

装配式建筑施工安全投入优化模型的构建

常春光,赵 腾

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要:为有效降低装配式建筑施工安全事故发生概率,优化安全投入的合理分配,以装配式建筑施工安全为研究对象,建立事故树,并结合 Cobb-Douglas 函数运用非线性规划方法构建安全投入优化模型。选取实例进行分析,结果表明:日常安全管理投入、安全教育投入及建筑施工卫生措施投入对于装配式建筑施工安全有明显保障作用,而企业目前在这3个方面的投入远远达不到项目实际需求,管理者应合理优化分配以达到控制事故发生概率的最佳效果。

关键词:装配式建筑;安全投入;ALARP 原则;Cobb-Douglas 函数;非线性规划

中图分类号:TU714 **文献标志码:**A

随着当今建造技术的发展,传统建筑产品复杂繁琐的建筑工程已经不能满足人们对高品质建筑产品的需求,装配式建筑利用加工好的建筑配件直接装配完工,具有建造速度快、产品质量高、节能环保等优点^[1],因此迅速在世界各地得以推广。对于建筑行业来说,安全事故经济损失数额庞大,不仅会消耗大量的资源,同时还会影响装配式建筑产业未来的发展,因此,装配式建筑安全施工对保障建筑安全、引领装配式建筑产业积极健康发展具有重要意义。目前,国内外专家学者对装配式建筑的安全风险评估研究较多,吴凤平等^[2]深入分析了混凝土装配式住宅施工危险源及存在的安全问题;黄桂林等^[3]利用可拓学理论评价施工过程中的安全风险状况;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了研究;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了分析和评估;王志强等^[6]运用事故树(Fault Tree Analysis, FTA)-集对分析法(Set Pair Analysis, SPA)-灰色聚类法评估装配式建筑施工过程中的危险因子。上述学者虽然采用了不同方法对装配式建筑施工安全管理问题进行了大量研究,但是大多局限于风险的识别以及评估分析,而对于经济层面及安全投入与风险控制问题之间优化及权衡等方面的研究较少,在保证装配式建筑工程项目处于合理安全等级的前提下,建筑企业如何在风险识别的基础上进一步经济合理地将一定数额的安全投入进行最优化分配已成为目前亟待解决的问题。

鉴于此,本研究从事事故因理论出发,对装配式建筑施工安全事故风险进行识别和分析,同时结合 Cobb-Douglas 函数构造数学模型,将一定合理数额的安全投入通过最优

化的分配方式分配于各类别安全投入之中,从而使装配式建筑施工安全事故发生概率降为最低,最后借助工程算例进行分析,证明该模型的适用性,从而为建设企业得到最优事故预防效果以及最优安全决策提供依据。

一、装配式建筑施工安全影响因素分析

装配式建筑施工,潜在性风险因素较多,同时,大量的吊装以及高空作业增加了施工

过程中的风险因素^[7]。根据国家住房和城乡建设部印发的相关文件,并结合装配式建筑施工的特点,梳理出装配式建筑施工过程中 5 类高频率事故,依次为高处坠落事故、物体打击事故、坍塌事故、起重伤害以及机械伤害。通过选取典型的装配式建筑作为分析样本,并依据装配式建筑施工流程,反演分析得出相关事故的关键影响因素^[8],如表 1 所示。

表 1 装配式建筑施工安全关键影响因素

关键风险因素	高处坠落事故	物体打击事故	坍塌事故	起重伤害	机械伤害
风险意识淡薄	✓	✓	✓	✓	✓
安全知识欠缺	✓	✓	✓	✓	✓
偶然性失误	✓	✓		✓	✓
脚手架搭设不合格	✓		✓		
机械设备的检修与维护不到位		✓		✓	✓
构件出厂质量不达标			✓		
吊装设备操作失误或机器故障	✓	✓		✓	
装配区域施工杂乱		✓			✓
天气、照明情况恶劣				✓	✓
安全防护设施损坏	✓	✓	✓		✓
防火、防电、防水措施不严格					
未配备有效防护措施	✓	✓	✓	✓	✓
现场安全监理风险	✓	✓	✓	✓	✓
日常安全检查疏漏	✓	✓		✓	✓
管理组织风险		✓	✓	✓	

二、理论阐述

1. 安全投入

安全投入,是为满足参与施工生产的人员、机械、设施、环境等具备相应的安全保障而作出的投入,具体包括预防性安全投入和损失性安全投入两种,且两者之间为负相关^[9-10]。依据国家《高危行业企业安全生产费用财务管理暂行办法》,预防性安全投入可分为日常安全管理、劳动用品、安全技术措施、建筑施工卫生措施、宣传教育五大类型投入。损失性安全投入即事故损失,由建筑安全事故的发生而导致建筑企业所付出的代价。

2. ALARP 原则

“ALARP”(As Low As Reasonably Practicable)原则,即“最低合理可行”原则。

在建筑系统风险评价过程中,首先要具备科学合理的风险参照系,ALARP 原则可提供项目风险的判定标准,由此依据该原则确定项目建设的风险可接受水平,已被国外建筑企业普遍采用^[11-12]。该原则通过不可容忍线和可忽略线将项目风险划分为风险严重区、ALARP 区和可忽略区,如图 1 所示。

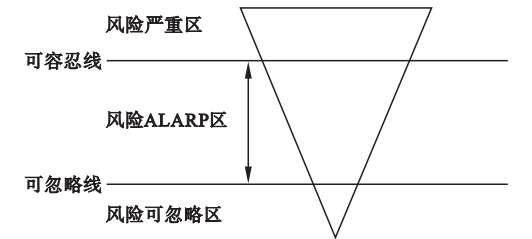


图 1 风险评价的 ALARP 原则

(1)如果评估所得风险度落入风险严重区域,此时该装配式建筑项目的风险是不可接受的,必须加大安全投入,健全管控体系

以降低风险。

(2) 如果评估所得风险度落入风险 ALARP 区域,此时该装配式建筑项目的风险在可接受范围之内,需要对该项目进行进一步的成本风险分析,尽可能使项目风险度向可忽略区域靠近^[13]。

(3) 如果评估所得风险度落入风险可忽略区域,此时该装配式建筑项目的风险在可接受范围内,从经济角度出发,无需加大安全

投入。

3. 事故树分析

事故树分析 (Fault Tree Analysis, FTA) 是一种逻辑演绎的系统评价方法,主要通过逻辑推理、正反演绎等方式,来辨识和评价系统的危险性^[14-15]。该方法可同时进行定性与定量分析,在用 FTA 法分析问题时将顶上事件定义为 T ,基本事件定义为 X ,在具体运用时分析及解决问题的程序如图 2 所示。

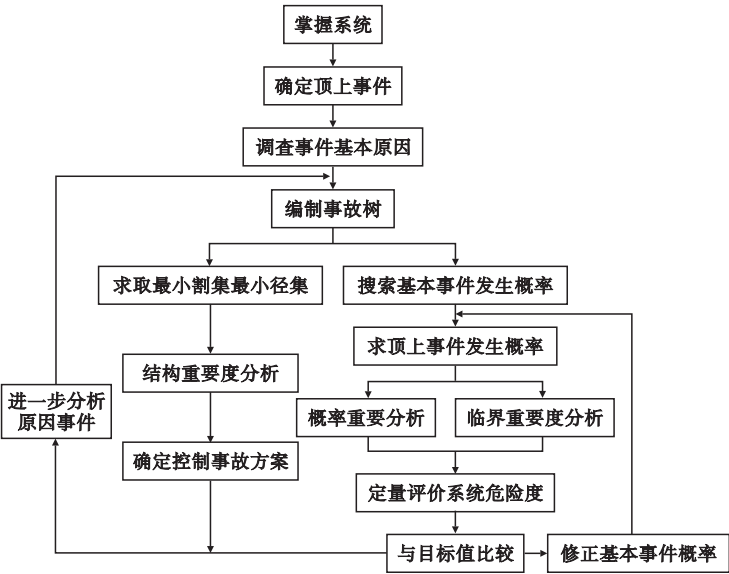


图 2 FTA 法分析及解决问题的程序

定量分析即依据逻辑演绎所得基本事件的发生概率,通过计算转化得出顶上事件概率值^[16]。定量计算时常采用最小割集法,过程如下:

设某事故树有 K 个最小割集: $E_1, E_2, \dots, E_r, \dots, E_k$, 则有

$$T = \bigcup_{r=1}^k E_r \tag{1}$$

顶上事件发生的概率为

$$P(T) = P\left\{\bigcup_{r=1}^k E_r\right\} \tag{2}$$

化简得出顶上事件概率为

$$P(T) = \sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} p_i - \sum_{1 \leq s < r \leq k} \prod_{X_i \in E_r \cup E_s} p_i + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{r=1}^k p_i \tag{3}$$

$X_i \in E_1 \cup E_2 \dots \cup E_r \dots \cup E_k$

式(3)中: r, s, k 为最小割集的序号, $r < s < k$; i 为基本事件的序号; $X_i \in E_r$ 为第 r 个最小割

集的第 i 个基本事件; $X_i \in E_r \cup E_s$ 为第 r 个或第 s 个最小割集的第 i 个基本事件; p_i 为各基本事件 X_i 发生的概率。

三、装配式建筑安全投入优化模型的建立

1. 事故损失模型的建立

柯布 - 道格拉斯 (Cobb - Douglas) 生产函数是在一定技术条件下投入与产出关系的数学模型。它是通过建立指数关系衡量系统生产的经济模型,在经济学中使用最为广泛。依据参考文献^[17],将 C - D 生产函数引入建筑业,测算损失性安全投入 (事故损失),并建立计量模型

$$Y = A c_e^{a_e} c_i^{a_i} c_h^{a_h} c_l^{a_l} c_r^{a_r} \tag{4}$$

式中: Y 为事故损失; c_e 为安全教育类投入; c_i 为安全技术措施类投入; c_h 为建筑施工卫生

措施类投入; c_l 为劳保用品类投入; c_r 为日常安全管理类投入; a_e, a_t, a_h, a_l, a_r 为各类安全投入弹性系数; A 为施工技术发展系数。

根据装配式建筑特点及合理决策要求,并结合我国建筑企业实际情况,该函数应满足以下条件:

① $Y \geq 0$, 针对装配式建筑而言,事故损失额不可能一直为 0。

② $\frac{\partial Y}{\partial c_e} < 0; \frac{\partial Y}{\partial c_t} < 0; \frac{\partial Y}{\partial c_h} < 0; \frac{\partial Y}{\partial c_l} < 0; \frac{\partial Y}{\partial c_r} < 0$, 即在其他条件不变的情况下,随着项目预防性安全投入额的增加,其损失性安全投入额会相应降低。

③ $\lim_{c_e \rightarrow 0} Y = \infty; \lim_{c_t \rightarrow 0} Y = \infty; \lim_{c_h \rightarrow 0} Y = \infty; \lim_{c_l \rightarrow 0} Y = \infty; \lim_{c_r \rightarrow 0} Y = \infty$, 即装配式建筑安全生产同时依赖于各类别安全投入,一旦忽视其中任何一项,则很可能引发安全事故。

2. 安全投入优化模型的建立

按照事故树定量计算的相关定义,结合式(3) P_i 为各基本事件 X_i 发生的概率,可得装配式建筑施工安全事故树顶上事件 T 发生的概率为

$$P(T) = \sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} p_i - \sum_{1 \leq s \leq r \leq k} \prod_{X_i \in E_r \cup E_s} p_i + \cdots + (-1)^{k-1} \prod_{r=1}^k p_i$$

$$X_i \in E_1 \cup E_2 \cdots \cup E_r \cdots \cup E_k$$

(5)

因为装配式建筑安全施工事故树中各基本事件的发生概率与安全投入呈负相关对应,且随着安全投入的增加,顶上事件发生概率的降低率随之减小,且当二者之一趋于 0 时,另一项为无穷大。这种关系特点与生产函数曲线“龚伯兹曲线”(当 $0 < \alpha_i < 1, b_i > 1$ 时)的趋势相一致。因此,可借助龚伯兹曲线描述基本事件发生概率与安全投入之间的函数关系,如图 3 所示。

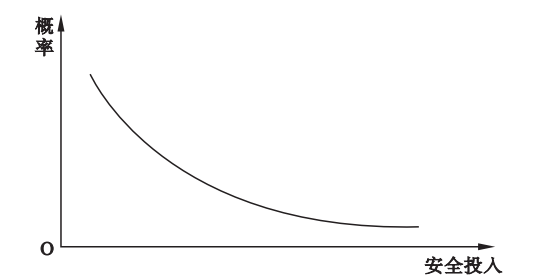


图 3 龚伯兹曲线走势

利用龚伯兹曲线拟合基本事件发生概率 P_i 与其对应的各项关键风险因素预防所需的具体安全投入 c_i 之间的关系,可得

$$p_i = K_i a_i^{b_i c_i} \text{ 且 } 0 < p_i < 1$$

(6)

式中: $i = 1, 2, \cdots, n, K_i, a_i, b_i$ 均为参数,且有 $0 < \alpha_i < 1, b_i > 1$, 参数值依赖以往装配式建筑安全事故统计数据,利用曲线拟合加以确定。

将式(6)代入式(5),可得

$$P(T) = \sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} K_i a_i^{b_i c_i} - \sum_{1 \leq s \leq r \leq k} \prod_{X_i \in E_r \cup E_s} K_i a_i^{b_i c_i} + \cdots + (-1)^{k-1} \prod_{r=1}^k K_i a_i^{b_i c_i}$$

(7)

借助目标规划的思想,寻求最优化的安全投入分配方式,从而使项目风险度最低,即事故树顶上事件发生概率最小,所以该模型目标函数为 $\min P$ 。

限制条件推导:
为保证装配式建筑项目施工安全,依照 ALARP 原则,预防性安全投入总额需限定在安全区间 $[M, N]$ 内,故根据此约束条件有

$$M \leq \sum_{i=1}^n c_i \leq N$$

(8)

从建筑企业自身利益出发,事故损失需尽可能小,即对于损失性安全投入需设定上限值,此处假设上限值为 R ,则有

$$A c_e^{a_e} c_t^{a_t} c_h^{a_h} c_l^{a_l} c_r^{a_r} \leq R$$

(9)

此外,根据《施工企业安全生产管理规范 GB50656—2011》,并结合我国装配式建筑安全事故发生特点,要求企业在实际决策过程中分配额需有侧重,即各类别安全总投入之间存在一个排序,记为

$$c_e \leq c_h \leq c_r \leq c_l \leq c_t$$

(10)

结合实际情况,建筑施工安全技术措施经费由地方政府规定,即相应的安全技术措施经费需设定取值下限,故有

$$c_t \geq T, c_l \geq L, c_r \geq S$$

(11)

式中: T, L, S 为各地方政府规定的相应安全技术措施费取值下限。

综上所述,以 $\min P$ 为目标函数,建立非线性规划数学模型

$$\min P = \sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} K_i a_i^{b_i^{c_i}} - \sum_{1 \leq s \leq r \leq k} \prod_{X_i \in E_r \cup E_s} K_i a_i^{b_i^{c_i}}$$
$$K_i a_i^{b_i^{c_i}} + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{r=1}^k K_i a_i^{b_i^{c_i}}$$
$$X_i \in E_1 \cup E_2 \dots \cup E_r \dots \cup E_k$$
$$\begin{cases} M \leq \sum_{i=1}^n c_i \leq N & (i = 1, 2, \dots, n) \\ A(\sum_{i=1}^{n_1} c_i)^{a_e} (\sum_{i=n_1+1}^{n_2} c_i)^{a_l} (\sum_{i=n_2+1}^{n_3} c_i)^{a_r} (\sum_{i=n_3+1}^{n_4} c_i)^{a_h} (\sum_{i=n_4+1}^{n_5} c_i)^{a_e} \leq R \\ \sum_{i=1}^{n_1} c_i \leq \sum_{i=n_2+1}^{n_3} c_i \leq \sum_{i=n_4+1}^{n_5} c_i \leq \sum_{i=n_3+1}^{n_4} c_i \leq \sum_{i=n_1+1}^{n_2} c_i \\ c_l \geq T, c_l \geq L, c_r \geq S \end{cases}$$

模型中: $c_1 + c_2 + \dots + c_{n_1} = c_e$; $c_{n_1+1} + c_{n_1+2} + \dots + c_{n_2} = c_l$; $c_{n_2+1} + c_{n_2+2} + \dots + c_{n_3} = c_h$; $c_{n_3+1} + c_{n_3+2} + \dots + c_{n_4} = c_l$; $c_{n_4+1} + c_{n_4+2} + \dots + c_{n_5} = c_r$; n_1 为安全教育类投入; n_2 为安全技术措施类投入; n_3 为建筑施工卫生措施类投入; n_4 为劳

保用品类投入; n_5 为日常安全管理类投入。
在实际运行中,借助运筹学中常用计算最优解的 Lingo 软件求解模型,得各项预防基本事件发生的安全投入 c_i 的值,此时可以获得事故树顶上事件的最小发生概率,同时将各 c_i 值代入式(6),以获取每个基本事件的发生概率。然后按类别将所求得的安全投入 c_i 分别归入 5 类安全投入中,即可求得最优安全投入分配方案。

四、算例分析

北京市某建筑企业计划完成 6 083 万元的装配式住宅建设项目,该企业近 10 年各项安全投入和事故损失 Y 的数据如表 2 所示,利用该模型对该项目的安全投入结构进行优化。

表 2 该企业安全投入数据 万元

年份	c_l	c_t	c_r	c_h	c_e	Y
2009	46.75	67.80	39.50	26.75	17.33	16.83
2010	47.69	65.50	39.22	27.69	16.29	9.33
2011	51.00	71.40	37.22	23.00	15.36	12.11
2012	47.31	69.24	39.61	27.20	14.49	7.16
2013	39.71	49.31	38.47	16.71	9.33	13.91
2014	54.27	77.50	39.18	19.18	11.98	10.31
2015	41.46	82.90	40.16	17.36	14.80	9.66
2016	52.63	86.71	40.48	19.78	14.84	10.90
2017	57.80	93.30	38.50	23.80	17.01	11.33
2018	49.27	88.22	38.54	25.27	16.00	8.21

1. 事故损失模型

根据式(4),将各项安全投入与事故损失取对数,即该函数关系可变为

$\ln Y = \ln A + \ln c_l + \ln c_t + \ln c_r + \ln c_h + \ln c_e$ (12)

将该建筑企业近 10 年安全投入与事故损失取对数后,通过数据统计分析软件 SPSS24.0 进行多元线性回归可得

$Y = 49.367 c_e^{-0.062} c_l^{-0.624} c_h^{-0.173} c_t^{-0.091} c_r^{-0.047}$ (13)

依据装配式建筑施工安全事故关键风险因素的划分,各类别安全投入额与预防基本事件发生的安全投入 c_i 之间有以下关系

$c_e = \sum_{i=1}^3 c_i, c_l = \sum_{i=4}^7 c_i, c_h = \sum_{i=8}^9 c_i, c_t =$

$\sum_{i=10}^{12} c_i, c_r = \sum_{i=13}^{15} c_i$

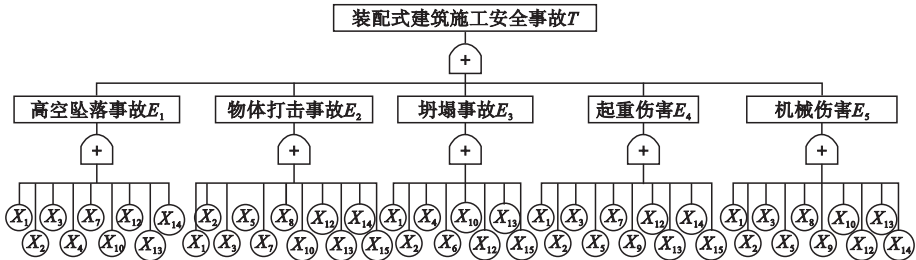
将此关系代入式(13),该函数模型可以转化为事故损失额与各项预防基本事件发生的安全投入 c_i 之间的函数关系

$Y = 49.367 (\sum_{i=1}^3 c_i)^{-0.062} (\sum_{i=4}^7 c_i)^{-0.624} \times (\sum_{i=8}^9 c_i)^{-0.173} (\sum_{i=10}^{12} c_i)^{-0.091} (\sum_{i=13}^{15} c_i)^{-0.047}$ (14)

经检验,上述模型同时满足 3 项约束条件,即该事故损失模型成立。

2. 安全投入优化模型

根据相关文献及数据记载,同时结合表 1,运用事故树分析法(FTA)建立装配式建筑施工安全事故树,如图 4 所示。



注： X_1 为风险意识淡薄； X_2 为安全知识欠缺； X_3 为偶然性失误； X_4 为脚手架搭设不合格； X_5 为机械设备的检修与维护不到位； X_6 为构件出厂质量不达标； X_7 为吊装设备操作失误或机具故障； X_8 为装配区域施工杂乱； X_9 为天气、照明情况恶劣； X_{10} 为安全防护设施已损坏； X_{11} 为防火、防电、防水措施不严格； X_{12} 为未配备有效防护措施； X_{13} 为现场安全监理风险； X_{14} 为日常安全检查疏漏； X_{15} 为管理组织风险。

图 4 装配式建筑施工安全事故树

根据 ALARP 原则,预先确定合理可行的项目安全投入区间,由于我国装配式建筑事故统计体系尚未完善,缺乏相关方面文献及数据记录资料,可行性区域的标准安全投入区间 $[M,N]$ 难于确定,参照发达国家风险度划分标准,并结合本国国情和本企业实际情况,此处作出合理假设:其预防性安全投入的下限取近 10 年的最小值,即 $M = 153.53$,上限取近 10 年的最大值,即 $N = 230.41$ 。同时,根据海因里希法则 (Heinrich's Law)^[18],安全事故损失总额是事故直接损失的 5 倍,由此该建筑企业在过去 10 年中的事故损失最小值为 35.80,设想通过该模型对安全投入进行优化后,事故损失上限为 35.80 万元,即 $R = 35.80$,满足风险度落在可行性区域。

依据《北京市人民政府贯彻落实国务院关于进一步加强安全生产工作决定的若干意见》,要求以建筑安装工程造价为计取依据,房屋建筑工程安全生产费用提取标准为 2%,其中,安全技术措施保障资金为 40%,劳动防护用品保障资金为 30%,日常安全管理专项资金为 30%。由此有

$$\sum_{i=4}^7 c_i \geq 48.67, \sum_{i=10}^{12} c_i \geq 36.50, \sum_{i=13}^{15} c_i \geq 36.50$$

该装配式建筑安全投入优化分配模型为

$$\min P = \sum_{r=1}^5 \prod_{X_i \in E_r} K_i a_i^{b_i c_i} - \sum_{1 \leq s \leq r \leq 5} \prod_{X_i \in E_r \cup E_s} K_i a_i^{b_i c_i} + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{r=1}^5 \prod_{X_i \in E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_5} K_i a_i^{b_i c_i}$$

$$\left\{ \begin{aligned} 153.53 &\leq \sum_{i=1}^{15} c_i \leq 230.41 \quad (i = 1, 2, \dots, 15) \\ 49.367 &(\sum_{i=1}^3 c_i)^{-0.062} (\sum_{i=4}^7 c_i)^{-0.624} (\sum_{i=8}^9 c_i)^{-0.173} \times \\ &(\sum_{i=10}^{12} c_i)^{-0.091} (\sum_{i=13}^{15} c_i)^{-0.047} \leq 35.80 \\ \sum_{i=1}^3 c_i &\leq \sum_{i=8}^9 c_i \leq \sum_{i=13}^{15} c_i \leq \sum_{i=10}^{12} c_i \leq \sum_{i=4}^7 c_i \\ \sum_{i=4}^7 c_i &\geq 48.67, \sum_{i=10}^{12} c_i \geq 36.50, \sum_{i=13}^{15} c_i \geq 36.50 \end{aligned} \right.$$

根据参考文献[13],并参照企业以往安全事故统计数据,借助龚伯兹曲线对装配式建筑施工安全事故树中 15 项基本因素进行拟合,可求得 15 组的值,然后使用 Lingo 软件对模型进行求解,具体结果如表 3 所示。

根据模型目标函数,该装配式建筑施工项目安全事故发生的最小概率为 4.77%,计算如下:

$$\min P = \sum_{r=1}^5 \prod_{X_i \in E_r} K_i a_i^{b_i c_i} - \sum_{1 \leq s \leq r \leq 5} \prod_{X_i \in E_r \cup E_s} K_i a_i^{b_i c_i} + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{r=1}^5 \prod_{X_i \in E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_5} K_i a_i^{b_i c_i} = 4.77\%$$

3. 结果分析

在使装配式建筑施工安全事故发生概率最低这个目标函数下求得 15 项的基础事件的安全投入,并将上述 15 项预防基本事件发生的安全投入归到安全投入五大类别中,得出最终计算结果,即安全教育投入 11.64 万元、安全技术措施投入 66.87 万元、工业卫生措施投入 2.49 万元、劳动保护用品投入 43.60

表 3 安全投入计算结果及类别划分

代号 <i>i</i>	事件名称 X_i	K_i	a_i	b_i	$q_i/\%$	$c_i/\text{万元}$	安全投入类别	投入额/万元
1	风险意识淡薄	0.09	0.91	1.91	1.06	3.69	安全教育投入 c_e	11.64
2	安全知识欠缺	0.17	0.27	2.68	1.13	3.73		
3	偶然性失误	0.07	0.56	2.57	0.45	4.22		
4	脚手架搭设不合格	0.14	0.64	2.25	0.56	19.37	安全技术措施投入 c_t	66.87
5	机械设备的检修与维护不到位	0.05	0.43	1.29	0.97	17.98		
6	构件出厂质量不达标	0.07	0.79	1.97	0.39	13.79		
7	吊装设备操作失误或机器故障	0.05	0.55	1.56	1.18	15.73	工业卫生措施投入 c_h	2.49
8	装配区域施工杂乱	0.07	0.79	1.82	0.39	0.93		
9	天气、照明情况恶劣	0.06	0.93	1.89	0.27	1.56		
10	安全防护设施已损坏	0.06	0.53	1.13	1.07	15.32	劳动保护用品投入 c_l	43.60
11	防火、防电、防水措施不严格	0.04	0.88	1.08	0.92	13.22		
12	未配备有效防护措施	0.05	0.34	5.01	0.61	15.06		
13	现场安全监理风险	0.05	0.65	1.73	0.76	11.07	日常安全管理投入 c_r	38.93
14	日常安全检查疏漏	0.03	0.88	1.92	0.79	13.36		
15	管理组织风险	0.05	0.55	1.67	0.92	14.50		

万元以及日常安全管理投入38.93万元。

将该装配式建筑施工安全投入优化模型计算出的最优安全投入与企业原安全投入相对比(见表4),差额率在10%左右为微小变动,在实际工程安全投入过程中虽可略作调整,但工业卫生措施投入74.13%、日常安全管理投入57.17%以及安全教育投入58.50%,差额率较大。从计算结果看,安全教育投入、日常安全管理投入及工业卫生措施投入在项目的风险控制方面发挥了不可或缺的作用,但企业对其重要性认识不足,导致企业对于此方面的投入较少,远远达不到实际需求,说明管理者对于安全投入的决策缺乏科学性和高效性,需重新调整分配方式,以达到降低事故发生概率的最佳效果。

表 4 最佳安全投入与企业原投入计算比较

各类安全投入	计算费用 额/万元	原费用 额/万元	差额/ 万元	差额 率/%
安全技术措施投入	66.87	65.02	1.85	2.85
安全教育投入	11.64	7.33	4.31	58.80
劳动保护用品投入	43.60	51.26	-7.66	-14.94
日常安全管理投入	38.93	24.77	14.16	57.17
工业卫生措施投入	2.49	1.43	1.06	74.13

五、结 论

(1)在应用本模型进行实例分析时,需根据ALARP原则确定能够使风险度落在

ALARP区域内的合理安全投入区间,但由于我国建筑行业对此尚未提供确切标准,所以作合理假设,缺少确定合理安全总投入区间 $[M,N]$ 的推理和判断。

(2)FTA法在构建事故树时,基本事件的推理分析依赖于进行龚伯兹曲线拟合的数据的多少,由于我国建筑数据统计系统尚不完善,所以本研究中的事故树仍不够全面,精细度有待提高,基本因素事件还有待深入推理和挖掘。

(3)模型利用FTA法所分析的基本事件多是直接因素,在保障项目安全建设过程中,还存在安全科研投入和安全保险投入等,但通过FTA法不易获得。

参考文献:

[1] 李文龙,李慧民,孟海,等.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[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(3):369-374.

[2] 吴凤平,徐辉英,卢佳宇.PC住宅楼工程施工现场安全管理探讨[J].建筑安全,2016,31(4):16-19.

[3] 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,2017,43(2):33-38.

[4] 李高锋,施佳呈,郝风田.浅析预制装配式住宅施工安全管理与措施[J].价值工程,2016,

- 35(24):316-318.
- [5] 李颖,李峰,邹宇. 预制装配式混凝土建筑施工安全和质量评估[J]. 建筑技术,2016,47(4):305-309.
- [6] 王志强,张樵民,王国强. 基于 FTA-SPA-灰色聚类的装配式建筑施工安全测评[J]. 安全与环境工程,2018,25(2):166-173.
- [7] 陈伟,乔治,熊付刚. 装配式建筑施工安全事故预防 SD-MOP 模型[J]. 中国安全科学学报,2019,29(1):19-24.
- [8] 杨斯玲,蒋根谋. 基于约束理论和集对分析的 EPC 建筑供应链风险管理[J]. 技术经济,2016,35(8):111-117.
- [9] 张魏魏. 建筑施工企业安全投入优化比例研究[J]. 企业改革与管理,2019(7):197-198.
- [10] 刘杰,孙凯. 建设工程项目安全投入与绩效的关系研究[J]. 建筑安全,2019,34(1):53-55.
- [11] BRYANT P, CROFT J, COLE P. Integration of risks from multiple hazards into a holistic ALARA/ALARP demonstration[J]. Journal of radiological protection,2018,38(1):81-91.
- [12] MURAT G, TALAT B. Development of a safety performance index assessment tool by using a fuzzy structural equation model for construction sites[J]. Automation in Construction,2018,85(1):53-61.
- [13] 姜慧. 建筑施工企业安全成本的优化方法及策略研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [14] 佐飞,张尧. 考虑风险间关联作用的项目风险应对策略优选方法[J]. 技术经济,2014,33(6):67-71.
- [15] 魏子晗. 建设施工安全管理的最优化策略研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [16] 张尧,陈曦,樊治平. 综合考虑多因素的项目风险应对策略选择方法[J]. 技术经济,2013,32(5):74-77.
- [17] 杜小武,汪岩. 基于 C-D 生产函数模型的我国建筑业产出影响因素研究[J]. 建筑经济,2019,40(9):104-108.
- [18] 周建民,詹求杰,郭振虎. 工程建设项目安全投入优化配置研究[J]. 建筑技术,2018,49(11):1234-1237.

Optimization Model Construction for Safety Investment of Prefabricated Building Construction

CHANG Chunguang, ZHAO Teng

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to effectively reduce the probability of safety accidents in prefabricated building construction, optimize the reasonable allocation of safety investment, construction safety of prefabricated buildings is used as research object. By analyzing the key influencing factors, the prefabricated construction safety accident tree (FTA) is established, and the non-linear programming method is used in combination with the Cobb-Douglas function. Taking the minimum value of the top event occurrence probability as the objective function, an optimal allocation model of safety input is established. Sample projects are chosen for case analysis. The research results show that daily safety management investment, safety education investment, and building construction sanitation measures investment can effectively reduce the probability of accidents. At present, construction enterprises generally have less investment in this area, which is far from reaching the actual needs of the project so the enterprise should reasonably optimize and allocate to achieve the best effect of controlling the probability of accidents.

Key words: prefabricated building; safety investment; ALARP principle; Cobb-Douglas function; nonlinear programming

(责任编辑:高旭 英文审校:林昊)