

装配式混凝土结构施工风险管控机制

高 欣, 陈琳彦, 皮宗婕, 黎 舟

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 通过实地调研与会议座谈,对装配式混凝土结构的施工安全风险进行识别,并运用贝叶斯网络对其进行定量评价. 研究发现,构件吊装时失稳发生的概率最高,其次是预制构件堆放时的倾倒,发生概率最低的是吊装时构件剧烈晃动. 针对装配式混凝土的施工安全问题,分别从微观的施工现场、项目设计与施工协同角度和宏观产业发展环境角度提出具体的风险管控措施,构建了多角度、多阶段的施工风险综合防控机制,为装配式混凝土结构的施工安全管理提供了参考与借鉴.

关键词: 混凝土结构; 装配式; 施工风险管控; 贝叶斯网络
中图分类号: TU714 **文献标志码:** A

Construction Risk Control Mechanism for Fabricated Concrete Structure

GAO Xin, CHEN Linyan, PI Zongjie, LI Zhou

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The safety risks of prefabricated concrete structure in the construction phase are identified through field research and conference discussion, and are quantitatively evaluated by using Bayesian network. The results show that the probability of prefabricated components instability during hoisting is the highest, followed by prefabricated components toppling, and the violent sloshing of prefabricated components during hoisting. To deal with these safety problems, concrete risk control measures are proposed from a microcosmic perspective of site management, design and construction coordination in project and a macrocosmic perspective of development environment in industry. A multi-angle and multi-stage construction risk prevention and control mechanism is constructed, which will provide reference for construction safety management of prefabricated concrete structure.

Key words: concrete structure; fabricated; construction risk

control; Bayesian networks

建筑工业化是建筑业转型升级的必然方向,装配式混凝土结构则是落实建筑工业化的重要措施^[1]. 2017年3月,住房和城乡建设部在《“十三五”装配式建筑行动方案》中提出,“到2020年,全国装配式建筑占新建建筑的比例要达到15%以上”^[2]. 可以预见,未来装配式建筑的建设规模将进一步扩大.

与传统现浇结构相比,装配式混凝土结构在提高生产效率、节约资源、降低环境污染等方面具有显著优势. 装配式混凝土结构与现浇结构的根本区别在于构件的生产地点不同. 现浇结构在现场支模并浇筑混凝土;装配式结构需提前在工厂生产预制构件,然后运输到现场进行安装. 构件生产地点的变化和施工工序的不同,使施工过程中的风险因素发生了明显变化. 由于我国装配式混凝土结构还处于发展阶段,缺乏统一的安全管理措施,在工程实践中,预制混凝土构件在生产、运输、现场装配等环节极易叠加安全风险,导致事故发生^[3-4]. 同时,因缺少对相关人员的教育培训,缺乏对装配式混凝土结构施工安全风险的认识,安全管理人员在施工过程中对影响工程项目安全的风险因素未能进行有效防控,装配式混凝土结构施工安全形势严峻.

近年来,关于现浇结构的施工安全风险,国内外已有大量文献,管控方法已趋于成熟. 但装配式混凝土结构新近兴起,与传统施工方法差异较大,且不同国家国情不一,发展阶段不一,使得国外经验难以直接复制^[5]. 目前,国内的装配式混凝土结构研究主要集中在其抗震性^[6]、防水性^[7]、防火性^[8]及技术可靠性^[9]等领域,鲜有文献涉及安全风险. 有学

收稿日期: 2018-12-27

基金项目: 住房和城乡建设部专题(ZLAQ(2018)AQ-2)

第一作者: 高欣(1965—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为建设工程管理及建筑安全管理.

E-mail: gaoxin@tongji.edu.cn

通信作者: 陈琳彦(1991—),女,博士生,主要研究方向为建设工程管理及建筑安全管理. E-mail: chenly1710244@tongji.edu.cn

者以施工现场多维作业空间^[10]为背景,或是从安全事故成因视角^[11]出发,探讨建立施工安全风险管理体系,但其成果尚未形成对装配式混凝土结构施工安全的综合管理机制,未能为系统化管控施工安全风险提供针对性参考。

因此,现阶段亟需体系化、系统性地对装配式混凝土结构施工安全风险管控机制进行研究。本文通过实地调研与会议座谈,梳理当前装配式混凝土结构施工时存在的主要风险点;通过贝叶斯网络模型对施工风险进行定量分析;最后提出施工阶段的具体管控措施,并协同考虑设计与施工阶段,形成面向主要施工风险因素的风险联动管控措施,还要在宏观层面健全行业保障,最终形成多角度、多阶段的施工安全风险综合管控机制。

1 基于贝叶斯网络的风险评价

贝叶斯网络(Bayesian network)由 Pearl 于 1988 年提出^[12],是在贝叶斯方法的基础上,表达变量之间的不确定性因果关系。贝叶斯网络通常为有向无环的图形网络,可以通过分析收集到的数据,推理变量的不确定性概率,还可以通过更新模型变量的条件概率数据不断提高模型的准确性。

在贝叶斯网络结构中,假设联合分布 $P(X_1, \dots, X_n)$ 包含 n 个变量,且对于任意的 X_i ,如果存在 $\pi(X_i) \subseteq \{X_1, \dots, X_{i-1}\}$,使得给定 $\pi(X_i)$, X_i 与 $\{X_1, \dots, X_{i-1}\}$ 中的其他变量条件独立,则有

$$P(X_1, \dots, X_n) = P(X_1)P(X_2 | X_1)P(X_n | X_1, X_2, \dots, X_{n-1}) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \pi(X_i)) \quad (1)$$

由于具有强大的不确定性问题处理能力,贝叶斯网络被广泛应用于不同行业的风险分析^[13-14]。与其他风险评价方法相比,贝叶斯网络具有定性分析与定量分析综合、可处理不完备数据集以及可学习变量间因果关系等优势,适用于风险信息量少且因素间有显著因果关系的风险事件。基于贝叶斯网络风险分析的主要步骤可归纳为:① 构建贝叶斯网络结构;② 确定风险因素节点的概率分布;③ 计算风险事件的概率分布。其中,贝叶斯网络结构构造和节点的概率值分配是贝叶斯网络研究的核心内容。

1.1 构建贝叶斯网络结构

在构建贝叶斯网络结构时,若有丰富的数据,可采用机器学习的方法进行数据分析,进而获取网络

结构^[15]。但若缺少节点信息,通常采用咨询专家意见的方法进行手工建模。在手工建模时,通常依据节点所代表的实际意义,分析它们的因果关系并建立贝叶斯网络。由于我国的装配式混凝土结构刚迈入发展阶段,未有成熟的资料可供借鉴,本研究采用手工建模的方法,借鉴专家实践经验构建贝叶斯网络结构。

风险识别是风险分析的基础,也是构建贝叶斯网络的基础。为识别装配式混凝土结构施工安全风险因素,本研究开展了实地调研工作。在选取调研地点时,遵循类型多样、地域多样的选择标准,最终确定 6 家装配式建筑工地(上海市 4 家、长沙市 1 家、南京市 1 家)与 2 家预制构件生产厂家。典型项目有上海市临江重装备产业区某地块、上海市云汉路小学新建工程、上海市虹口区某保障性住房基地安置房项目等。调研内容主要为参观工地并与工地负责人进行会议座谈,确定装配式建筑的原始施工安全风险清单。然后邀请多位具备装配式建筑安全管理与实践经验的政府人员、建设协会人员、施工企业人员、施工项目一线人员进行会议座谈,根据装配式混凝土结构施工的不同阶段和特点,讨论并二次筛选施工风险因素,最终形成风险因素清单,如表 1 所示。据此构建贝叶斯网络拓扑结构,如图 1 所示。

根据专家经验,预制构件堆放不整齐、层数过高和堆架承载力不足均会造成预制构件倾倒。目前针对预制构件堆架,国家并未出台统一的规范和要求。调研时发现,施工时一些工地的预制构件堆架由构件生产厂家设计并提供,一些工地则依据经验自行准备。在堆架投入使用前,通常依靠施工经验进行判断,未对堆架承载力进行复核算。预制构件一旦倾倒,轻则损坏构件,重则砸落伤人。

与现浇施工相比,装配式建筑施工时吊装作业量大。塔吊作业安全是装配式施工的重中之重。塔吊碰撞、吊装脱钩和构件吊装过程中发生剧烈晃动较为常见。装配式建筑施工现场塔吊数量多,吨位大,作业范围的相互交叉会造成塔吊碰撞,包括平面碰撞和上下碰撞。吊索具作为塔吊和构件之间的连接部分,其牢固性将直接影响吊装安全。预制构件的设计也会影响到施工安全,例如,超长、超重等超规格构件不仅增大了构件的吊装难度,也不利于构件的运输、堆放和安装。预埋件保护不到位和养护时间不足则是构件生产时存在的主要问题。除此之外,影响吊装安全的还有天气因素及人为因素,如风速过大、塔吊操作失误等。

表 1 装配式混凝土结构施工风险因素清单

Tab.1 Risk factors in construction of prefabricated concrete structure

事故	施工阶段	风险事件	风险因素
安全事故 A	预制构件堆放 B ₁	预制构件倾倒 C ₁	预制构件堆放不整齐 X ₁
			预制构件堆放层数过高 X ₂
			预制构件堆架未经受力计算,承载力不足 X ₃
			塔吊碰撞 C ₂
			塔吊场地布置不合理 X ₄
	预制构件吊装 B ₂	吊装脱钩 C ₃	塔吊选型失误,施工时临时增加塔吊 X ₅
			吊索具选型不当 X ₆
			吊索具重复使用产生劳损 X ₇
			吊点与吊索具未能达到稳固可靠连接 X ₈
			预埋件保护不到位 X ₉
	预制构件安装 B ₃	构件剧烈晃动 C ₄	预制混凝土构件养护时间不足 X ₁₀
			构件设计规格过大 X ₁₁
			风速过大 X ₁₂
			塔吊操作失误 X ₁₃
			预制构件安装时失稳 C ₅
	预制构件安装 B ₃	预制构件拼接误差 C ₆	支撑体系承载力与刚度不够 X ₁₄
			混凝土现浇部分强度未达标 X ₁₅
			构件设计不合理 X ₁₆
			构件生产精度不够 X ₁₇
			构件运输、堆放、起吊过程中构件损坏 X ₁₈

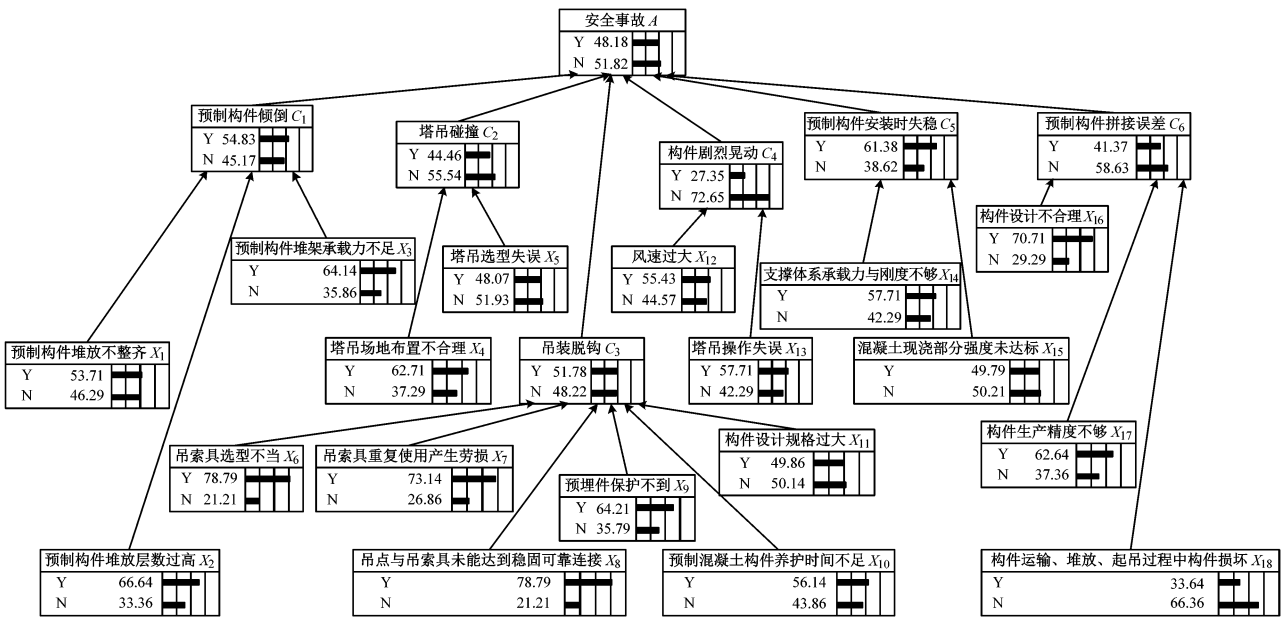


图 1 装配式混凝土结构施工安全风险贝叶斯网络

Fig.1 Bayesian network of safety risk in construction of prefabricated concrete structure

预制构件安装时,会出现失稳或拼接误差的情况.当临时支撑或模板支撑体系承载力与刚度不够,或混凝土现浇部分强度未达标就拆除支撑体系,都会造成构件倾倒.预制构件的拼接误差则要追溯到深化设计、构件生产等施工前置阶段.

1.2 确定风险因素节点的概率分布

贝叶斯网络的节点状态通常分为两种,一种是表示该节点所描述的事件发生,用 Y 来表示,另一种是表示该节点所描述的事件不发生,用 N 来表示^[16].按照逻辑关系,贝叶斯网络结构中的子节点

可以分为两类:

(1) M 类节点——与父节点之间是逻辑“与”或者逻辑“或”关系,用概率来表述,即 M 类节点的概率为 0% 或 100%,这类节点可直接根据逻辑关系进行清晰判断;

(2) N 类节点——与父节点之间的逻辑关系更为复杂,用概率来表述,即 N 类节点的概率在区间 [0,100%] 内,通常使用数据训练或专家经验进行确认.

据此判断本文构建的贝叶斯网络结构中的节点

均为 N 类节点. 因此,除了要对根节点的概率分布进行确认,还需确认紧连根节点的子节点的条件概率分布. 本研究设计了调查问卷,风险概率等级标准参照 IPCC (intergovernmental panel on climate change)^[17] 的概率表述,并在此基础上进行改进,采用 5 档分级的风险,如表 2 所示. 邀请 7 位装配式施工领域专家进行问卷调查,在开始前,详细解释了风险概率等级标准,确保专家完全理解问卷.

表 2 风险概率等级标准

Tab.2 Probability rank of risk accidents

等级	定性描述	概率范围/%
A	很小可能	0~10
B	较小可能	10~33
C	中等可能	33~66
D	较大可能	66~90
E	很大可能	90~100

1.3 计算风险事件的概率分布

根据贝叶斯网络结构和风险因素节点的概率分布,可计算其他节点的风险概率,并估算整体风险. 常见的贝叶斯网络分析工具有 Netica 软件和 MATLAB 的 BNT 工具箱等. 本文采用 Netica 软件计算贝叶斯网络节点的概率,计算结果如图 1 所示.

从图 1 可以看出,装配式混凝土结构施工的整体风险偏高. 在风险事件中,概率最高的是预制构件安装时失稳,概率最低的是构件剧烈晃动. 造成预制构件堆放时倾倒的主要因素是预制构件堆放层数过高;造成塔吊碰撞的主要因素是塔吊场地布置不合

理;造成吊装脱钩的主要因素是吊索具选型不当和吊点与吊索具未能达成稳固连接;造成吊装时构件剧烈晃动的主要因素是塔吊操作失误;造成构件安装时失稳的主要因素是临时支撑和模板支撑体系的承载力与刚度不够;造成构件拼接误差的主要因素是构件设计不合理.

2 施工安全风险管控机制

针对上文识别并评价的预制构件堆放、吊装与安装时的安全风险,对其进行分析后认为,预制混凝土结构施工安全风险的根源有 3 个方面,一是施工阶段风险管控不足,操作规程缺失;二是项目设计与施工协调不足,造成风险隐患;三是行业发展环境不良,无法提供保障. 因此,本部分将从施工现场、设计与施工协同、行业发展 3 个方面提出具体的风险管控措施,并构建装配式混凝土结构施工安全风险管控机制.

2.1 施工阶段管控措施

施工阶段是工程建设的实施阶段,也是工程安全事故的高发阶段. 针对上文识别并评价的预制构件堆放、吊装与安装时的安全风险提出具体管控措施,并增加预制构件进场验收、支撑体系、脚手架、安全防护等重点内容,对预制混凝土施工阶段的安全风险进行全方位防控,具体内容如表 3 所示.

表 3 施工阶段的具体措施

Tab.3 Detailed measures in construction stage

序号	类别	具体要求
1	进场验收	① 预制构件吊点、附着拉结预埋件等具备隐蔽工程验收单,外观无损,标识清晰;② 预制构件的堆架具备设计、计算依据,符合堆放要求.
2	预制构件堆放	① 堆场设置隔离围栏及明显的警示标识牌;② 按品种、规格、吊装顺序等分类堆放.
3	构件吊装	① 吊装前实施安全技术方案和操作规程交底;② 吊装前确认相关安全措施及条件,符合要求后再吊装;③ 构件就位、临时支撑安装完成后,再解除吊具;④ 定期检查起吊使用的钢丝绳、手拉葫芦等起重工具,根据结果定期更换.
4	临时支撑与模板支撑	① 临时支撑与结构之间的连接应预先留设;② 临时支撑不与外脚手架相连;③ 在本层结构的装配式构件与现浇部分形成稳定结构体系后,再拆除临时支撑;④ 叠合板板底的模板支撑要独立成体系;⑤ 采用满堂支撑时,避免叠合板出现悬臂的状况.
5	脚手架	① 鼓励选择与吊装工程相匹配的工具式脚手架;② 脚手架的连墙件尽量设在现浇部位.
6	安全防护	① 装配式建筑楼梯段滞后作业层的部位,要配备可靠的垂直通道及临边防护;② 解除竖向构件吊具时,要有工具式垂直爬梯等安全措施.

2.2 项目设计与施工协同

对装配式建筑而言,施工与设计的割裂加剧了

施工安全事故发生的频次和后果严重程度. 例如,目前深化设计的时间点未有明确规定,施工策划有可

能先行于深化设计,可能出现塔吊选型和选址不当的问题,导致施工过程中发生塔吊碰撞,引起严重后果.针对以上问题,为促进项目设计与施工协同,提出以下措施:

(1) 实行工程总承包模式.装配式建筑涉及预制混凝土构件的设计、生产和安装工作,采用设计施工集成化的工程总承包模式,将五方的责任主体简化为建设单位、工程总承包单位两方,可以减少不同参与主体之间的沟通、协调成本,实现工程协同管理.

(2) 实行预制混凝土构件生产、运输、安装一体化.预制构件的生产监督单位参考了工业产品的监管主体,由技术监督局负责.在构件运输和安装的责任主体划分上,也可借鉴这种思路.构件运输目前缺少专业的运输堆架、运输车辆和物流团队,编制运输方案的责任主体还不明确.构件安装面临的主要问题是缺少熟练工人,缺少训练有素的专业操作团队.对参建各方进行分析后认为,预制构件生产方承担构件的运输和安装工作最有利于产业发展.原因在于:一方面,生产方对预制构件最熟悉,且拥有一定的技术力量,可以承担堆架设计任务,设计出符合构件自身特性的专用运输架,完成构件的成品保护工作;另一方面,构件生产过程有大量的吊装作业,由厂家负责安装是提高厂家服务品质、增加产业价值链、实现专业发展的重要途径.

(3) 深化施工图设计.与现浇结构不同的是,装配式需要在原有的设计图纸上进行深化设计,对混凝土构件进行拆分,利于预制构件的生产和施工.施工图深化设计不但要尽量弥补设计前端出现的失误,还应最大限度地考虑预制构件后续的生产、运输和施工环节.要考虑构件工厂生产的便利性,还要考虑到施工时吊点、吊环的规格和位置,孔洞的预留,以及施工电梯、脚手架等附着装置连接的位置与固定措施等,尽可能避免施工过程中的打凿、返工现象.同时应避免设计超规格的预制混凝土构件,减少构件运输和吊装困难.因此,进行深化设计的时间应在预制构件生产及现场开工前,并且要与生产单位和施工总包单位沟通后再完成.

(4) 完善施工组织设计.装配式建筑的施工组织设计除常规内容外,还要包括与构件生产、运输、进场计划相关联的施工进度计划,包括堆场选址与塔吊选址的现场平面布置以及塔吊选型、操作防护架体选型、模板支撑选型等.除了针对装配式特点编制施工组织设计,专项施工方案的编制工作也应引

起重视,通常包括预制构件堆放、驳运及吊装,以及高处作业、交叉作业的安全防护等.

2.3 行业发展保障

在实践中,不仅项目设计和施工衔接不当会产生一系列问题,行业的体制机制环境也会间接影响到施工安全.在全国各地大力推行装配式建筑的背景下,装配式施工安全管理机制还不完善,项目管控重点还不明确.在此背景下,提出建立如下行业发展保障:

(1) 标准保障.主要是构件的标准化建设和安全管理的标准化建设.构件的标准化建设是行业发展提质增效的关键.实现构件的标准化应加大通用设计研究,形成丰富多样的构件分类清单.安全管理的标准化建设是为实现施工过程中安全管理的有据可依.应编制装配式建筑施工安全生产综合管理规范,包括各方职责、管理流程等,以及编制适用于装配式建筑施工的安全专业技术标准,包括临时支撑、模板支撑、安全防护、脚手架、机械机具等.

(2) 组织保障.装配式建筑发展的组织保障包括内部组织保障、外部组织保障和专业技术力量协同.内部组织保障是指建设主管部门内质量、技术、标准、经济、信息开发等多个内部部门之间的密切配合.外部组织保障指建设主管部门与交通部门、质量技术监督部门之间的协作.规格大、吨位重的预制混凝土构件运输时会影响交通安全,需要提前在交通部门进行备案.为保证预制混凝土构件的生产质量,除了实行监理驻厂监造外,还可参考产品质量的监管方式,由质量技术监督局负责.专业技术力量协同是指完善装配式建筑联席会议机制,补充安全相关研究机构及专家队伍,作为政府组织的后备专业技术力量.

(3) 资金保障.主要是增加政府资金补贴方式和调整安全文明施工措施费费率.针对装配式建筑,目前政府的资金奖励和扶植主要集中在开发阶段和施工阶段.政府可在资金保障上调整思路,向前延伸财政奖励,鼓励按照国标制造结构部件的企业获得资金奖励,推动装配式建筑产品通用体系和专用体系发展.与现浇结构相比,装配式建筑的安全文明施工措施的内容发生了变更,增加的部分有堆场设置和地基加固、构件临时支撑、构件驳运等;减少的部分有围护体系、粉尘污染、噪音控制、垃圾排放等.安全文明施工措施费是工地安全管理的基础资金保障,需重新测算装配式建筑的措施费费率.在实际工程中,可根据建筑装配率的不同,对安全文明施工措

施费进行合理调整,并督促建设单位及时拨付。

(4) 人员保障. 主要是建立人员培训机制,包括编制统一教材、成立培训机构和建立培训体系等. 人员培训不仅包括一线施工工人,还应包括参建各方的项目管理人员等. 通过培训,培养一批成熟的装配式建筑产业工人,形成成熟的、专业的装配式建筑项目管理及施工作业团队,为我国新型建筑工业化发展提供高素质劳动力,实现产业劳务力量升级。

(5) 技术保障. 主要是 BIM (building information modeling, 建筑信息模型) 技术的推广使用、构件信息管理平台等. BIM 技术可用于装配式

建筑的场地布置、吊装模拟等. 同时,还可在 BIM 技术基础上,积极采用 VR(virtual reality,虚拟现实)技术、AR(augmented reality,增强现实)技术等信息化手段进行施工安全交底. 建立构件信息管理平台主要是为实现全生命周期的构件信息可追溯,建立完善的构件质量责任制度。

综上所述,装配式混凝土结构施工安全风险管控,不但要做好施工现场的安全工作,协同考虑项目的设计与施工阶段,还要考虑宏观的行业体系,形成多角度、多阶段的施工风险综合防控机制,如图 2 所示。

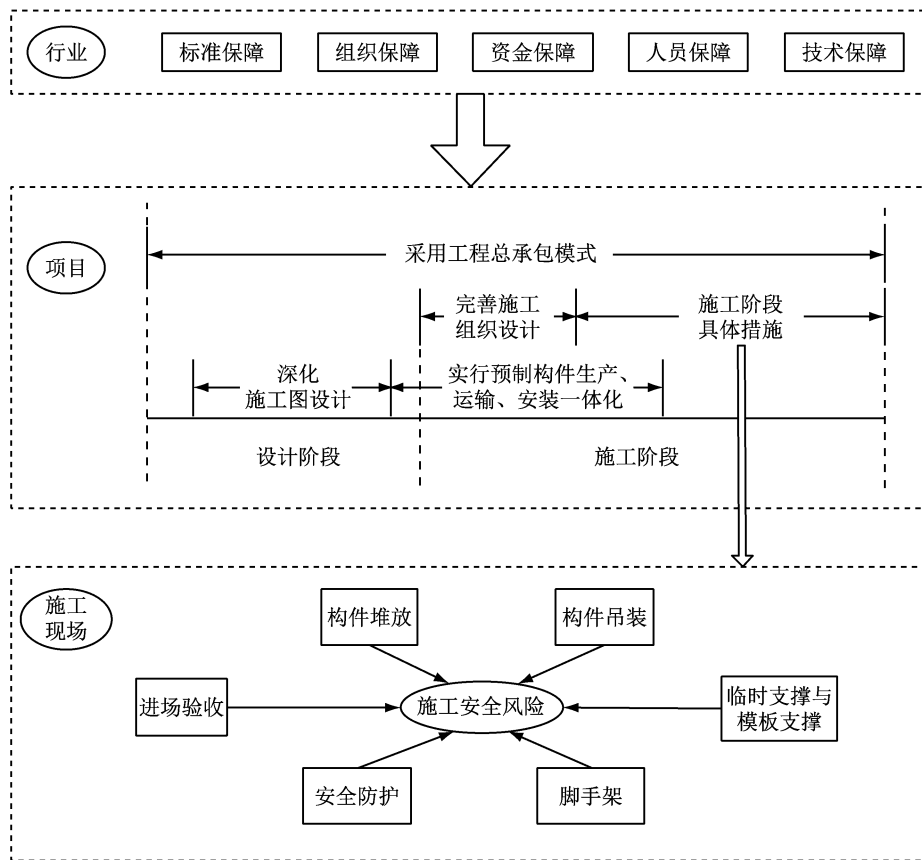


图 2 施工安全管控机制

Fig.2 Mechanism of construction safety control

3 结论

装配式建筑是建筑业转型升级的必然发展方向. 然而,装配式建筑施工安全相关的配套政策措施还不完善,凭借经验施工的惯例带来了许多安全隐患. 本文通过贝叶斯网络进行施工风险定量评价后发现,装配式混凝土结构施工的整体风险偏高,风险事件中概率最高的是预制构件安装时失稳. 同时,堆架设计、塔吊场地布置、吊索具和支撑体系也

需引起重视. 装配式混凝土结构施工安全风险管控不但需要推行工程总承包模式,协同项目的设计和施工工作,还需要从更为宏大的行业发展角度完成多层次的保障工作,包括标准保障、组织保障、资金保障、人员保障等,希冀为装配式混凝土结构的安全施工提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术,

- 2010,41(12):1074.
- JIANG Qinjian. Overview of the development of fabricated concrete buildings at home and abroad [J]. *Architecture Technology*, 2010,41(12):1074.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. “十三五”装配式建筑行动方案[J]. *居业*, 2017(9):15.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. “13th Five-Year” prefabricated building action plan[J]. *Home*, 2017(9):15.
- [3] LUO Lizi, MAO Chao, SHEN Liyin, *et al.* Risk factors affecting practitioners' attitudes toward the implementation of an industrialized building system a case study from China[J]. *Engineering Construction and Architecture Management*, 2015(22): 622.
- [4] CHEN Ying, OKUDAN G E, RILEY D R. Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings [J]. *Automation in Construction*, 2010(19): 235.
- [5] JAILLON L, POON C S. Design issues of using prefabrication in Hong Kong building construction [J]. *Construction Management and Economics*, 2010,28(10): 1025.
- [6] 林宗凡, SAGAN E I, KREGER M E. 装配式抗震框架延性节点的研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1998,26(2):134.
- LIN Zongfan, SAGAN E I, KREGER M E. Research on ductile joints of fabricated seismic frame [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 1998,26(2):134.
- [7] 杨霞, 仲小亮. 预制装配式建筑外墙防水密封现状及存在的问题[J]. *中国建筑防水*, 2016(12):16.
- YANG Xia, ZHONG Xiaoliang. Present situation and existing problems of prefabricated building exterior wall waterproof seal[J]. *China Building Waterproofing*, 2016(12):16.
- [8] VIDJEAPRIYA R, JAYA K P. Experimental study on two simple mechanical precast beam-column connections under reverse cyclic loading [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(4):402.
- [9] 郭小农, 高舒羽, 裴进玉, 等. 预制混凝土梁端预埋槽钢节点静力性能试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9):1258.
- GUO Xiaonong, GAO Shuyu, PEI Jinyu, *et al.* Test on static performance of precast concrete beam ends with precast concrete beams [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017,45(9):1258.
- [10] 陈伟, 秦海玲, 童明德. 多维作业空间下的装配式建筑工程资源调度[J]. *土木工程学报*, 2017,50(3):115.
- CHEN Wei, QIN Hailing, TONG Mingde. Resource scheduling of fabricated building engineering under multi-dimensional work space[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017,50(3):115.
- [11] 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]. *中国安全科学学报*, 2016,26(11):70.
- CHEN Wei, FU Jie, XIONG Fugang, *et al.* A safety grey clustering evaluation model for prefabricated building engineering[J]. *Chinese Journal of Safety Science*, 2016, 26(11):70.
- [12] PEAR J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [13] 范厚明, 崔文罡, 温文华, 等. 基于贝叶斯网络的船舶靠港装卸作业溢油风险评价[J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(18):51.
- FAN Houming, CUI Wengang, WEN Wenhua, *et al.* Ship oil spill risk evaluation on its berthing and handling in port area based on bayesian network[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015,45(18):51.
- [14] 刘佳, 史丽伟. 基于贝叶斯网络的港口煤炭供应链脆弱性研究[J]. *技术经济与管理研究*, 2016(10):7.
- LIU Jia, SHI Liwei. The research of vulnerability for sea port coal supply chain based on Bayesian network[J]. *Journal of Technical Economics and Management*, 2016(10):7.
- [15] MATIAS J M, RIVAS T, MARTIN J E, *et al.* A machine learning methodology for the analysis of workplace accidents [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2008,85(3/4):559.
- [16] FRIEDMAN N, LINIAL M, NACHMAN I, *et al.* Using Bayesian networks to analyze expression data[J]. *Journal of Computational Biology*, 2000(7):601.
- [17] SPROLES C. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. *Government Information Quarterly*, 2009, 26(2):428.