

文章编号:1671-6833(2024)06-0092-08

高层建筑施工安全关键风险因子及耦合效应分析

成连华, 杨曜妍, 李树刚, 魏凯, 曹东强

(西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为探究高层建筑施工安全的关键性风险因子及风险因素的耦合效应,将复杂网络模型和 $N-K$ 模型相结合,根据事故案例调查报告的完整性选取了 2015—2022 年高层建筑施工事故案例 158 起,根据扎根理论对其中 84 起事故案例原因进行信息编码,经统计分析识别出人、机、料、管、环 5 类风险因素和 23 个风险因子。根据 $N-K$ 模型计算风险因素各类耦合形式的风险耦合值,运用 Ucinet 软件得出复杂网络模型中各风险因子的度值分布。通过 Netdraw 绘制高层建筑施工风险耦合网络模型图,并对 23 个风险因子的节点进行潜在风险链分析,将潜在风险链耦合形式和 $N-K$ 模型耦合度值相结合对标准化出度进行修正。用剩余 74 起事故案例对所得结果进行验证,验证结果与先前 84 起事故案例分析结果大致相符。结果表明:参与耦合的风险因素数量越多风险耦合值越大,其中,有设备因素参与的耦合形式耦合值最大。现场管理不到位、安全教育培训不到位、安全管理制度不完备、未正确穿戴防护用品和隐患排查治理不到位是需要重点防控的关键性风险因子。

关键词:复杂网络;高层建筑;耦合关系; $N-K$ 模型;风险因子

中图分类号:X913.4;TU714

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2024.06.006

随着我国城市化进程的快速推进,城市用地日渐紧张,高层建筑数量和高度需求也随之增大。高层建筑施工具有风险高、交叉作业多和施工过程复杂等特点,一旦发生事故,则后果严重^[1]。因此,对高层建筑施工安全关键性风险因子识别并进行耦合分析,对预防高层施工事故和提升施工安全管理水平具有重要现实意义。

高层建筑施工风险系统复杂,众多学者对高层建筑展开深入研究。Zaini^[2]通过问卷调查和现场调研方式对风险因素进行探索性因子分析,得到高层建筑施工风险因素间的关系;Manzoor 等^[3]通过发放问卷调研高层建筑安全事故,得出 RII 值最高的是在高处或临边作业时未使用跌落保护系统;Is-mail 等^[4]采用问卷调查法识别建筑施工现场安全风险因素,确定了工人的个人安全意识和交流是主要的风险因素;刘辉等^[5]采用加权风险度确定高层建筑风险因素的风险等级,以项目塔吊提升施工为例对该方法进行可靠性验证。张兵等^[6]、董翔等^[7]、谢尊贤等^[8]、蔡久顺等^[9]分别运用 CBR 技

术、专家赋值法、物元多级可拓评价模型和三角模糊数等评估了高层建筑施工风险。

综上所述,国内外众多学者从不同角度对高层建筑施工安全进行了研究,在高层建筑施工安全风险研究方面取得了一定的成果,为开展高层建筑施工安全风险研究奠定了基础。但高层建筑施工事故不是单一风险因子作用的结果,风险因子的耦合效应可能会增加事故的后果严重性,因此,针对高层建筑施工关键风险因子及其耦合效应研究进行具体管控至关重要。

近年来,有关风险耦合的方法研究也逐渐深入。Falter 等^[10]提出了一种基于风险链耦合模型的新方法来评估流域洪水的风险;Lozoya 等^[11]构建了海岸多灾种风险耦合分析框架,为管理者做出安全资源配置决策提供了理论依据;Pan 等^[12]构建耦合度模型,探究地铁盾构隧道施工安全风险耦合的影响,指出防控主要安全风险可降低风险防御系统和事故发生概率的耦合度。文艳芳等^[13]、骆成等^[14]、姚浩等^[15]、周红波等^[16]分别运用 PSR-IAHP 模型、灰

收稿日期:2024-05-19;修订日期:2024-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074217)

作者简介:成连华(1977—),男,山东莘县人,西安科技大学教授,博士,主要从事安全管理与安全系统工程领域的研究, E-mail:chenglianhua@126.com。

引用本文:成连华,杨曜妍,李树刚,等.高层建筑施工安全关键风险因子及耦合效应分析[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(6):92-99.(CHENG L H, YANG Y Y, LI S G, et al. Analysis of key risk factors and coupling effects of construction safety of high-rise buildings[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(6): 92-99.)

色关联分析、构建新的 AHP-*N-K* 模型、复杂网络和 SNA/*N-K* 模型分别对海底隧道交通、沿海危化品道路运输、高层建筑和塔吊事故的风险耦合进行研究。关于风险耦合方法的研究众多,本文结合复杂网络及 *N-K* 模型对高层建筑施工耦合模型进行分析,探究高层建筑施工安全的关键性风险因子。复杂网络能够较好地分析风险因子之间的结构关系,得出关键性风险因子,但对风险因素相互耦合从而诱发危险事件发生的贡献度较低;*N-K* 模型可以基于事故案例计算不同风险因素耦合引发事故的耦合值,但难以确定安全管理过程中应注意的关键风险因子。鉴于此,本文将复杂网络模型和 *N-K* 模型相结合,互补复杂网络和 *N-K* 模型在风险分析方面的优点,以便对高层建筑施工事故的风险因素和风险因子进行更全面地耦合分析。

1 基于案例的高层建筑施工安全风险分析

1.1 数据来源及整理

根据中华人民共和国住房和城乡建设部官方网站和各地应急管理局官网等相关事故案例调查统计,依据事故案例调查报告的完整性,收集 2015—2022 年间高层建筑施工起数 158 起,其中涉及民用住宅房屋、厂房、商业及服务用房等,收集的案例数据具有较强的代表性和可信度。主要事故类型占比如表 1 所示。

表 1 建筑施工安全事故类型统计比例

Table 1 Statistical proportion of types of construction safety accidents

事故类型	占比/%
高处坠落	53.2
物体打击	13.9
坍塌	9.5
起重伤害	7.6
机械伤害	4.4
其他伤害	11.4

高处坠落是高层建筑施工安全事故数量最多、死亡率最高的事故类型,其次为物体打击事故和坍塌事故。因此,高处坠落事故格外引发关注。从各地应急部门发布的高层建筑施工事故案例中,筛选出 84 起事故案例调查报告,分析其事故发生原因,对风险因素及风险因子进行识别,用以高层建筑施工安全的耦合分析,用剩余 74 起事故案例进行验证。

1.2 高层建筑风险因子表

根据 2015—2022 年高层建筑施工 84 起事故的

统计数据,结合高层建筑复杂性等特征,根据扎根理论对事故案例的初始语句进行编码,总结出初始范畴、主范畴及核心范畴,如表 2 所示。

表 2 事故案例扎根理论编码

Table 2 Accident cases grounded theory coding

初始语句	初始范畴	主范畴	核心范畴
施工升降机司机周建明违规操作导致事故发生	升降机司机违规操作	违规作业	人员风险
24 号楼 23 层电梯口安全门闭锁功能不全	电梯口安全门闭锁功能不全	设备或防护用品存在缺陷	设备风险
未安装有效的上限位装置及上极限装置	限位装置及极限装置缺失	物料缺失、损坏或质量不合格	物料风险
项目部对现场作业管理不严,检查、巡查不及时,对作业人员的违规行为未及时发现并纠正	现场安全管理检查不到位	现场管理不到位	管理风险
事故当天天气炎热,驾驶室空调与室外温差较大	室内外温差大	天气条件差	环境风险

通过扎根理论共编码出 23 个主范畴,本文称之为高层建筑施工安全的风险因子,在此基础上进一步总结归纳出人员、设备、物料、管理、环境 5 个核心范畴,即人、机、料、管、环,本文将之称为高层建筑施工安全的风险因素,具体内容如表 3 所示。

2 高层建筑施工风险耦合分析方法

2.1 耦合效应

耦合始源于物理学,指体系中 2 个或 2 个以上个体,通过相互作用、相互影响彼此联系的现象^[17]。耦合效应又称联动效应,是指系统中 2 个或 2 个以上个体之间通过各种交互作用而彼此影响,从而一起协同产生增力,任何单一体系都无法完成任务。高层建筑施工安全风险耦合是指高层建筑施工的各项风险因子之间的相互作用和依赖程度,风险因子间通过相互耦合改变高层建筑施工安全的局部或整体情况,进而引起事故发生。根据 84 起事故案例致因分析,高层建筑施工事故的发生至少是两类风险因素耦合所导致。

高层建筑施工风险不是单一因子作用的结果,而是多个风险因子组合形成风险耦合。将事故案例中提取的风险因子归纳分类,这些因子是造成风险事故的深层致因。这些风险因子以物质、能量和信

表 3 高层建筑施工风险因子表

Table 3 High-rise building construction risk factor table	
风险因素	风险因子
人员风险 A	未正确穿戴防护用品 A1
	身体状况不佳 A2
	违规作业 A3
	操作失误 A4
	作业人员无证上岗 A5
	冒险作业 A6
设备风险 B	设备稳定性和可靠性差 B1
	设备维修保养不当 B2
	设备布置安放不合规 B3
	设备或防护用品存在缺陷 B4
物料风险 C	物料缺失、毁坏或质量不合格 C1
	物料与施工现场不匹配 C2
管理风险 D	安全教育培训不到位 D1
	技术交底不到位 D2
	生产管理制度不完备 D3
	警示标识与防护措施不完善 D4
	现场管理不到位 D5
	未验收合格但投入使用 D6
	隐患排查治理不到位 D7
	现场安全管理人员配备不足 D8
环境风险 E	现场照明不足 E1
	天气条件环境差 E2
	现场作业环境差 E3

息为媒介进行交互作用,各风险因子之间耦合作用不断积累,系统风险不断积累,最终导致事故的发生。

2.2 N-K 模型理论

在 N-K 模型中,N 代表高层建筑施工过程中风险因素的数量,每个风险因素都有 n 种存在状态,因此,高层建筑施工体系一共有 n^N 种状态^[18]; K 代表与某一风险因素存在联系的风险因素数量。K 最小值为 0,表示这一风险因素不跟自身之外的其他风险因素存在关联,最大值为 N-1,即这一风险因素与其他所有风险因素都存在关联。各风险因素之间的耦合度值用 T 表示^[19],用以衡量不同风险过程中风险因素之间耦合值的大小。高层建筑施工安全事故是多类风险因素相互耦合的结果,高层建筑施工安全风险耦合可大致表示为人、机、料、管、环因素之间的相互作用,耦合类型如图 1 所示。

(1)单因素风险耦合:指影响高层建筑施工安全的单个风险因素内部的风险因子之间的耦合所引发的风险,属于同质因素耦合。单因素风险耦合理论上存在的所有耦合形式包括人的因素风险耦合(A-A)、设备因素风险耦合(B-B)、物料因素风险耦合(C-C)、管理因素风险耦合(D-D)和环境因素风

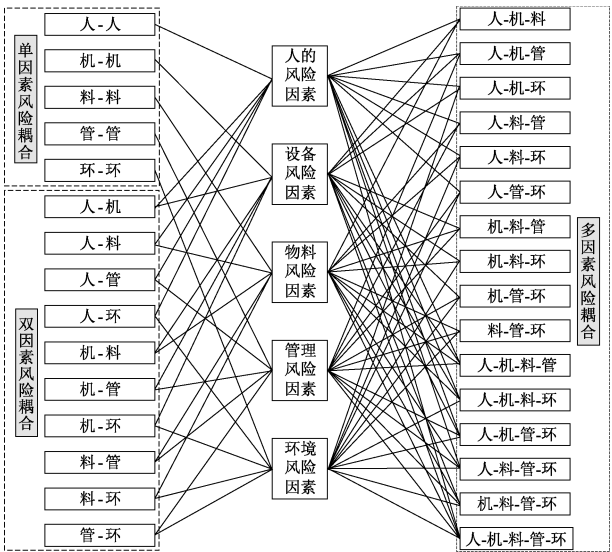


图 1 风险耦合类型图

Figure 1 Risk coupling type diagram

险耦合(E-E)这 5 种形式。

(2)双因素风险耦合:指影响高层建筑施工安全的 2 个风险因素之间的相互作用,对系统产生影响从而导致危险,属于异质因素耦合。包括 A-B、A-C、A-D、A-E、B-C、B-D、B-E、C-D、C-E 和 D-E 共 10 种形式。以人-机耦合为例,双因素耦合公式^[19]为

$$T_{21}(A,B)=\sum_{h=1}^H\sum_{i=1}^I{P_{hi\dots}}\cdot\log_2\frac{P_{hi\dots}}{P_{h\dots}\cdot P_{i\dots}}。(1)$$

式中:T 为耦合度值, p_h 、 p_i 分别表示人、机处于 h、i 状态时发生耦合的概率。

(3)多因素风险耦合:指影响高层建筑施工安全的 3 个及以上风险因素之间的相互作用和影响,从而导致的风险。三因素风险耦合包括 A-B-C、A-B-D、A-B-E、A-C-D、A-C-E、A-D-E、B-C-D、B-C-E、B-D-E 和 C-D-E 共 10 种形式,;四因素风险耦合包括 A-B-C-D、A-B-C-E、A-B-D-E、A-C-D-E 和 B-C-D-E 共 5 种形式;五因素风险耦合为 A-B-C-D-E。以人-机-料-管-环耦合为例,多因素风险耦合计算公式^[19]为

$$T_{51}(A,B,C,D,E)=\sum_{h=1}^H\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^J\sum_{k=1}^K\sum_{l=1}^L{P_{hijkl}}\cdot\log_2\frac{P_{hijkl}}{P_{h\dots}\cdot P_{i\dots}\cdot P_{j\dots}\cdot P_{k\dots}\cdot P_{l\dots}}。(2)$$

式中:T 为耦合度值; P_{hijkl} 表示人、机、料、管和环分别处于 h、i、j、k、l 状态时发生耦合的概率。

2.3 复杂网络的拓扑结构

复杂网络理论是以图论为基础,利用节点和连边描述系统中各主体和内部演化过程依次研究复杂系统及其拓扑结构。图论中的节点表示复杂网络中的单独个体,连边则表示个体之间相互影响^[20-21]。有向加权事故网络的建模示例,如图 2 所示,将上述

分析的 23 个风险因子作为网络模型的节点,若某风险因子之间存在相互影响关系,则将风险因子对应的节点进行连边,连边的方向表示风险因子的先后因果关系,由 A 指向 B 表示 A 引起 B 发生。将不同风险因子之间耦合关系的强弱作为节点与边之间赋值的权重,由此构建高层建筑施工有向加权事故网络。

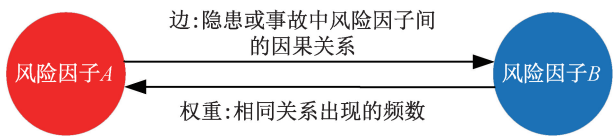


图 2 有向加权事故网络的建模示例

Figure 2 Modeling example of directional weighted accident network

3 基于 N - K 模型和复杂网络的耦合关系分析

3.1 高层建筑施工 N - K 模型分析

在 N - K 模型中,用 0 和 1 对人、机、料、管、环 5 个风险因素进行标记,如果该风险因素在事故案例中参与耦合引发事故记为 1,未参与耦合事故仍旧发生记为 0。例如一次事故中,人、机、管参与耦合,料、环未参与耦合,就将其概率代号记为 P_{11010} 。如图 1 所示,5 类风险因素理论存在 31 种耦合形式,实际根据 84 起事故案例总结主要存在如下 10 种风险因素的耦合类型,耦合分布如表 4 所示。

表 4 高层建筑施工事故耦合频次

Table 4 Coupling frequency of high-rise building construction accidents

耦合类型	发生次数	概率代号	发生频率
人-人	2	P_{10000}	0.024
人-管	31	P_{10010}	0.369
人-环	1	P_{10001}	0.012
机-管	5	P_{01010}	0.059
管-环	1	P_{00011}	0.012
人-机-管	29	P_{11010}	0.345
人-料-管	8	P_{10110}	0.095
人-管-环	2	P_{10011}	0.024
人-机-料-管	4	P_{11110}	0.048
人-机-管-环	1	P_{11011}	0.012

用事故耦合类型发生频数除以事故总起数粗略估计风险因素耦合的概率。根据表 4 计算出人、机、料、管、环 5 类风险因素在耦合过程中发生的概率,结合公式计算事故案例中不同风险因素耦合方式的耦合度值 T ,如表 5 所示。

对风险耦合值进行排序: $T_5(A,B,C,D,E)>T_4(A,B,D,E)>T_3(A,B,C,E)>T_4(A,B,C,D)>$

表 5 各类风险因素耦合模式下的风险耦合值

Table 5 The risk coupling value of the coupling mode with various risk factors

耦合度	取值	耦合度	取值
$T_2(A,B)$	0.032 2	$T_3(A,C,D)$	0.029 3
$T_2(A,C)$	0.016 4	$T_3(A,C,E)$	0.036 6
$T_2(A,D)$	0.003 9	$T_3(A,D,E)$	0.034 1
$T_2(A,E)$	0.018 8	$T_3(B,C,D)$	0.052 3
$T_2(B,C)$	0.008 6	$T_3(B,C,E)$	0.038 6
$T_2(B,D)$	0.033 6	$T_3(B,D,E)$	0.042 4
$T_2(B,E)$	0.014 4	$T_3(C,D,E)$	0.038 8
$T_2(C,D)$	0.008 2	$T_4(A,B,C,D)$	0.100 3
$T_2(C,E)$	0.013 8	$T_3(A,B,C,E)$	0.127 0
$T_2(D,E)$	0.019 1	$T_4(A,B,D,E)$	0.163 7
$T_3(A,B,C)$	0.053 7	$T_4(A,C,D,E)$	0.090 3
$T_3(A,B,D)$	0.054 8	$T_4(B,C,D,E)$	0.093 0
$T_3(A,B,E)$	0.074 8	$T_5(A,B,C,D,E)$	0.187 2

$T_4(B,C,D,E)>T_4(A,C,D,E)>T_3(A,B,E)>T_3(A,B,D)>T_3(A,B,C)>T_3(B,C,D)>T_3(B,D,E)>T_3(C,D,E)>T_3(B,C,E)>T_3(A,C,E)>T_3(A,D,E)>T_3(A,C,D)>T_2(B,D)>T_2(A,B)>T_2(D,E)>T_2(A,E)>T_2(A,C)>T_2(B,E)>T_2(C,E)>T_2(B,C)>T_2(C,D)>T_2(A,D)$ 。由表 5 可知,风险耦合值的大小与参与耦合的风险因素个数成正比,耦合因素数量越多,风险耦合值越大, $T_5>T_4>T_3>T_2$ 。五因素风险耦合值最大,其次是四因素、三因素和双因素。避免多个风险因素相互耦合是安全管理工作的主要内容。在四因素耦合过程中, $T_4(A,B,D,E)$ 和 $T_3(A,B,C,E)$ 的风险耦合值较其他耦合更大,这 2 种方式的耦合同时包含人、机、环 3 个风险因素,说明当这 3 个风险因素进行耦合时,对高层建筑施工过程会产生巨大潜在风险。在三因素耦合过程中, $T_3(A,B,E)$ 风险耦合值最大,其次是 $T_3(A,B,D)$ 、 $T_3(A,B,C)$,共同特点是均包含人、机 2 个风险因素,说明高层建筑施工事故发生的主要原因是人、机两大因素,所以应着重避免人、机因素相耦合。在双因素耦合过程中, $T_2(B,D)$ 和 $T_2(A,B)$ 的耦合值明显高于其他双因素耦合方式的耦合值,其共同特点是都包含机的风险因素,要重点关注设备可靠性和稳定性、注意设备或防护用品是否存在缺陷等问题。分析多起事故类型,人-管、人-机-管这 2 种耦合形式较为普遍,但风险耦合值并不突出,表明两者之间耦合发生风险的概率较低,频数高主要源于其自身的自然频数较高。

3.2 高层建筑施工事故网络模型分析

本文统计了 84 起高层建事故案例,基于事故

原因分析得出 5 类风险因素 23 个风险因子,根据风险因子之间的相互关系,运用 Ucinet 构建风险因素矩阵,利用软件 Netdraw 绘制出高层建筑施工过程风险耦合网络图,如图 3 所示。

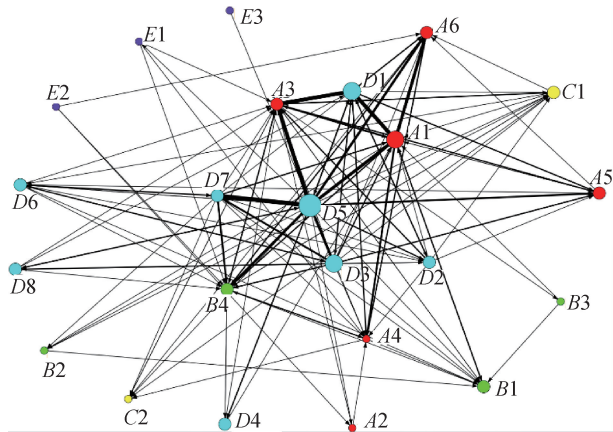


图 3 高层建筑施工风险耦合网络模型图
Figure 3 Construction risk coupling network model of high-rise building

本文从网络规模与密度、网络平均路径、节点聚类系数和网络节点度 4 个方面分析高层建筑施工的复杂网络特性。

(1)网络规模与密度。高层建筑施工事故风险耦合有向加权网络的网络密度指事故中各风险因子之间的紧密程度,对于节点为 n ,连边数为 l 的有向加权网络,其网络密度 ρ 可由 $\rho = l/n(n - 1)$ 计算^[22]。本文高层建筑施工事故风险耦合有向加权网络由 23 个节点和 124 条连边组成,其网络密度为 0.245 1。

(2)网络平均路径。网络平均路径为 2.524,说明网络中每个节点与其他节点平均通过 2.524 条路径连接,风险传播速度快,预防措施难度高。如安全培训教育不到位,导致现场管理不到位,进而员工违规操作,引起事故发生。不同风险因子之间的联系非常紧密,极易触发事故。

(3)节点的聚类系数。聚类系数的最高值和最低值分别是 1 和 0,平均聚类系数为 0.422,聚类系数整体较大,具有较高的派系性。风险耦合网络中大多节点并不彼此相邻,但相邻节点之间相互联系紧密,通过少量步骤即可到达,因此,网络传播风险较快。

(4)网络的节点度。节点度指与该节点直接相连的其他节点的个数,是分析网络拓扑结构最重要的指标之一。节点度值表明该节点在网络中的影响力和重要性,其值越大,影响力越大,该节点越重要。计算可知,高层建筑施工事故的有向加权

网络的平均度为 5.391,表明网络中每一个风险因子平均与 5.391 个其他风险因子有密切联系,联系较为频繁。

出度是指目标节点指向其他节点的边数,入度是其他节点指向目标节点的边数,可根据 Ucinet 数据分析得到模型的标准化出度和标准化入度。高层建筑施工风险耦合网络的标准化出度如表 6 所示,展示了各风险因子的标准化出度和标准化入度。

表 6 风险因子的标准化度值
Table 6 The standardized value of risk factors

风险因子	潜在风险链耦合形式	标准化入度	标准化出度	中介中心度	修正后标准化出度
A1	人-机	12.374	8.081	10.713	0.260 2
A2	人-人	0.505	0.758	0.385	0
A3	人-机-料	14.899	3.030	24.890	0.162 7
A4	人-机-料	6.313	0.758	7.892	0.004 1
A5	人-人	4.545	1.263	0.110	0
A6	人-机-料	8.838	1.768	1.958	0.094 9
B1	人-机	3.283	1.263	7.892	0.040 7
B2	机-料	1.010	0.505	1.209	0.004 3
B3	人-机	0.253	0.758	0	0.024 4
B4	人-机-料-管	9.091	3.030	16.114	0.303 9
C1	人-机-料-管	1.768	2.273	30.703	0.228 0
C2	人-料	1.768	0.253	2.020	0.004 1
D1	人-料-管	2.525	12.374	0.590	0.362 5
D2	人-料-管	3.283	3.283	1.801	0.096 1
D3	人-机-料-管	1.263	11.364	3.594	1.139 8
D4	人-机-管	1.010	1.010	0.152	0.055 3
D5	人-机-料-管-环	5.808	24.242	16.719	4.538 1
D6	人-机-管	1.263	3.283	27.352	0.179 9
D7	人-机-料-管	7.071	4.798	0.679	0.481 2
D8	人-机-管	1.263	2.525	0	0.138 3
E1	人-机-环	0.253	0.758	0.024	0.056 7
E2	人-机-环	0	0.758	0	0.056 7
E3	人-环	0	0.253	0	0.004 8

所有节点的标准化入度中,入度高表明该风险因子在系统中容易被诱发,例如违规作业(A3)、未正确穿戴防护用品(A1)、设备或防护用品存在缺陷(B4)、冒险作业(A6)和隐患排查治理不到位(D7)。由此可见,入度较高的多为人为风险因素,容易受其他风险因素影响,是导致事故发生的直接因素。所有节点的标准化出度中,出度高表明该风险因子容易诱发其他风险因子的产生,例如现场管理不到位(D5)、安全教育培训不到位(D1)、安全管理制度不完善(D3)、未正确穿戴防护用品(A1)和隐患排查治理不到位(D7)。出度较高的风险因子多为管理方面的因素,安全管理对遏制事故的发生有至关重要的作用。

3.3 N-K 模型对复杂网络关键性因子的修正

复杂网络模型可基于风险因子间的网络关系结构分析得出关键性影响因子,但不同风险因素耦合从而导致事故发生的耦合值无法评估,仅基于复杂网络对影响因子分析较为片面。*N-K* 模型可计算不同风险因素耦合形式的耦合值,从而推断不同耦合形式导致事故发生的可能性,但无法具体确定安全管理中应重点关注的风险因子。因此将 *N-K* 模型和复杂网络相结合,用 *N-K* 模型计算不同耦合形式的耦合值 *T*,在复杂网络模型中找出每个风险因子和其他风险因子之间的潜在风险链,确定所对应风险因素的潜在耦合形式,用潜在风险链耦合形式修正复杂网络的网络标准化出度,得到最终的关键性风险因子。

根据耦合网络模型图对复杂网络的 23 个节点进行事故潜在风险链分析,将每个节点可能导致的风险链对应到相应的风险因素中,得到其潜在风险链耦合形式(表 6)。将每个风险因子的标准化出度与其对应的潜在风险链耦合形式的耦合值(表 5)相乘,得到修正后的标准化出度。如 *A1* 的标准化出度为 8.081,其潜在风险连耦合形式为人-机,人-机对应表 5 中的耦合值为 0.032 2,其相乘结果为 0.260 2,即为修正后标准化出度,整体结果如表 6 所示。图 4(a)为复杂网络风险因子标准化出度的分布,图 4(b)为复杂网络和 *N-K* 模型结合之后得出的修正后标准化出度分布(由于修正后 *D5* 值为 4.538 1,与其他风险因子修正后标准化出度差异较大,为满足图 4(b)可视化效果,故将 *D5* 单独列出)。

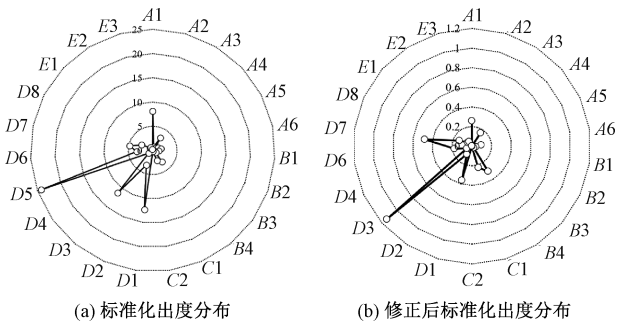


图 4 节点的标准化出度分布和修正后标准化出度分布
Figure 4 Normalized outdegree distribution of nodes before and after correction

由图 4(b)可知,由设备因素诱发的人-机-料-管-环形式的耦合能力突出,其重要程度需要格外重视。风险因子 *D5*(现场管理不到位)的标准化出度最高,*D5* 潜在的风险链耦合形式的耦合值也最大,修正后的标准化出度依旧最高,因此,*D5* 是安全管理需要观察控制的重点对象。此外,修正后标准化

出度较高的风险因子还包括 *D3*(安全管理制度不完善)、*D7*(隐患排查治理不到位)和 *D1*(安全教育培训不到位),均超过了 0.350 0 且均为管理因素层面的风险因子。然后通过剩余 74 起事故案例对得到结果进行验证,结果表明,新结果与先前 84 起事故案例分析结果大致相符。因此,应注意这些风险因子的出现,及时切断风险链的传播,避免风险网络的形成。

4 结论

本文适用于高层建筑施工安全的风险耦合分析,为高层建筑施工风险分析提出一种新方法,适用于高层建筑施工,未来可在其他建筑类型开展推广应用。本文基于 *N-K* 模型和复杂网络对高层建筑施工事故案例致因进行分析,得到了重要风险因素和关键性风险因子,主要结论如下。

(1)根据 *N-K* 模型计算风险耦合值发现避免多因素耦合是阻止事故发生的关键,参与耦合的风险因素数量越多风险耦合值越大,造成的施工风险越大。双因素风险耦合过程中,机-管耦合的风险耦合值最大;三因素耦合过程中,人-机-环风险耦合值最大;四因素风险耦合过程中,人-机-管-环风险耦合值最大。

(2)各类高层建筑施工风险耦合中,设备因素是风险耦合形式的关键性风险因素。高层建筑施工事故发生的主要风险因素是设备因素,在高层建筑施工过程中应加强对设备因素的重视,尽可能避免设备因素与其他风险因素之间发生耦合。

(3)基于复杂网络模型分析发现,物料缺失、损毁或质量不合格、未验收合格但投入使用、违规作业、现场管理不到位和设备或防护用品存在缺陷在风险网络中具有较高的中介中心度。通过避免此类风险因子的出现,可有效避免风险链的传递,切断网络连通,避免事故发生。

(4)对于出度高的风险因子和风险耦合值高的风险因素耦合方式需重点管理,现场管理不到位

参考文献:

[1] 沈阳,徐磊,郑冠雨,等.考虑风险因素耦合的超高层施工预警方法研究[J].郑州大学学报(工学版),2021,42(4):98-104,110.
SHEN Y, XU L, ZHENG G Y, et al. Research on early-

- warning method for super high-rise building construction considering coupling effect of risk factors[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 98-104, 110.
- [2] ZAINI A A. Exploring the construction safety risk drivers and risk prevention[J]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2018, 12(8): 1952-1957.
- [3] MANZOOR B, OTHMAN I, MANZOOR M. Evaluating the critical safety factors causing accidents in high-rise building projects[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(3): 2485-2492.
- [4] ISMAIL Z, DOOSTDAR S, HARUN Z. Factors influencing the implementation of a safety management system for construction sites[J]. Safety Science, 2012, 50(3): 418-423.
- [5] 刘辉, 郑向尧, 张智超, 等. 定量改进 JHA 法的建筑施工高危作业风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 146-151.
- LIU H, ZHENG X W, ZHANG Z C, et al. Risk analysis of high-risk operations in construction by a quantitatively improved JHA method[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(4): 146-151.
- [6] 张兵, 詹锐, 关贤军, 等. 基于 CBR 的超高层建筑施工安全事故研究[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(6): 92-98.
- ZHANG B, ZHAN R, GUAN X J, et al. Research on construction safety accidents of super high-rise buildings based on CBR[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(6): 92-98.
- [7] 董翔, 谢桥漾, 季晓刚, 等. 超高层装配式建筑施工安全风险评价[J]. 建筑经济, 2020, 41(增刊 1): 290-293.
- DONG X, XIE Q Y, JI X G, et al. Safety risk assessment of ultra-high-rise assembled building construction[J]. Construction Economy, 2020, 41(S1): 290-293.
- [8] 谢尊贤, 徐宝, 骆信慧, 等. 基于优化 AHP 与物元可拓模型的高层建筑施工安全风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(2): 98-104, 118.
- XIE Z X, XU B, LUO X H, et al. Evaluation of construction safety risk of high-rise building based on optimized AHP and object-element extension model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(2): 98-104, 118.
- [9] 蔡久顺, 张执国, 师鹏. 基于改进风险度模型的高层建筑施工安全风险评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(23): 81-87.
- CAI J S, ZHANG Z G, SHI P. A research on safety risk evaluation of high-rise building construction based on improved risk degree model[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(23): 81-87.
- [10] FALTER D, SCHRÖTER K, DUNG N V, et al. Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 182-193.
- [11] LOZOYA J P, SARDÁ R, JIMÉNEZ J A. A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(6): 685-696.
- [12] PAN H Z, GOU J, WAN Z H, et al. Research on coupling degree model of safety risk system for tunnel construction in subway shield zone[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 5783938.
- [13] 文艳芳, 陈敬配. 地铁隧道施工坍塌风险耦合机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 943-952.
- WEN Y F, CHEN J P. Research on coupling mechanism of collapse risk in metro tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 943-952.
- [14] 骆成, 陈霞, 路亚妮, 等. 中国沿海危化品道路运输系统风险耦合分析[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(5): 975-984.
- LUO C, CHEN X, LU Y N, et al. Risk coupling analysis of hazardous chemicals road transportation system in China's coastal areas[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(5): 975-984.
- [15] 姚浩, 陈超逸, 宋丹妮. 基于复杂网络的超高层建筑施工安全风险耦合评估方法[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 957-968.
- YAO H, CHEN C Y, SONG D N. Coupling safety risk assessment of super high-rise building construction based on complex network[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 957-968.
- [16] 周红波, 杨奇, 杨振国, 等. 基于复杂网络和 $N-K$ 模型的塔吊安全风险因素分析与控制[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 816-823.
- ZHOU H B, YANG Q, YANG Z G, et al. Analysis of the risk involved factors and safety control of the tower crane based on the complex network and $N-K$ model[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(3): 816-823.
- [17] 潘红伟, 郭德赛, 宋战平, 等. 基于 $N-K$ 模型的隧道施工事故多风险因素耦合分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(9): 1537-1545.
- PAN H W, GUO D S, SONG Z P, et al. Coupling analysis to investigate multiple risk factors for tunnel construction accidents based on $N-K$ model[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(9): 1537-1545.

[18] 宋绍珍, 刘欢, 高波, 等. 基于 N - K 模型的海上航标效能影响因素耦合分析[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(2): 77-82.

SONG S Z, LIU H, GAO B, et al. Coupling analysis of influencing factors for efficiency of marine aids to navigation based on N - K model[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2023, 44(2): 77-82.

[19] 方俊, 郭佩文, 朱科, 等. 基于 N - K 模型的地铁隧道施工安全风险耦合演化分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 1-9.

FANG J, GUO P W, ZHU K, et al. Coupling evolution analysis of subway tunnel construction safety risk based on N - K model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 1-9.

[20] 吴书强, 邵必林, 边根庆, 等. 基于复杂网络的高校火灾灾害链分析及应急管理决策研究[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 156-161, 166.

WU S Q, SHAO B L, BIAN G Q, et al. Research on fire disaster chain analysis and emergency management decision-making in colleges and universities based on complex network[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2): 156-161, 166.

[21] 张健, 宋志刚, 张雨. 基于节点重要性的建筑群火灾蔓延高危建筑的确定方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(3): 66-73.

ZHANG J, SONG Z G, ZHANG Y. Method of determining high-risk buildings for fire spread in densely built building areas based on importance of network nodes[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2022, 19(3): 66-73.

[22] 孙家庆, 李默涵, 修晓仪. 基于复杂网络理论的水上交通事故致因分析[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(2): 80-90, 160.

SUN J Q, LI M H, XIU X Y. Causal analysis of water traffic accidents based on complex network theory[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(2): 80-90, 160.

Analysis of Key Risk Factors and Coupling Effects of Construction Safety of High-rise Buildings

CHENG Lianhua, YANG Yaoyan, LI Shugang, WEI Kai, CAO Dongqiang

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to explore the key risk factors of high-rise building construction safety and the coupling effects of risk elements, the complex network model and the N - K model were combined, 158 high-rise building construction accident cases from 2015 to 2022 were selected according to the completeness of the accident case investigation report, and the causes of 84 of them were coded according to the grounded theory, and 5 risk elements including human, machine, material, pipe and environment and 23 risk factors were identified through statistical analysis. The coupling risk values of various coupling forms of risk elements were calculated according to the N - K model, and the degree value distribution of each risk factor in the complex network model was obtained by using Ucinet software. The risk coupling network model of high-rise building construction was drawn by Netdraw, and the potential risk chain of nodes of 23 risk factors was analyzed, and the coupling form of potential risk chain and the coupling degree value of N - K model were combined to modify the standardized output. The remaining 74 accident cases were used to verify the results, and the verification results were roughly consistent with the previous 84 accident cases. The results showed that the greater the number of risk elements involved in coupling, the greater the risk coupling value, and the coupling form involving equipment elements had the largest coupling value. The lack of site management, the lack of safety education and training, the incompleteness of safety management system, improper wearing of protective equipment, and the lack of investigation and management of hidden danger were the key risk factors that need to be focused on prevention and control.

Keywords: complex network; high-rise buildings; coupling relationship; N - K model; risk factors