵进行修正,直至满足一致性要求。最后,计算得到每一层级评级指标因素对目标层的合成权重。

表 3 平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
比例系数	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

2.3 风险等级划分

根据风险矩阵分析基本原理，结合层次分析法分析权重结果，采用风险度 R 来衡量模板支撑体系坍塌事故因素风险的大小。根据模板支撑体系坍塌事故风险评价指标体系中各风险评价指标的风险值 L_i 及权重值 W_i 确定风险度的值，从而确定各评价指标的风险度大小，公式如下。

$$R = \sum_{i=1}^n L_i W_i \tag{8}$$

将模板支撑体系坍塌事故风险状态划分为 4 个等级，确定相应的风险等级（表 4），最后根据风险状态的评价，综合判断模板支撑体系坍塌事故风险的大小，并针对各指标层风险度较高的指标，提出针对性预防措施。

表 4 风险等级

风险度范围	风险等级	作业风险状态
(0-4]	Ⅳ	低风险
(4-9]	Ⅲ	一般风险
(9-16]	Ⅱ	较大风险
(16-25]	Ⅰ	重大风险

3 案例分析

3.1 案例简介

某高速公路某互通主线跨 S310 桥梁工程，桩号起讫范围为 K116+679~K116+964，桥梁全长 285 m，交角范围为 50°~90°，左幅为 5×25+3×17+(30+45+30)m，右幅为 3×25+3×20+(13+15+13)+(30+45+30)m。大桥采用盘扣支架，跨 S310 部位采用门洞支架。工程所处地理环境复杂，交通流量较大。跨路段净空较低，施工难度高，周期长。施工场地地势较低，周边为耕地，施工场地局限。

3.2 模板支撑体系坍塌事故风险分析层次模型建立

结合项目实际，分别从人、物、管理、环境 4

个方面着手，通过邀请行内专家对各方面影响因素进行分解，整理归纳出风险分析层次模型及判断矩阵，并依据式(3)、(4)进行权重计算并归一化处理。以 $A-B$ 判断矩阵为例，参照表 2 和式(2)，对风险因素进行两两比较，结果如表 5 所示。随后结合式(3)、(4)、(5)对矩阵权重值、最大特征值进行计算，通过计算得到 $w_i = (1.047, 0.615, 4.091, 0.380)^T$ 和归一化权重向量 $W = (0.171, 0.100, 0.667, 0.062)^T$ ，其中 T 为矩阵转置。

代入式(5)，计算并检验一致性。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A_w)_i i}{n w_i} = \frac{1}{4} \times (4.270 + 4.327 + 4.074 + 4.263) = 4.245$$

将 $\lambda_{\max}$ 代入式(6)、(7)计算 P_{CI} 和 P_{CR} 。

$$P_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.245 - 4}{4 - 1} = 0.082$$

$$P_{CR} = \frac{P_{CI}}{P_{RI}} = \frac{0.082}{0.9} = 0.091 < 0.1$$

由 $P_{CR} = 0.091 < 0.1$ 可知， $A-B$ 判断矩阵一致性检验合格。

同理，可得 $B-X4$ 个判断矩阵及权重 W ，最大特征值 $\lambda_{\max}$ ，如表 6~9 所示，同时检验一致性 P_{CR} 的值，并确保 $P_{CR} < 0.1$ 。

3.3 基于层次分析法和风险矩阵法的风险指标综合分析

依据构建的风险评价体系层级矩阵，确定各风险因素的合成权重值，将所有权重值归一化处理。邀请专家对各评价指标 X 在项目实施过程中发生的可能性 P 及事故严重程度 S 进行评分，并利用式(1)计算每个指标的风险值 L 。表 10 为风险指标评价及综合指标排序。由表 10 可知： $L = (16, 12, 9, 15, 25, 18, 12, 16, 14, 23, 11, 20, 23, 14, 20, 16, 25, 20, 16, 14, 16, 14)^T$ 。

表 5 准则层风险因素两两比较判断矩阵及其权重值、重要度计算结果

A	B_1	B_2	B_3	B_4	几何平均值	权重值	最大特征值	一致性指标	一致性比率
B_1	1	3	1/5	2	1.047	0.171			
B_2	1/3	1	1/7	3	0.615	0.100	4.245	0.082	0.091
B_3	5	7	1	8	4.091	0.667			
B_4	1/2	1/3	1/8	1	0.380	0.062			

表 6 人的因素指标两两比较判断矩阵

B_1	X_1	X_2	X_3	X_4	几何平均值	权重值	最大特征值	一致性指标	一致性比率
X_1	1	5	7	4	3.440	0.587	4.19	0.064	0.071
X_2	1/5	1	3	1/3	0.669	0.114			
X_3	1/7	1/3	1	1/6	0.298	0.051			
X_4	1/4	3	6	1	1.456	0.248			

表 7 物的因素指标两两比较判断矩阵

B_2	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	几何平均值	权重值	最大特征值	一致性指标	一致性比率
X_5	1	5	7	6	8	4.42	0.55	5.41	0.10	0.091
X_6	1/5	1	6	5	7	2.11	0.26			
X_7	1/7	1/6	1	1/2	2	0.47	0.06			
X_8	1/6	1/5	2	1	4	0.77	0.10			
X_9	1/8	1/7	1/2	1/4	1	0.29	0.04			

表 8 管理因素指标两两比较判断矩阵

B_3	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	几何平均值	权重值	最大特征值	一致性指标	一致性比率
X_{10}	1	7	1/8	1/8	1/4	1/7	1/5	1/7	1/5	1/6	0.286	0.020	11.320	0.147	0.098
X_{11}	1/7	1	1/7	1/9	1/4	1/8	1/6	1/6	1/7	1/7	0.182	0.012			
X_{12}	8	7	1	1/2	3	2	2	2	2	2	2.203	0.150			
X_{13}	8	9	2	1	7	3	5	3	6	4	4.015	0.274			
X_{14}	4	4	1/3	1/7	1	1/6	1/3	1/6	1/3	1/5	0.465	0.032			
X_{15}	7	8	1/2	1/3	6	1	4	2	5	3	2.414	0.165			
X_{16}	5	6	1/2	1/5	3	1/4	1	1/4	2	1/3	0.907	0.062			
X_{17}	7	6	1/2	1/3	6	1/2	4	1	5	2	1.961	0.134			
X_{18}	5	7	1/2	1/6	3	1/5	1/2	1/5	1	1/4	0.731	0.050			
X_{19}	6	7	1/2	1/4	5	1/3	3	1/2	4	1	1.486	0.101			

表 9 环境因素指标两两比较判断矩阵

B_4	X_{20}	X_{21}	X_{22}	几何平均值	权重值	最大特征值	一致性指标	一致性比率
X_{20}	1	4	5	2.71	0.67	3.09	0.04	0.082
X_{21}	1/4	1	3	0.91	0.23			
X_{22}	1/5	1/3	1	0.41	0.10			

分别计算 22 个风险指标的风险度值 R_i ，然后进行加和计算，最终得到模板支撑体系施工综合风险度。

$$R = \sum_{i=1}^n L_i W_i = 1.602 + 0.234 + \cdots + 0.087 = 19.256$$

由表 4 可知，该模板支撑体系施工作业风险属于 I 级风险，重大风险，与项目实施实际相符。

3.4 结论分析

(1) 管理因素：管理因素评价单元风险度为

13.689，属于 II 级风险，作业风险状态达到了较大风险程度。在组织管理中，应当将其列入重点管控对象，并按照风险分级管控原则进行提级管理。其中， X_{13} 风险度最高，为 4.114 分，说明组织在模板支撑体系施工中要严格执行支撑体系验收程序，否则，对项目的影响极为严重。同时， X_{17} 、 X_{15} 、 X_{12} 等因素也至关重要。

(2) 人的因素：人的因素评价单元风险度为 2.550，属于 IV 级风险，作业风险状态为低风险程度。其中， X_1 安全影响较高，说明在模板支撑体

表 10 风险指标评价及综合指标排序

目标层	准则层	指标层	严重程度	发生可能性	风险值	归一化权重值	风险度	评价单元风险度	综合排序
模板支撑体系施工风险 A	B ₁	X ₁	4.0	4.0	16	0.100 13	1.602	2.550	5
		X ₂	3.0	4.0	12	0.019 47	0.234		15
		X ₃	3.0	3.0	9	0.008 69	0.078		20
		X ₄	3.0	5.0	15	0.042 40	0.636		10
	B ₂	X ₅	5.0	5.0	25	0.054 91	1.373	2.121	6
		X ₆	4.5	4.0	18	0.026 25	0.473		12
		X ₇	3.5	3.5	12	0.005 89	0.072		21
		X ₈	4.0	4.0	16	0.009 54	0.153		17
		X ₉	3.5	4.0	14	0.003 67	0.051		22
	B ₃	X ₁₀	4.5	5.0	23	0.013 04	0.293	13.689	14
		X ₁₁	3.0	3.5	11	0.008 29	0.087		19
		X ₁₂	4.5	4.5	20	0.100 30	2.031		4
		X ₁₃	5.0	4.5	23	0.182 83	4.114		1
		X ₁₄	3.5	4.0	14	0.021 16	0.296		13
		X ₁₅	4.5	4.5	20	0.109 93	2.226		3
		X ₁₆	4.0	4.0	16	0.041 28	0.661		9
		X ₁₇	5.0	5.0	25	0.089 29	2.232		2
		X ₁₈	5.0	4.0	20	0.033 30	0.666		8
		X ₁₉	4.0	4.0	16	0.067 67	1.083		7
	B ₄	X ₂₀	3.5	4.0	14	0.041 75	0.584	0.895	11
		X ₂₁	4.0	4.0	16	0.013 97	0.224		16
		X ₂₂	4.0	3.5	14	0.006 24	0.087		18

系施工中，组织需要选用具备较强技能经验的管理人员和技术人员，其次是 X₄ 对于系统安全也有较大影响。

(3) 物的因素：物的因素评价单元风险度为 2.121，属于Ⅳ级风险，作业风险状态为低风险程度。其中，X₅ 对系统影响严重，表明在支架材料进场前，组织要严格把控支架材料质量，以确保其符合规范和设计要求。

(4) 环境因素：环境因素评价单元风险度为 0.895，属于Ⅳ级风险，作业风险状态为低风险程度。其中，X₂₀ 对施工安全影响相对较为严重，其次是 X₂₁、X₂₂ 在环境因素管控方面起着较为重要的作用。

4 对策与建议

(1) 组织及技术管理方面：首先要严格按照规范及施工现场实际编制相应危险性较大分部分项工程安全专项施工方案，并邀请行内专家进行

专家论证，论证通过的方案严格执行审批程序。其次，作业前，选择符合资质等条件的分包单位，并对作业单位及人员做好技术交底；作业中，按照方案要求进行施工，对于现场发生的违法违规行为，切实做到令行禁止；支撑体系搭设完成后，按照要求组织验收，合格后方可进入下一道施工工序。最后，在拆除前，确保混凝土养护龄期及强度符合要求；拆除时，严格按照方案要求做到先支后拆、后支先拆，逐层拆除。

(2) 人因管理方面：施工前选择具备较强工作能力和施工经验的管理人员、技术人员以及关键岗位作业人员，其中针对所有作业人员，应严格执行进场安全培训及交底制度，考核合格后方可上岗。

(3) 物的管理方面：将模板支撑体系材料质量、地基基础承载力及安全防护设施 3 个方面作为重中之重，确保支撑体系材料符合规范及设计要求，地基基础承载力满足方案设计要求，各类安全防护设施安全可靠。

(4) 施工作业环境方面: 在跨路施工期间, 设置足够的交通安全警示标识, 制定防碰撞警示措施, 并定期检查, 以确保交通安全警示标识齐全有效, 同时, 保证现场照明充足, 进而保障交通安全。

5 结 语

本文基于模板支撑体系施工全过程, 重点考虑坍塌风险因素, 分析风险评估指标, 在确定指标权重时, 采取矩阵分析法和层次分析法结合, 使权重结果更为客观。纵然各项目管理组织及组织所处的环境不尽相同, 不同工程项目风险评价指标体系准则层、目标层会有所不同, 但案例分析结果表明, 此评估分析模型具有一定的实际应用价值, 对于指导项目风险评估具有实际的参考意义。

参考文献:

[1] 建筑施工模板安全技术规范: JGJ 162—2008[S]. 北

京: 中国建筑工业出版社, 2008.

- [2] 建筑施工模板和脚手架试验标准: JGJ/T 414—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 危险性较大的分部分项工程安全管理办法(住房和城乡建设部令第 37 号)[EB/OL]. (2018-02-12)[2018-03-08]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5294422.htm.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孙世梅. 高大模板支撑体系坍塌事故不安全行为原因分析[J]. 安全, 2020, 41(5): 1-6; 89.
- [7] 生产过程危险和有害因素分类与代码: GB/T 13861—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.