

装配式建筑安全事故承灾体脆弱性评价指标体系构建

——基于 Apriori 算法

姜东民, 张哲, 何栋良

(青岛理工大学管理工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要:从装配式建筑安全事故发生作用的承灾体入手,运用文献分析法,以从知网搜集获取的40余篇相关文献为基础指标库,整理出45个最初指标,采用Apriori算法挖掘频繁1项集,筛选出符合要求的初步指标,并结合建筑安全事故情况和承灾体类型进行了分析,进一步删减、分类,最终形成了装配式建筑事故承灾体脆弱性评价指标体系,为进一步开展脆弱性评价奠定了基础。

关键词:Apriori 算法;装配式建筑;脆弱性;评价指标体系

中图分类号:TU714 **文献标志码:**A

近年来,随着建筑工业化的发展,装配式建筑得到国家和政府的大力推广。装配式建筑作为一种新型的建筑产物,其安全问题必然得到社会和政府的重点关注,而建筑业本身也属于事故高发行业,一旦发生安全事故,会造成十分严重的人员伤亡和财产损失。据住房和城乡建设部办公厅发布的《关于2018年房屋市政工程生产安全事故和建筑施工安全专项治理行动情况的通报》显示,2018年,全国共发生房屋市政工程生产安全事故734起、死亡840人,与2017年相比,事故起数增加42起、上升6.1%,死亡人数增加33人、上升4.1%^[1]。由此看出,当前我国的建筑施工安全形势依然严峻。

建筑领域的安全事故灾难也属于公共安全的范畴,根据范维澄等^[2]提出的公共安全科技“三角形”模型,通过对承灾体进行研究

可以确定应急管理的关键目标,加强防护,从而实现有效预防和科技减灾,因而要研究承灾体的脆弱性,进而在事前采取适当的防范措施。施工安全事故的发生是致灾因子和承灾体相互作用的结果,致灾因子作用强度小于承灾体抵抗风险、事故的最大阈值,即可在很大程度上减轻事故造成的伤害,降低损失。所以,提高承灾体抵抗风险、事故的能力,即降低承灾体的脆弱性,可有效降低或减轻事故的影响和后果。

基于此,笔者从装配式建筑安全事故承灾体入手,对其脆弱性因素进行识别和分析,找出脆弱性因素并构建脆弱性评价指标体系,为装配式建筑施工安全事故承灾体脆弱性评估提供基础,以保障相关从业人员的安全、促进装配式建筑安全生产。

一、Apriori 算法和脆弱性

1. Apriori 算法

Apriori 算法是一种发现频繁项集的基本算法,由 Agrawal 和 R. Srikant 于 21 世纪末提出,是一种布尔型算法^[3]。该算法的核心思想是利用先验性质(频繁项集的所有非空子集也一定是频繁项集),通过连接步、剪枝步,得到事务数据库里满足最小支持度的项,然后从频繁项集中提取高于最小置信度阈值的生成强关联规则,从而达到挖掘目标数据关联关系的目的。为方便后续研究,现对相关定义给出如下介绍。

事务集(Transact set):把事务集设定为 $D = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$,表示所有关联规则对象数据中的事务所组成的集合; $|D|$ 为所有包含在事务集中的事务的数量, TID 为 D 中每一个事务 T 的唯一标识。

项集:假设 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 是所有项目的集合,若存在 $X \subset I, Y \subset I$,则称 X, Y 为项集,若是计数为 k 的项集,则称之为 K 项集。

支持度^[4](Support):设 $X(X \subseteq I)$ 为一个项集,事务 T_i 包含项集 X ,当且仅当 $X \subseteq T_i$ 。项集 X 的支持度定义为,包含项集 X 的事务在事务数据库 D 中所占的百分比。项集 X 支持度的计算式为

$$\text{support}(X) = \frac{|\{T \mid T \in D \cap X \in T_i\}|}{|\{T \mid T \in D\}|}$$

最小支持度(min_sup)指用户设置的满足要求的最低支持度阈值。

置信度(C confidence):设 X, Y 是两个项集,在全部事务集 D 中支持 X 的事务数和同时支持 X 与 Y 的事务数所占的比值,叫做 X 与 Y 关联的置信度。其计算式为

$$\text{confidence}(Y \Rightarrow X) = \frac{\text{support}(X \cup Y)}{\text{support}(X)}$$

最小置信度(min_con)指用户设置的满足要求的最低置信度阈值。

频繁项集^[4]:设最小支持度阈值为 min_sup,若项集 X 满足 $\text{support}(X) \geq \text{min_sup}$,则 X 为频繁项集。如频繁项集 X 中包含 k 个项,则称 X 为频繁 k 项集。

利用 Apriori 算法挖掘关联规则的详细步骤^[5]有 4 步。

步骤一:首次遍历目标事务库,找出 1 阶频繁项集 L_1 ;

步骤二:将 $L_{k-1}(k \geq 2)$ 采用自身连接形成 k 阶候选项集 C_k ;

步骤三:根据频繁项集的任一子集全部都为频繁项集,可以对 k 阶候选项集 C_k 进行剪枝。

步骤四:循环步骤二、步骤三,直至不能得到更高阶的频繁项集为止,在所得出的所有频繁项集中计算满足要求的关联规则,挖掘结束。

其算法流程如图 1 所示。

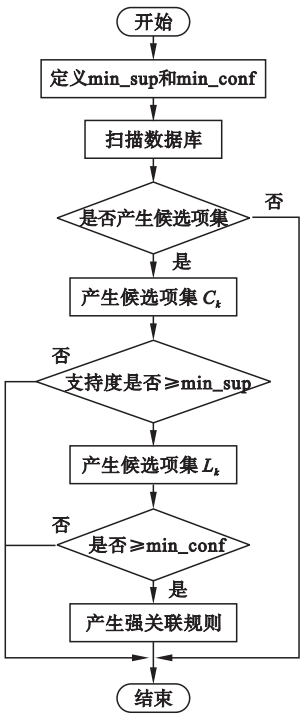


图 1 Apriori 算法流程

2. 脆弱性

Timmerna^[6]于 1981 年在地质领域首先提出了脆弱性概念:“脆弱性是一种度,即系统在灾害事件发生时产生不利响应的程度。系统不利响应的质和量受控于系统的弹性,该弹性标志系统承受灾害事件并从中恢复的能力。”目前,学术界普遍认同的观点为:脆弱性通常划分为暴露度、敏感度和适应度 3 个特征维度。暴露度是指承灾体暴露在风险

下的程度。暴露性是事故发生的必然条件,承灾体只有暴露于外部风险下,事故才有可能发生,故暴露度越高,承灾体承受风险、事故的可能性就越大。敏感度是指承灾体在面对风险、事故发生时抵抗伤害能力的大小。敏感度会直接影响承灾体的脆弱性,承灾体在某一风险因素发生轻微波动就无法正常运转或发挥功能,则说明敏感度高。因此,敏感度越高,承灾体在事故中所遭受的损失或影响就越大。适应度是指承灾体面对风险、事故时的响应或应对能力的大小。适应度通常与承灾体采取的防护、安全措施密切相关,对承灾体采取的安全防护措施会直接影响事故后果的严重性,因此,适应度能够决定承灾体的脆弱性,适应度越高,说明承灾体对事故的应对能力越强大,遭受事故的影响范围和程度就越小。

二、装配式建筑施工安全事故分析

笔者根据《关于 2018 年房屋市政工程生产安全事故和建筑施工安全专项治理行动情况的通报》^[1]中的数据(见图 2)以及有关建筑施工安全生产的文献^[7-9],结合装配式建筑的施工方式和特点,梳理出发生频率较高且造成影响重大的几种事故类型。

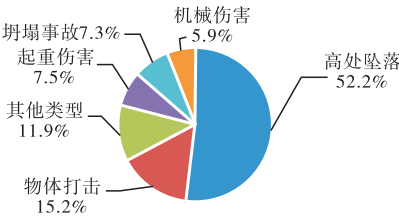


图 2 2018 年事故类型情况

1. 高空坠落

高空坠落一直以来在房屋市政工程安全事故中占据着较高的比例,而装配式建筑也不例外,由于装配式建筑的特点之一是高空作业较多,施工人员在高强度的高空作业中稍有不慎、走神或防护措施不到位,都会发生高空坠落事故,给人员造成极大的伤害,给现场的施工环境带来负面影响。

2. 物体打击

装配式建筑高空作业多,且无法采用脚

手架、铺设安全网,高空作业施工过程中所用的施工工具、建筑材料、零星部件、钢筋石子等有坠落的风险。这些物体一旦从高空坠落,造成的伤害可能会波及地面施工人员、机械设备、建筑物本身,影响正常施工。

3. 机械伤害

装配式建筑因其独特的施工工艺对现场的机械程度要求较高,各种大、小型机械设备均需要专门的技术人员操控,设备选择不当、人为操作失误和机械设备缺乏定期维护都会引发机械伤害事故,该事故的主要承灾体为人员,次要承灾体为机械设备和现场施工环境。

4. 起重伤害

装配式建筑的预制构件体积、重量大,正常的施工作业需要反复多次对构件进行吊装、卸载等工作,加大了此类事故发生的可能性,吊装过程中吊点设置不合理或构件运输过程中发生碰撞等种种原因会导致构件受损,进而倾覆、掉落,严重危及现场施工人员的人身安全和机械设备等财产安全。

5. 坍塌事故

坍塌事故的主要诱因是预制构件的稳定性不高,构件生产、运输、堆放各个环节中的人员操作不规范和客观因素都会影响构件最终的整体稳定性。稳定性不足最终导致坍塌事故发生,严重威胁附近的施工人员的人身安全,造成财产损失。

6. 火灾事故

用于维护机械设备所采用的燃油、汽油以及废旧手套、废旧油性材料属于易燃物,预制构件拼接所用的粘合剂等化学用品属于易燃易爆品,这类物品如堆放不得当易引发火灾,另外,机械设备的操作不当、电线老化短路等也会引发火灾,给人员和机械设备以及周边的自然环境带来不利影响。

对上述 6 种安全事故进行梳理后,笔者分析了各种安全事故造成的危害以及相应事故的承灾载体(见表 1)。装配式建筑施工安全事故的承灾载体主要有人员、机械设备、建筑物本身和环境。

表 1 安全事故类型及其承灾载体

事故类型	事故承灾载体			
	人员	机械设备	建筑物本身	环境
高空坠落	✓			✓
物体打击	✓	✓	✓	✓
机械伤害	✓	✓		✓
起重伤害	✓	✓		✓
坍塌事故	✓	✓	✓	✓
火灾事故	✓	✓	✓	✓

三、基于 Apriori 算法的承灾体脆弱性指标筛选

1. 数据的选取及预处理

本着客观性、全面性、系统性、可行性以

及独立性的原则,采用文献分析法从中国知网搜索主题或关键词“装配式建筑”“施工安全研究”“施工风险研究”等,获取相关研究文献,将大量的文献资料与工程实践相结合后,选取近 4 年相关度较高的 40 篇文献作为 Apriori 算法的初始指标库,形成初始的事务集 *D*,部分指标如表 2 所示。

经过对 40 余篇文献中的指标进行合并、去重、删除与本研究无关或不恰当的指标等操作后,得到处理之后的最终初级指标,共包括 45 个初始指标,每一个初始指标都是一个项集,对指标进行编码,编码后的指标如表 3 所示。

表 2 各文献及其包含指标(部分)

文献	包含指标
[10]	从业人员专业程度、操作人员技术水平、从业人员质量与安全教育培训、机械设备的选择与安拆、机械设备的维护与保养、安全防护设施、构件生产、构件运输及存放、临时支撑系统、专业施工工具、施工组织设计及方案、结构及节点安装技术成熟度、质量与安全生产责任制、事故预防措施计划、质量与安全检查、措施执行与落实、施工现场环境、自然环境、外围环境
[11]	从业人员的身心健康状况不良、操作人员安全意识薄弱、从业人员文化素质水平低、责任心缺乏、违章作业、施工人员技术水平欠佳、PC 构件强度精度质量不合格、吊点挂钩设置不合理、机械设备折旧率高、超载吊运、附属吊具选用不合格、机械设备维护保养不足、塔吊交叉碰撞、安全管理机构及制度的建立与执行不够、天气照明不良引起的作业失误、临边洞口的防护不到位、作业区域的文明施工状况不良
...
[12]	现场安全人员配置、工人专业操作水平、吊车司机操作水平、人员安全防护佩戴、临时支撑承载强度、预制构件生产质量、吊装机械设备选择、构件连接节点技术、高处作业外围防护措施、构件运输临时固定措施、构件吊装安全措施、构件出厂前的质量安全检验、构件运输环境、现场预制构件存储环境、吊装作业气候条件

表 3 编码后各文献包含的指标

编号	指标名称	编号	指标名称
A ₁	人员操作技术水平	A ₁₉	机械设备操作规范化程度
A ₂	人员安全意识	A ₂₀	机械设备的维护与保养
A ₃	安全防护佩戴情况	A ₂₁	机械设备正常运行情况
A ₄	人员身体健康状况	A ₂₂	人机混合作业、高空作业
A ₅	疲劳施工程度	A ₂₃	违章作业等违规操作
A ₆	文化素质水平	A ₂₄	塔吊交叉作业
A ₇	人员配置情况	A ₂₅	是否有高空坠物
A ₈	安全教育培训情况	A ₂₆	吊装超载、超重
A ₉	从业人员资质水平	A ₂₇	设备作业干扰程度
A ₁₀	责任心水平	A ₂₈	临时支撑的强度
A ₁₁	安全管理制度	A ₂₉	施工安全防护措施
A ₁₂	承包商偷工减料	A ₃₀	预制构件的强度和质量
A ₁₃	施工现场环境	A ₃₁	预制构件的存放和运输
A ₁₄	自然环境	A ₃₂	有无可操作平台
A ₁₅	安全标准政策环境	A ₃₃	构件连接部位的强度
A ₁₆	机械设备的选择与安拆	A ₃₄	建筑材料的质量
A ₁₇	设备安全防护措施	A ₃₅	预制构件拼装准确程度
A ₁₈	机械设备安全定期检验	A ₃₆	预制构件进厂检验情况

续表

编号	指标名称
A ₃₇	预制构件吊装水平
A ₃₈	危险品管理情况
A ₃₉	工程质量是否合格
A ₄₀	临时用电风险
A ₄₁	安全标志设置
A ₄₂	预制构件生产
A ₄₃	安全措施费投入情况
A ₄₄	吊点设置合理程度
A ₄₅	事故预防及应急处理

2. 数据频繁项集的挖掘

由于挖掘频繁项集的目的是客观、科学地获取脆弱度评价指标,故只进行频繁 1 项集的挖掘。经过多次试验之后,笔者设置最小支持度为 0.3,最小置信度为 0.8,挖掘输出结果如图 3 所示,frequent 1 – itemsets 为频繁 1 项集,support 为此频繁 1 项集的支持度。将筛选出的频繁 1 项集作为评价指标初步筛选列表,如表 4 所示。

frequent 1-itemsets	support
=====	
frozenset({'A11'})	0.65
frozenset({'A29'})	0.55
frozenset({'A06'})	0.3
frozenset({'A30'})	0.625
frozenset({'A23'})	0.325
frozenset({'A01'})	0.95
frozenset({'A33'})	0.425
frozenset({'A18'})	0.35
frozenset({'A02'})	0.675
frozenset({'A20'})	0.325
frozenset({'A31'})	0.725
frozenset({'A08'})	0.5
frozenset({'A15'})	0.3
frozenset({'A14'})	0.925
frozenset({'A28'})	0.625
frozenset({'A13'})	0.85
frozenset({'A16'})	0.8
frozenset({'A03'})	0.3
=====	

图 3 频繁 1 项集

3. 安全事故承灾体脆弱性评价体系的构建

结合上述装配式建筑事故安全分析和承灾体分类情况,将表 4 中的所有频繁 1 项集整合归类到 4 种承灾体下。经过进一步的筛选修正与归类后,属于影响人员脆弱性的评价指标有A₁、A₂、A₃、A₆、A₈、A₂₃;属于影响

表 4 频繁 1 项集列表

编号	频繁 1 项集
A ₁₁	安全管理制度
A ₂₉	施工安全防护措施
A ₆	文化素质水平
A ₃₀	预制构件的强度和质量
A ₂₃	违章作业等违规操作
A ₁	人员操作技术水平
A ₃₃	构件连接部位的强度
A ₁₈	机械设备安全定期检验
A ₂	人员安全意识
A ₂₀	机械设备的维护与保养
A ₃₁	预制构件的存放和运输
A ₈	安全教育培训情况
A ₁₅	安全标准政策环境
A ₁₄	自然环境
A ₂₈	临时支撑的强度
A ₁₃	施工现场环境
A ₁₆	机械设备的选择与安拆
A ₃	安全防护佩戴情况

机械设备脆弱性的评价指标有 A₁₆、A₁₈、A₂₀;属于影响环境脆弱性的评价指标有 A₁₃、A₁₄;属于影响建筑物本身脆弱性的评价指标有 A₂₈、A₂₉、A₃₀、A₃₁、A₃₃。其中,安全管理制度 A₁₁虽会在一定程度上影响装配式建筑的安全风险,但均不在 4 种承灾体的范畴下,故将其删除。另外,安全标准政策环境 A₁₅在事故发生后并不会对此项指标造成影响和损害,故也将其删除,保留其余的 16 项指标。最终形成了装配式建筑安全事故承灾体脆弱性评价体系(见表 5)。

表 5 装配式建筑安全事故承灾体脆弱性评价体系

目标层	一级指标	二级指标
装配式建筑安全事故承灾体脆弱性评价体系	人员	人员操作技术水平
		人员安全意识
		安全防护佩戴情况
		文化素质水平
		安全教育培训情况
		违章作业等违规操作
	建筑物本身	预制构件的强度和质量
		预制构件的存放和运输
		构件连接部位强度
		临时支撑的强度
机械设备	施工安全防护措施	
	机械设备的选择与安拆	
	机械设备安全定期检查	
	机械设备维护与保养	
环境	施工现场环境	
	自然环境	

四、结 论

笔者结合装配式建筑的特点和建筑安全事故情况分析,梳理了大量学者对装配式建筑施工安全研究和施工风险研究的相关成果,基于不同承灾体(人员、环境、机械设备、建筑物本身)4个层次,采用挖掘频繁项集的Apriori算法,从初始指标库(事务库 D)挖掘频繁1项集作为脆弱性指标,减少了人为的主观性,使得评价指标选取更加客观、科学。构建装配式建筑安全事故承灾体脆弱性指标体系是进行装配式建筑安全事故承灾体脆弱性评价的基础,进一步对指标进行赋权可以确定承灾体的脆弱度,进而确定整体脆弱度情况,根据脆弱度大小有针对性地采取防范措施,降低承载体的脆弱性,有利于降低装配式建筑施工风险,促进装配式建筑产业快速成长和社会和谐发展。

参考文献:

- [1] 全国建筑施工安全形势总体稳定[N]. 建筑时报,2019-04-08(2).
- [2] 范维澄,刘奕,翁文国. 公共安全科技的“三角形”框架与“4+1”方法学[J]. 科技导报,

2009,27(6):3.

- [3] 黄黎明. 基于Apriori和FP-TREE的频繁项目集挖掘算法[D]. 衡阳:南华大学,2018.
- [4] 魏恩超. 基于紧凑模式树和多最小支持度的频繁模式挖掘算法研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [5] 曾雷. 关联规则挖掘中Apriori算法的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
- [6] TIMMERNAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society[J]. Environmental monograph,1981,21(3):164-173.
- [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]. 中国安全科学报,2016,26(11):70-75.
- [8] 王志强,张樵民,王国强,等. 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.
- [9] 乔治. 装配式建筑施工安全事故应对SD模型研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
- [10] 丁彦,田元福. 装配式建筑施工质量与安全风险评估研究[J]. 建筑经济,2019,40(9):80-84.
- [11] 常春光,颜蕊蕊,李腾坤. 基于SD的装配式建筑施工安全评价及管理措施[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2018,20(4):371-376.
- [12] 陈维艳. 装配式建筑工程安全风险评价[J]. 山西建筑,2018,44(21):257-258.

Construction of Vulnerability Index System of Safety Accident Disaster - Bearing Body in Prefabricated Building: Based on Apriori Algorithm

JIANG Dongmin, ZHANG Zhe, HE Dongliang

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Starting from the disaster-bearing bodies where prefabricated building safety accidents occur, using the literature analysis method to collect 40 relevant papers from CNKI as the basic index database, sorting out 45 initial indicators, and using Apriori algorithm to mine frequent 1-itemsets, this paper filters out the preliminary indicators that meet the requirements, combines with the construction safety accident situation and the types of disaster-bearing bodies for analysis. The indicators are further reduced and classified. Finally, a vulnerability assessment index system of prefabricated construction accident disaster-bearing body is formed, which lays the foundation for further vulnerability assessment.

Key words: Apriori algorithm; prefabricated building; vulnerability; evaluation index system

(责任编辑:郝雪 英文审校:林昊)