

# 基于SD的装配式建筑施工安全评价 及管理措施

常春光<sup>1</sup>, 颜蕊蕊<sup>1</sup>, 李腾坤<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国电建集团核电工程有限公司, 山东 济南 250102)

**摘 要:**为了提高装配式建筑施工安全风险管理水平,研究了装配式建筑施工安全风险评价及管理措施。分析了装配式建筑施工安全风险因素;利用层次分析法确定了风险评价指标的权重;绘制了装配式建筑施工安全风险系统动力学流程图;实现了装配式建筑施工安全风险初始值的估算;编写了系统动力学的系统方程,并进行了仿真模拟;进行了装配式建筑施工安全风险分析与评价,得知不同因素对装配式建筑施工安全的影响不同;根据不同的风险应采取不同的措施,为装配式建筑施工安全管理实践提供参考。

**关键词:**装配式建筑;系统动力学;施工安全;风险评价

**中图分类号:**TU714      **文献标志码:**A

装配式建筑最早出现于西欧<sup>[1]</sup>。二战之后为了解决住房紧张问题,促使装配式建筑的产生<sup>[2]</sup>。20世纪60年代,装配式建筑传播到美国、加拿大、日本等发达国家。目前,西方国家装配式建筑发展较为成熟,装配率较高,法国是最早推行装配式建筑的国家之一,预应力装配式框架结构体系装配率达80%<sup>[3]</sup>。日本的建筑工业化处于世界先进水平,是目前住宅产业化技术最成熟的国家之一<sup>[4]</sup>。

与传统建筑施工相比,装配式建筑具有节能、环保的特点,并大大减少了劳动力的数量,进而减少了人工成本。装配式建筑采用工厂集中生产原料,直接运输到施工现场进行拼装组合的方法,施工速度快,能满足社会对住宅的大量需求。由于我国装配式建筑处于发展初期阶段,建筑自身在设计水平、施工

技术等方面还存在一定的问题。我国研究者对这些问题进行了深入研究。常春光等<sup>[5]</sup>将BIM技术和RFID技术结合运用于装配式建筑施工过程管理;齐宝库等<sup>[6-7]</sup>结合装配式建筑特点建立了施工质量评估体系,运用模糊综合评价法对施工质量进行评估,并将BIM技术引入到装配式建筑全寿命周期的管理中;李丽红等<sup>[8]</sup>将装配式建筑成本与现浇建筑进行对比,分析了装配式建筑成本居高不下的原因并给出了改进措施;李朔等<sup>[9]</sup>基于模糊综合评价对沈阳市装配式建筑的制约条件进行了分析;刘骅宇<sup>[10]</sup>将系统动力学方法引入建筑行业BIM技术的应用,分析了BIM技术应用上的缺陷;杨爽<sup>[11]</sup>运用多种理论对装配式建筑施工安全评价体系进行了深入分析与研究,并对实际项目进行了安全等级划分;陈东华<sup>[12]</sup>从科学的角度,将隧道施

工安全与系统动力学结合建立动态模型,详细分析了风险识别、风险评估、风险控制;要伟光<sup>[13]</sup>在信息系统安全的研究上提出了一种新思路,运用系统动力学解决信息系统风险管理问题;刘娇等<sup>[14]</sup>通过创建未确知测度模型对装配式建筑施工安全进行分析,为装配式建筑的施工安全分析提供了一种新方法。关于装配式建筑及其安全管理方面的研究成果为装配式建筑安全管理打下了扎实的基础。但是建立在风险因素之间相互作用、相互关联、相互影响机制上的装配式建筑施工安全管理的研究还有待于进一步深化。因此,笔者提出基于系统动力学的装配式建筑施工安全风险评价及管理方法。

一、装配式建筑施工安全风险因素分析

1. 建立安全风险评价指标体系

装配式建筑在施工过程中有许多风险因素,影响施工的完成及人身安全。笔者根据“4M1E”理论,对其进行风险因素分析。4M1E 指 Man(人)、Machine(机器)、Material(材料)、Management(管理),简称人、机、材、管理方法,工作中要充分考虑人、机、材、管理 4 个方面因素;1E 指 Environment(环境),故合称 4M1E 法。笔者从 5 个方面建立安全风险评价指标(见表 1)。

2. 确定评价指标权重

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)要求决策者给出判断矩阵,即用数值表示每一层次各元素的相对重要性的矩阵。通过数名有关专家采用 1~9 级制评分并求出平均值后,由项目经理综合权衡后,得出判断矩阵并对其进行计算,得出最终评价结果(权重见表 1 括号中数字)。

二、装配式建筑施工风险系统动力学风险流程图绘制

人为因素、材料因素、机械设备因素、管理因素以及环境因素影响装配式建筑项目施工安全。但由于环境风险受主观因素的影响较小,且所占的比例相对较小,受篇幅所

表 1 装配式建筑施工安全风险因素	
一级指标	二级指标
人为风险 A (0.41)	从业人员的身心健康状况不良 A <sub>1</sub> (0.35)
	操作人员的安全意识薄弱 A <sub>2</sub> (0.05)
	从业人员文化素质水平低 A <sub>3</sub> (0.03)
	责任心缺乏 A <sub>4</sub> (0.07)
	违章作业 A <sub>5</sub> (0.10)
	施工人员技术水平欠缺 A <sub>6</sub> (0.16)
材料风险 B (0.14)	机械操作熟练程度不够 A <sub>7</sub> (0.24)
	PC 构件精度不合格 B <sub>1</sub> (0.13)
	PC 构件强度不合格 B <sub>2</sub> (0.27)
	PC 构件质量不合格 B <sub>3</sub> (0.47)
	PC 构件堆放不合理 B <sub>4</sub> (0.08)
	吊点挂钩设置不合理 B <sub>5</sub> (0.05)
机械设备风险 C (0.09)	机械设备折旧率高 C <sub>1</sub> (0.07)
	超载吊运 C <sub>2</sub> (0.25)
	附属吊具选用不合格 C <sub>3</sub> (0.10)
	机械设备的维护与保养不足 C <sub>4</sub> (0.04)
	塔吊顶升未按要求进行 C <sub>5</sub> (0.16)
	塔吊交叉干扰碰撞 C <sub>6</sub> (0.38)
管理风险 D (0.30)	缺乏现场的风险管理 D <sub>1</sub> (0.46)
	对安全防护管理不足 D <sub>2</sub> (0.28)
	安全管理机构及制度的建立与执行不够 D <sub>3</sub> (0.08)
	缺乏对装配式施工的安全教育及培训 D <sub>4</sub> (0.18)
	天气照明不良引起的作业失误 E <sub>1</sub> (0.06)
	总平面图布置不合理 E <sub>2</sub> (0.15)
环境风险 E (0.06)	临边洞口的防护不到位 E <sub>3</sub> (0.54)
	作业区域的文明施工状况不良 E <sub>4</sub> (0.25)

限,暂不考虑环境风险所带来的影响。笔者利用 VENSIM - PLE 软件绘制装配式建筑施工风险系统动力学 (System Dynamics, SD)流程图(见图 1)。

三、装配式建筑施工安全风险仿真

1. 估算风险数值

(1) 建设项目实例概述

以合肥某装配式保障房项目为例,该项目位于合肥市滨湖新区杭州路以北,玉龙路以东,总建筑面积约 112 000 m<sup>2</sup>,总造价为 2.7 亿元人民币。

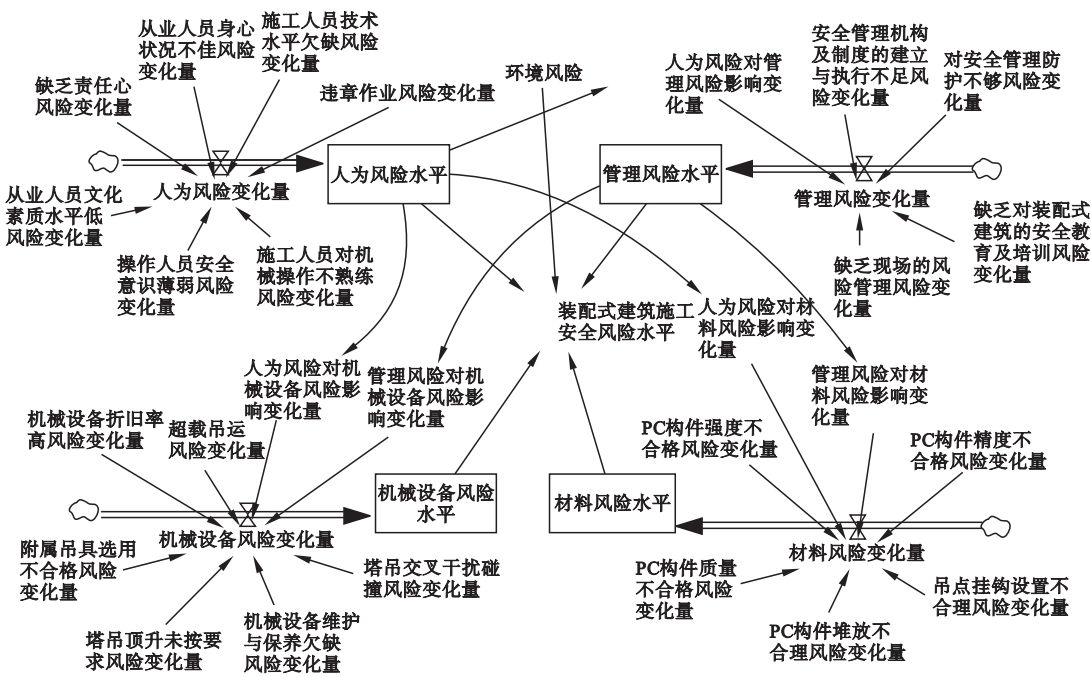


图 1 装配式建筑施工安全风险 SD 流程图

笔者主要考察施工阶段的工期,施工阶段约为 180 d,近似记作 6 个月。通过对该项目施工单位的工作人员、材料、机械设备、管理制度以及环境的实地调查,并同时借鉴众多其他专家学者的研究成果,根据国家标准,确定每个因素的风险初始值(见表 2)。

表 2 装配式建筑施工安全风险因素初始值	
风险因素	初始值
人为风险	0.18
材料风险	0.15
环境风险	0.20
机械设备	0.25
管理风险	0.30

(2) 计算风险变化量  $c$

$c = \lambda \times d \times t$   
式中: $c$  为风险变化量,参考风险事故率数量级的划分标准; $\lambda$  为专家给出的各个因素的事故率; $d$  为排除冬雨季的影响,折合后平均每月工作时间; $d$ ;  $t$  为每天对该风险接触时间,  $h$ 。

以从业人员的身心健康状况不良为例,施工人员水平欠缺导致的事故率为  $1.2 \times 10^{-4}$  次/h,每天接触 14 h,折合后工作天数 18 d,则风险变化量  $c_1 = \lambda \times d \times t = 1.2 \times$

$10^{-4} \times 14 \times 18 = 0.030$ 。同理得出其他风险因素的变化量(见表 3)。

表 3 装配式建筑施工安全风险因素变化量			
风险因素	变化量	风险因素	变化量
$A_1$	0.030	$B_5$	0.049
$A_2$	0.048	$C_1$	0.037
$A_3$	0.045	$C_2$	0.040
$A_4$	0.049	$C_3$	0.049
$A_5$	0.048	$C_4$	0.036
$A_6$	0.046	$C_5$	0.048
$A_7$	0.048	$C_6$	0.050
$B_1$	0.033	$D_1$	0.047
$B_2$	0.031	$D_2$	0.045
$B_3$	0.028	$D_3$	0.046
$B_4$	0.032	$D_4$	0.044

(3) 确定风险因素之间的相互系数  
由于因素之间具有相互影响作用,确定相互影响系数也是重要的环节。采用参数估计法并结合现场咨询,主要以案例中 2 个相关因子的实际水平比值作为影响系数的参考基数,最后,经专家修正后给出了子因素之间的相互影响系数(见表 4)。

2. 编写系统方程式

通过构建的装配式住宅施工阶段安全风险 SD 模型,利用 Vensim 软件进行计算,分

表 4 装配式建筑风险因素之间的相互影响系数

名称	影响系数
人为风险对管理风险	0.45
人为风险对机械设备风险	0.13
人为风险对材料风险	0.10
管理风险对材料风险	0.06
管理风险对机械设备风险	0.09
缺乏 PC 安全教育与培训对机械设备影响系数	1.10

析实际工程随着时间变化的风险变化情况<sup>[15]</sup>。

(1) 人为风险变化量 =  $1/(1 + \text{EXP}(- (0.05 \times \text{一线操作人员安全意识薄弱风险变化量} + 0.03 \times \text{从业人员文化素质水平低风险变化量} + 0.35 \times \text{从业人员的身心健康状况不佳风险变化量} + 0.24 \times \text{施工人员对机械操作熟练程度不佳风险变化量} + 0.16 \times \text{施工人员技术水平欠缺风险变化量} + 0.07 \times \text{缺乏责任心风险变化量} + 0.10 \times \text{违章作业风险变化量})))$

根据表 2 ~ 表 4 对应将公式中初始值、风险变化量依次输入到软件中,以便于后期的模拟与仿真。同理设置其他公式,不再详细列出。

(2) 管理风险变化量 =  $1/(1 + \text{EXP}(- (0.08 \times \text{安全管理机构及制度的建立与执行不足风险变化量} + 0.28 \times \text{对安全防护管理不够风险变化量} + 0.18 \times \text{缺乏对装配式建筑的安全教育及培训风险变化量} + 0.46 \times \text{缺乏现场的风险管理风险变化量} + \text{人为风险对管理风险影响变化量})))$

其中,人为风险对管理风险影响变化量 =  $0.45 \times \text{人为风险水平}$ 。

(3) 材料风险变化量 =  $1/(1 + \text{EXP}(- (0.08 \times \text{PC 构件堆放不合理风险变化量} + 0.27 \times \text{PC 构件强度不合格风险变化量} + 0.13 \times \text{PC 构件精度不合格风险变化量} + 0.47 \times \text{PC 构件质量不合格风险变化量} + 0.05 \times \text{吊点挂钩设置不合理风险变化量} + \text{人为风险对材料风险影响变化量} + \text{管理风险对材料风险影响变化量})))$

其中,管理风险对材料风险影响变化量 =  $0.06 \times \text{管理风险水平}$ ;人为风险对材料

风险影响变化量 =  $0.10 \times \text{人为风险水平}$ 。

(4) 机械设备风险变化量 =  $1/(1 + \text{EXP}(- (0.38 \times \text{塔吊交叉干扰碰撞风险变化量} + 0.16 \times \text{塔吊顶升未按要求风险变化量} + 0.07 \times \text{机械设备折旧率高风险变化量} + 0.04 \times \text{机械设备维护与保养欠缺风险变化量} + 0.25 \times \text{超载吊运风险变化量} + 0.10 \times \text{附属吊具选用不合理风险变化量} + \text{人为风险对机械设备风险影响变化量} + \text{管理风险对机械设备风险影响变化量} + \text{缺乏装配式建筑安全教育与培训对机械设备影响系数})))$

其中,人为风险对机械设备风险影响变化量 =  $0.13 \times \text{人为风险水平}$ ;管理风险对机械设备风险影响变化量 =  $0.09 \times \text{管理风险水平}$ 。

(5) 装配式建筑施工安全风险水平 =  $1/(1 + \text{EXP}(- (0.41 \times \text{人为风险水平} + 0.14 \times \text{材料风险水平} + 0.09 \times \text{机械设备风险水平} + 0.30 \times \text{管理风险水平} + 0.06 \times \text{环境风险})))$

四、装配式建筑施工安全风险分析与评价

通过单因素变动模拟确定各个因素对装配式建筑施工安全的影响,即在其他风险因素值不变的情况下,分别对每个风险因素中所有因子的风险值减少 10% 进行模拟。对模型进行系统动力模拟后,可以直观地看到风险因素随着时间变化的具体风险走势情况(见图 2)。

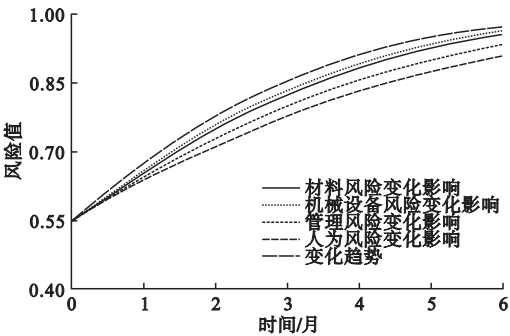


图 2 单因素变化后装配式建筑施工安全水平走势图

由图 2 可知,当每个因素风险值减少 10% 时,人为风险和管理风险变化比较显著。



人为风险偏离初始曲线最严重,说明人为风险是最显著的因素;其次是管理风险因素;材料风险和机械设备风险也偏离初始曲线,但是这两个曲线比较接近,需借助数据进行分析。

五、装配式建筑施工安全管理措施

从仿真结果可以看出,实例项目施工安全风险为0.554,也就是说有55%的事故发生概率。现场施工安全状况不是很好,需要结合仿真结果,对存在的风险采取防御措施,以减少事故的发生率。

1. 人为风险管理措施

人为风险对装配式建筑施工安全风险相当敏感,需对人为风险采取必要的干预措施。尤其需要加强第4个月的管理,及时阻止施工中潜在的人为风险,提高施工安全水平。因此,加强人的管理是提高施工安全水平的首选。具体措施包括:提高从业人员身体素质要求;增强施工人员的安全意识;提高从业人员文化素质水平;事故责任到人,加强员工的责任心;警告施工人员切勿违章作业,并对违章作业的人员进行经济处罚;提高施工人员的技术水平和机械操作熟练程度。

2. 管理风险管理措施

经过仿真模拟发现,管理风险敏感程度仅次于人为风险。在施工中应提高管理人员现场风险管理能力,定期考核管理人员装配式施工的相关知识;对现场采取动态监控,发现施工人员安全防护不到位,及时提醒,对于不服从指挥的人员可以采取适量的惩罚措施,确保施工人员的人身安全;在条件允许的情况下可以开展装配式建筑施工安全教育与培训等相关活动,让施工人员熟悉施工中的每个流程以及容易出现的风险,并掌握相应的措施;建立安全管理机构并完善安全管理制度,加大执行力度。

3. 材料风险管理措施

对从生产厂运来的预制构件在使用前进行精度、强度、质量的校核,确定预制构件是否合格,对于合格率低的预制构件,可以委派

专人去工厂重点监督,确保PC构件的精度、强度、质量合格率,减少材料风险;由于预制构件的需要量大,运送到现场的构件应该统一分类存放在专门存放区,存放区应便于起重设备一次吊运,避免二次运转,要求存放区地面平整,无积水,并有足够的承载能力。

4. 机械设备风险管理措施

选择折旧率低的机械设备,确保安全使用;做好机械设备的布置,避免机械碰撞带来不必要的施工事故;机械使用前,必须熟悉操作指南,每台机械的操作不尽相同,要在能熟练使用后再进行施工;合理使用附属吊具;慎重选择起重机型号,并进行负荷的最大力臂的稳定性计算,避免因超载吊运带来的安全事故;塔吊运行时需要按要求进行,降低事故率;机械设备使用完成后,需要定期进行维护与保养,确保机械的使用寿命。

六、结 语

随着装配式建筑的发展与成熟,对其安全问题的认识也会提升到一个新的高度。笔者通过借鉴系统动力学在建筑质量、成本等领域的应用,结合装配式建筑施工的特点,对我国装配式建筑施工安全风险及管理措施进行了研究,运用系统动力学 VENSIM - PLE 软件为风险因素建立模型并进行仿真模拟。结果表明,该方法是合理、科学有效的,能对未来时间段的风险进行预测,在装配式建筑施工安全风险分析上具有很好的应用价值,能为预防施工过程中可能出现的安全隐患提供参考。

参考文献:

[1] HONG J, SHEN G Q, LI Z, et al. Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost - benefit analysis[J]. Journal of cleaner production, 2018; 649 - 660.

[2] KORKMAZ K A, KARAHAN A E. Investigation of seismic behavior and infill wall effects for prefabricated industrial buildings in Turkey [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2011, 25(3): 158 - 171.

- [3] 赵金怀. 基于循环经济的住宅产业可持续发展研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
- [4] 李燕燕. 住宅产业化发展现状及对策研究[J]. 建筑工程技术与建设,2013,5(3):180-181.
- [5] 常春光,吴飞飞. 基于BIM和RFID技术的装配式建筑施工过程管理[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2015,17(2):170-174.
- [6] 齐宝库,李长富. 装配式建筑施工质量评估指标体系的建立与评估方法研究[J]. 施工技术,2014(15):20-24.
- [7] 齐宝库,李长富. 基于BIM的装配式建筑全生命周期管理问题[J]. 施工技术,2016(15):25-29.
- [8] 李丽红,耿博慧,齐宝库,等. 装配式建筑工程与现浇建筑工程成本对比与实证研究[J]. 建筑经济,2013(9):102-105.
- [9] 李朔,杨晓彤,吕文浩. 基于模糊综合评价的沈阳市装配式建筑制约因素分析[J]. 2016,18(5):482-487.
- [10] 刘骅宇. 基于系统动力学的建筑行业BIM技术应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [11] 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,2015.
- [12] 陈东华. 基于系统动力学的信息系统安全风险管理的研[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [13] 要伟光. 基于系统动力学的隧道施工风险管理[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2013.
- [14] 刘娇,苑俊丽,常春光. 基于未确知测度装配式建筑施工安全风险评价[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2017,19(4):387-393.
- [15] 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.

## Safety Risk Assessment and Management Measures for Prefabricated Construction Based on SD

CHANG Chunguang<sup>1</sup>, YAN Ruirui<sup>1</sup>, LI Tengku<sup>2</sup>

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Power China Nuclear Engineering Company Limited, Jinan 250102, China)

**Abstract:** In order to improve construction safety risk management of prefabricated construction (PC), this paper studies the risk assessment and management measures of prefabricated construction safety, analyzes the safety risk factors of prefabricated construction, determines the weight of the risk evaluation index of prefabricated buildings by using the analytic hierarchy process (AHP) and draws the dynamic flow diagram of construction safety risk system in prefabricated buildings. The paper estimates the initial value of construction safety risk in PC, compiles system equations of system dynamics for simulation and carries out analysis and evaluation of the construction safety risk of prefabricated construction (PC). The paper obtains that the influence of different risk factors on the construction safety risk is different, adopts different measures according to different risks and provides reference for the construction safety management practice of prefabricated buildings.

**Key words:** prefabricated construction; system dynamics; construction safety; risk evaluation