

基于 DEMATEL 和 ISM 的建筑工人安全行为 影响因素建模

周 炜, 赵挺生, 徐树铭, 刘 文

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 建筑工人安全行为是各种因素影响下的复杂现象。本文通过文献分析法和专家访谈构建了建筑工人安全行为影响因素体系。利用 DEMATEL 建模方法分析了 17 个影响因素的中心度、原因集和结果集。利用 ISM 建模方法得到了影响因素体系的多层递阶结构模型。最后通过混合建模分析理清了影响建筑工人安全行为因素的层次结构, 并确定了各层次结构中的关键因素。分析发现工人安全行为是组织安全环境、组织安全实施、前线安全环境和工人自身因素 4 类因素复杂作用下的产物。最后本文结合各类别中的关键因素从宏观、中观和微观 3 个层面提出了工人安全行为的综合促进措施。

关键词: 工人安全行为; 影响因素; DEMATEL; ISM; 混合建模

中图分类号: X92 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2017)06-0126-07

DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2017.06.021

Model of Influence Factors for Worker Safety Behavior Based on DEMATEL and ISM

ZHOU Wei, ZHAO Ting-sheng, XU Shu-ming, LIU Wen

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

Abstract: Construction worker safety behavior is a complex consequence caused by various factors. The influencing factor framework of construction worker safety behavior was built through literature review and experts interviews. Then, cause set, effect set and degree of prominence of those 17 factors were got by DEMATEL method, and multi-layer recursive structure model of the influencing factor framework was acquired by ISM method. Besides, the hierarchical structure and key influencing factors were presented by hybrid model analysis. The result was that worker safety behavior could be regarded as a complex outcome of organization safety environment, organization safety practice, frontline safety environment, and worker personal factors. Finally, based on those key factors, this paper suggested comprehensive measures for promoting worker safety behavior in macro, middle and micro level.

Key words: worker safety behavior; influence factors; DEMATEL; ISM; hybrid modeling

建筑施工安全仍然是亟待解决的问题。建筑业中事故频发,带来了众多人员伤亡和巨大经济损失^[1]。为了阻止事故的发生,大量的研究围绕着事故的原因来进行。海因里希多米诺骨牌理论认为人的不安全行为与物的不安全状态是导致事故的重要原因。由此大量的研究开始探究安全行为与安全事故的关系。Haslam 等^[2]调查了大量

建筑施工事故案例,发现 70% 的事故都与人的因素有关,尤其是工人的行为。Suraji 等^[3]分析了 500 多起施工事故后发现,88% 的事故中都存在不恰当的施工行为。工人安全行为与施工安全息息相关,通过促进建筑工人安全行为,控制和避免工人的不安全行为来提升项目施工现场安全已经逐渐成为热门课题^[4]。近年来,国内外学者针对

收稿日期: 2016-09-28 修回日期: 2016-11-21

作者简介: 周 炜(1990-) 男,湖北宜城人,博士研究生,研究方向为施工安全管理(Email: zwhustphd@hust.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(71390524)

建筑工人安全行为做了大量的研究,主要集中在行为安全管理和影响安全行为的因素上。行为安全管理主要通过目标设定和行为绩效反馈等行为干预手段来促进工人安全行为^[4]。安全行为的影响因素研究主要围绕在工人个人、环境和组织三个层面^[5-7]。这些研究为理解工人安全行为的产生提供了基础框架,但是关于影响因素的层次结构、内在关联以及因素重要性的研究仍旧较少。

本文立足于现有研究成果,通过文献分析法和专家访谈构建出工人安全行为的影响因素体系,并以系统论的观点把工人安全行为看作各种因素影响下的复杂现象。通过采用 ISM 和 DEMATEL 混合建模方法定量地对工人安全行为影响因素系统中各个因素的层次结构和内在联系进行梳理,对相似因素进行归类,并找出复杂因果关系中的关键因素,从而为建筑工人安全行为的提高提供思路和管理方案。

1 安全行为影响因素体系

通过分析安全行为和安全绩效影响因素的文献资料,本文归纳出了4个影响工人安全行为的因素方面,即个人、班组、组织和环境。其中个人层面包括工人安全态度^[8,9]、工人安全知识^[10]、工人安全感知^[10]、工人安全意识^[11]、工人心理素质^[12]和工人身体素质^[13]。班组层面包括班组工人间的影响^[14]。组织层面包括管理人员安全知识^[11]、管理人员安全责任遵守^[15]、领导对安全的态度^[11]、项目安全氛围^[16]、安全教育^[17]、组织安全制度^[17]、安全监管^[7]和安全计划^[5]。环境层面包括项目安全配备^[7]和工人作业环境^[11]。为了明确影响因素包含的内容以便后期探讨,本文在文献分析的基础上,结合专家访谈,将影响因素的释义确定如表1。

2 基于 DEMATEL 与 ISM 的混合建模分析

2.1 模型方法

DEMATEL 全称为决策试验和评价实验法 (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), 是 1971 年 Bortelle 研究所提出的方法论^[18]。该方法通过运用矩阵与图论工具进行分析,结合系统中各因素之间的逻辑关系构建直接影响矩阵,进而判断系统因素之间关系的有无及其强弱评价。ISM 全称为解释结构模型 (Interpretative

表1 工人安全行为影响因素及释义

影响因素	释义
工人安全感知 F_1	工人正确判断风险的能力,如估计风险、估计自我效能等
工人安全知识 F_2	工人对机械安全操作方法及正确使用安全防护用具方法的掌握程度
工人心理素质 F_3	工人的性格特质,如冲动、冷静、情绪激动、细心、粗心大意等
工人身体素质 F_4	工人生理机能的状况,如疾病、疲劳等
工人安全态度 F_5	工人对遵守安全操作规范、安全制度及安全护具的态度
工人安全意识 F_6	工人对待施工现场可能伤害到自己或他人的潜在危险源的心理警觉性
管理人员安全知识 F_7	管理人员对现场风险的辨识、理解、评价、指导等的的能力
管理人员安全责任遵守 F_8	宣传贯彻安全法规及标准规范,组织制定安全培训,进行安全巡视检查,参与安全验收,做到安全记录等
领导对安全的态度 F_9	项目领导对项目安全的重视程度
班组工人间的影响 F_{10}	工友之间安全知识的学习,相互监督不安全行为,相互帮助配合来避免危险的情况
项目安全氛围 F_{11}	项目具备良好的安全氛围,安全得到工人和管理人员的重视程度
项目安全配备 F_{12}	项目部安全防护装置安置情况
工人作业环境 F_{13}	工作环境风险源的情况、工期压力、工作强度等
安全教育 F_{14}	公司、项目部高质量的安全教育落实情况
组织安全制度 F_{15}	组织安全制度体系的完善,安全责任落实的情况
安全监管 F_{16}	项目现场对工人安全行为的监管情况
安全计划 F_{17}	针对重大风险源的风险评价、日常项目的安全部署的落实情况

Structural Modeling Method) 是 1973 年美国 John N. Warfield 教授为分析因素众多,联系复杂而结构不清楚的系统而开发的一种方法^[18]。该方法把复杂系统分级为若干要素,利用专家知识,为系统构造出一个多层次解释结构模型,展现复杂因素间的影响路径与层次结构。

这两种方法作为分析复杂系统的重要方法,已得到广泛应用^[19,20]。同时,两种方法的集成既可以得出复杂系统中多因素作用的层次结构,又可以确定层次结构中的关键因素,为复杂系统分析与决策奠定基础。混合建模分析步骤如下:

(1) 确定系统影响因素集 $F = \{F_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

(2) 设定因素影响标度,根据专家知识和经

验确定因素间的相互影响关系,得出影响关系矩阵 $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ 。矩阵系数 r_{ij} 表示因素 F_i 对因素 F_j 的影响程度,当 $i = j$ 时,矩阵系数为 0。

(3) 处理影响关系矩阵 R ,得到 DEMATEL 方法中规范化直接影响矩阵 $G = [g_{ij}]_{n \times n} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n r_{ij}} R$ 。

(4) 根据规范化直接影响矩阵 G ,得到综合影响矩阵 $T = G + G^2 + G^3 + \dots + G^n = G \frac{I - G^{n-1}}{I - G}$ 。
 $= [t_{ij}]_{n \times n}$ 。

(5) 计算各影响因素的影响度 f_i ,被影响度 e_i ,中心度 z_i 和原因度 y_i 。其中 $f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$; $e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} (i = 1, 2, \dots, n)$; $z_i = f_i + e_i (i = 1, 2, \dots, n)$; $y_i = f_i - e_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

(6) 在影响关系矩阵 $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ 的基础上,取阈值 λ ,若 $r_{ij} > \lambda$,则 $a_{ij} = 1$;若 $r_{ij} \leq \lambda$,则 $a_{ij} = 0$,得到 ISM 方法中的邻接矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 。其中 $a_{ij} = 0$ 或 1 ρ 表示因素 F_i 对因素 F_j 无直接影响,1 表示因素 F_i 对因素 F_j 有直接影响。

(7) 确定因素间的可达矩阵 M 。可达矩阵属于布尔矩阵,由单位矩阵 I 与邻接矩阵 A 的和 $I + A$ 按照布尔运算规则运算 ($0+0=0; 0+1=1; 1+1=1; 1 \times 0=0; 0 \times 1=0; 1 \times 1=1$) 得到,即 $M = (I + A)^n = [m_{ij}]_{n \times n}$ 。

(8) 可达矩阵的层次化处理。确定可达集合 L_i 和前项集合 S_i ,其中 $L_i = \{F_j \in F | m_{ij} = 1\}$, $S_i = \{F_j \in F | m_{ji} = 1\}$ 。进而得出共同集合 $C =$

$$\{F_i \in F | L_i \cap S_i = L_i\}。$$

(9) C 中包含的因素为底层因素集 C_1 。在可达矩阵 M 划去共同集合 C 包含因素对应的行和列。

(10) 重复步骤(8)和(9),直到得到各层因素集 $C_q (q = 1, 2, \dots, n)$,且可达矩阵 M 中所有因素被划除。

(11) 根据以上内容,绘制工人安全行为影响因素原因-结果图、多层递阶结构模型、集成模型。

2.2 问卷设计与数据收集

根据工人安全行为影响因素集 $F = \{F_i | i = 1, 2, \dots, 17\}$,本文采用问卷调查的方式研究工人安全行为 17 个影响因素间的相关影响关系。设定因素影响标度(用数字表示影响程度,其中 0: 无; 1: 弱; 2: 一般; 3: 强)。问卷设计将 17 个因素设置于表 2 的对称矩阵行列两端,表左端第一列标出了因素编号和因素内容,表上端第一行标出因素编号与左端列对应。被调查者根据对因素的理解依次从左端列填写数字(0 到 3)来表示行因素对列因素的影响程度。本调查在华中科技大学全国监理培训中心培训期间开展,针对监理工程师培训发放问卷 81 份,针对建造师培训发放

表 2 问卷设计表

因素	F_1	F_2	F_3	...
F_1	0			...
F_2		0		...
F_3			0	...
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

$$R = [r_{ij}]_{17 \times 17} = \begin{pmatrix} 0.00 & 1.50 & 1.79 & 0.12 & 1.79 & 2.38 & 0.65 & 0.06 & 0.26 & 1.91 & 1.12 & 1.06 & 1.18 & 0.38 & 0.59 & 0.38 & 0.62 \\ 2.85 & 0.00 & 1.62 & 0.26 & 2.38 & 2.47 & 0.59 & 0.38 & 0.53 & 1.97 & 1.65 & 0.91 & 1.09 & 1.71 & 1.21 & 0.68 & 1.09 \\ 2.56 & 1.44 & 0.00 & 1.38 & 1.71 & 1.09 & 0.59 & 0.59 & 0.18 & 1.56 & 0.91 & 0.21 & 0.85 & 0.65 & 0.09 & 0.18 & 0.44 \\ 1.38 & 0.53 & 2.00 & 0.00 & 1.97 & 1.82 & 0.12 & 0.62 & 0.62 & 0.91 & 0.44 & 0.15 & 0.94 & 0.09 & 0.26 & 0.12 & 0.06 \\ 1.91 & 1.56 & 1.18 & 0.62 & 0.00 & 2.79 & 0.68 & 0.47 & 0.38 & 1.59 & 1.59 & 0.62 & 0.79 & 0.18 & 0.38 & 0.65 & 0.68 \\ 1.88 & 1.59 & 1.09 & 0.32 & 1.88 & 0.00 & 0.41 & 0.56 & 0.47 & 1.94 & 1.35 & 0.53 & 0.12 & 0.15 & 0.97 & 0.59 & 0.71 \\ 1.62 & 1.62 & 0.21 & 0.15 & 1.35 & 1.85 & 0.00 & 2.68 & 0.59 & 1.15 & 2.74 & 2.71 & 1.76 & 1.82 & 2.59 & 2.62 & 2.32 \\ 1.97 & 2.71 & 0.32 & 0.21 & 2.82 & 2.76 & 1.56 & 0.00 & 0.44 & 1.12 & 2.88 & 1.94 & 1.94 & 1.94 & 1.85 & 1.85 & 1.88 \\ 1.09 & 1.29 & 0.29 & 0.26 & 1.94 & 2.59 & 2.38 & 2.85 & 0.00 & 1.62 & 2.94 & 2.85 & 1.85 & 2.88 & 2.82 & 2.88 & 2.79 \\ 1.85 & 1.79 & 1.00 & 0.09 & 1.88 & 2.88 & 0.62 & 0.50 & 0.53 & 0.00 & 1.91 & 1.18 & 1.91 & 0.68 & 1.15 & 0.94 & 1.12 \\ 1.88 & 2.71 & 1.21 & 0.18 & 2.79 & 2.91 & 1.97 & 2.44 & 1.62 & 2.59 & 0.00 & 1.59 & 1.65 & 1.09 & 1.59 & 1.41 & 1.47 \\ 0.47 & 1.68 & 0.44 & 0.15 & 1.62 & 1.15 & 0.47 & 1.18 & 1.09 & 0.88 & 1.68 & 0.00 & 2.68 & 1.53 & 1.47 & 1.62 & 1.62 \\ 1.06 & 0.32 & 1.12 & 1.94 & 1.88 & 1.82 & 1.15 & 1.85 & 1.62 & 0.94 & 0.41 & 1.38 & 0.00 & 0.03 & 0.68 & 1.12 & 1.09 \\ 1.94 & 2.24 & 0.97 & 0.15 & 2.68 & 2.38 & 1.88 & 1.79 & 1.03 & 1.91 & 2.62 & 1.56 & 0.41 & 0.00 & 1.91 & 1.62 & 1.94 \\ 1.47 & 1.85 & 0.59 & 0.71 & 1.79 & 2.68 & 1.91 & 2.82 & 1.35 & 1.53 & 2.09 & 2.71 & 1.18 & 2.29 & 0.00 & 2.35 & 2.38 \\ 1.59 & 1.68 & 1.24 & 0.24 & 2.44 & 2.71 & 0.94 & 1.12 & 0.12 & 1.68 & 1.15 & 0.94 & 0.53 & 1.24 & 1.18 & 0.00 & 0.82 \\ 1.91 & 1.82 & 1.15 & 0.38 & 1.94 & 1.85 & 1.76 & 2.62 & 1.47 & 1.44 & 2.68 & 2.38 & 1.94 & 2.21 & 2.35 & 2.56 & 0.00 \end{pmatrix}$$

问卷 63 份。汇集所有问卷后剔除问题问卷后, 考虑到专家知识和经验对因素间的相关影响关系确定的影响, 本文只筛选出工作经验在 10 年以上的人员问卷用作分析。问卷数目为 34 份, 问卷填写

表 3 问卷填写成员特征情况

身份	工作年限分布		
	10~15 年	15~20 年	20 年以上
监理工程师	6	4	5
建造师	8	5	6

$$T = \begin{pmatrix} 0.07 & 0.10 & 0.09 & 0.02 & 0.13 & 0.15 & 0.06 & 0.05 & 0.04 & 0.12 & 0.09 & 0.08 & 0.08 & 0.05 & 0.06 & 0.06 & 0.06 \\ 0.17 & 0.09 & 0.10 & 0.03 & 0.17 & 0.19 & 0.07 & 0.08 & 0.05 & 0.14 & 0.13 & 0.09 & 0.09 & 0.10 & 0.10 & 0.08 & 0.09 \\ 0.13 & 0.10 & 0.04 & 0.05 & 0.12 & 0.11 & 0.05 & 0.06 & 0.03 & 0.10 & 0.08 & 0.05 & 0.07 & 0.05 & 0.04 & 0.04 & 0.05 \\ 0.09 & 0.06 & 0.09 & 0.01 & 0.11 & 0.11 & 0.03 & 0.05 & 0.04 & 0.07 & 0.06 & 0.04 & 0.06 & 0.03 & 0.04 & 0.03 & 0.03 \\ 0.12 & 0.11 & 0.08 & 0.03 & 0.08 & 0.16 & 0.06 & 0.06 & 0.04 & 0.11 & 0.11 & 0.07 & 0.07 & 0.04 & 0.06 & 0.06 & 0.07 \\ 0.12 & 0.11 & 0.07 & 0.02 & 0.13 & 0.08 & 0.05 & 0.06 & 0.04 & 0.11 & 0.10 & 0.06 & 0.05 & 0.04 & 0.07 & 0.06 & 0.06 \\ 0.17 & 0.17 & 0.08 & 0.04 & 0.19 & 0.22 & 0.08 & 0.18 & 0.08 & 0.15 & 0.21 & 0.18 & 0.14 & 0.14 & 0.17 & 0.17 & 0.16 \\ 0.18 & 0.20 & 0.08 & 0.04 & 0.22 & 0.24 & 0.12 & 0.09 & 0.07 & 0.15 & 0.20 & 0.15 & 0.14 & 0.13 & 0.14 & 0.14 & 0.14 \\ 0.18 & 0.19 & 0.10 & 0.04 & 0.23 & 0.27 & 0.17 & 0.20 & 0.07 & 0.19 & 0.24 & 0.21 & 0.17 & 0.19 & 0.20 & 0.20 & 0.20 \\ 0.14 & 0.13 & 0.08 & 0.03 & 0.15 & 0.19 & 0.07 & 0.08 & 0.05 & 0.08 & 0.14 & 0.10 & 0.12 & 0.07 & 0.09 & 0.09 & 0.09 \\ 0.18 & 0.20 & 0.11 & 0.04 & 0.23 & 0.25 & 0.13 & 0.16 & 0.10 & 0.19 & 0.13 & 0.15 & 0.14 & 0.11 & 0.14 & 0.13 & 0.14 \\ 0.10 & 0.13 & 0.07 & 0.03 & 0.15 & 0.15 & 0.07 & 0.11 & 0.07 & 0.11 & 0.14 & 0.07 & 0.14 & 0.10 & 0.11 & 0.12 & 0.11 \\ 0.11 & 0.08 & 0.08 & 0.08 & 0.14 & 0.15 & 0.08 & 0.11 & 0.08 & 0.10 & 0.09 & 0.10 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.09 & 0.09 \\ 0.18 & 0.18 & 0.10 & 0.03 & 0.22 & 0.22 & 0.13 & 0.14 & 0.08 & 0.17 & 0.20 & 0.14 & 0.10 & 0.08 & 0.14 & 0.14 & 0.14 \\ 0.17 & 0.18 & 0.10 & 0.05 & 0.21 & 0.25 & 0.14 & 0.18 & 0.10 & 0.17 & 0.19 & 0.18 & 0.13 & 0.15 & 0.10 & 0.17 & 0.17 \\ 0.13 & 0.13 & 0.09 & 0.03 & 0.17 & 0.18 & 0.08 & 0.09 & 0.04 & 0.13 & 0.11 & 0.09 & 0.07 & 0.09 & 0.09 & 0.06 & 0.08 \\ 0.19 & 0.19 & 0.11 & 0.05 & 0.21 & 0.23 & 0.14 & 0.18 & 0.10 & 0.17 & 0.21 & 0.18 & 0.16 & 0.15 & 0.17 & 0.18 & 0.10 \end{pmatrix}$$

根据综合影响矩阵, 按照步骤(5) 计算各影响因素的影响度 f_i 、被影响度 e_i 、中心度 z_i 和原因度 y_i , 计算结果见表 4。影响度反映因素影响其它因素的程度; 被影响度反映因素被其他因素影响的程度; 中心度为影响度与被影响度之和。根据中心度排序可以确定影响因素之间的相对重要

成员特征情况见表 3。对筛选出的 34 份问卷数据进行平均处理, 得到影响关系矩阵 R 。

2.3 DEMATEL 分析

处理影响关系矩阵 R , 得到 DEMATEL 方法中规范化直接影响矩阵 $G = [g_{ij}]_{17 \times 17}$ 。根据规范化直接影响矩阵 G , 得到综合影响矩阵 $T = G + G^2$

$$+ G^3 + \dots + G^{17} = G \frac{I - G^{16}}{I - G} = [t_{ij}]_{17 \times 17}。即:$$

性。原因度为影响度与被影响度之差, 根据原因度将工人安全行为影响因素集 F 划分为原因集合(原因度大于 0) 与结果集合(原因度小于 0)。原因集合中因素对其他因素影响较大, 结果集合中因素容易受其他因素影响。

表 4 DEMATEL 分析结果

指标	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}	F_{16}	F_{17}
f_i	1.30	1.79	1.16	0.94	1.33	1.24	2.52	2.46	3.04	1.70	2.53	1.79	1.57	2.40	2.65	1.65	2.71
e_i	2.43	2.36	1.46	0.63	2.85	3.16	1.53	1.88	1.09	2.23	2.43	1.94	1.79	1.59	1.81	1.83	1.80
z_i	3.73	4.15	2.62	1.57	4.17	4.40	4.05	4.34	4.13	3.93	4.96	3.72	3.37	3.99	4.46	3.48	4.52
$Rank(z_i)$	12	7	16	17	6	4	9	5	8	11	1	13	15	10	3	14	2
y_i	-1.14	-0.56	-0.30	0.32	-1.52	-1.91	1.00	0.59	1.95	-0.53	0.09	-0.15	-0.22	0.81	0.84	-0.17	0.91

由此可见, 原因集合中因素包含工人身体素质 F_4 , 领导对安全的态度 F_9 , 管理人员安全责任遵守 F_8 , 领导对安全的态度 F_9 , 项目安全氛围 F_{11} , 安全教育 F_{14} , 织安全制度 F_{15} , 安全计划 F_{17} 。这些因素属于影响工人安全行为的高效力因素, 在提出管理措施时应加强对这些因素考虑。结果集合中因素包含工人安全感知 F_1 , 工人安全知识 F_2 , 工人心理素质 F_3 , 工人安全态度 F_5 , 工人安全责任遵守 F_6 , 班组工人间的影响 F_{10} , 项目安

全配备 F_{12} , 工人作业环境 F_{13} , 安全监管 F_{16} 。这些因素容易受到原因因素影响进而影响工人安全行为, 通过关注这些因素能够给管理措施的效果提供参考。影响因素中心度排序反映了工人安全行为影响因素的相对重要性。

2.4 ISM 分析

ISM 建模的依据是系统因素间的邻接矩阵。设工人安全行为影响因素邻接矩阵为 $A = [a_{ij}]_{17 \times 17}$ 。其中 $a_{ij} = 0$ 或 1, 分别表示因素 F_i 对

因素 F_j 无直接影响和有直接影响。由于建筑工地情况复杂,安全系统中各因素交互频繁,工人安全行为可看作复杂系统运作影响下的产物^[6]。这种情况反映在邻接矩阵中,是影响因素之间复杂的联系。通过 ISM 建模,可以展现复杂因素间的影响路径与层次结构。

现对 ISM 建模过程予以说明。在 2.1 中影响关系矩阵的基础上,根据步骤(6)取阈值 $\lambda = 2$ 将影响关系矩阵 R 转换为邻接矩阵 A 。并根据步骤(7),得到可达矩阵 M 。

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

根据步骤(8)~(10)对可达矩阵进行层次化处理,最终得到各层因素集 $C_q (q = 1, 2, \dots, 8)$ 。

因篇幅限制,现直接给出结果: $C_1 = \{F_4, F_6, F_{13}\}$; $C_2 = \{F_1, F_5, F_{10}, F_{12}\}$; $C_3 = \{F_2, F_3, F_{16}\}$; $C_4 = \{F_8, F_{11}\}$; $C_5 = \{F_{14}\}$; $C_6 = \{F_{15}, F_{17}\}$; $C_7 = \{F_7\}$; $C_8 = \{F_9\}$ 。根据层次结果并作出工人安全行为影响因素多层递阶结构模型(图1)。递阶结构模型反映了工人安全行为影响因素的层次结构和作用路径。

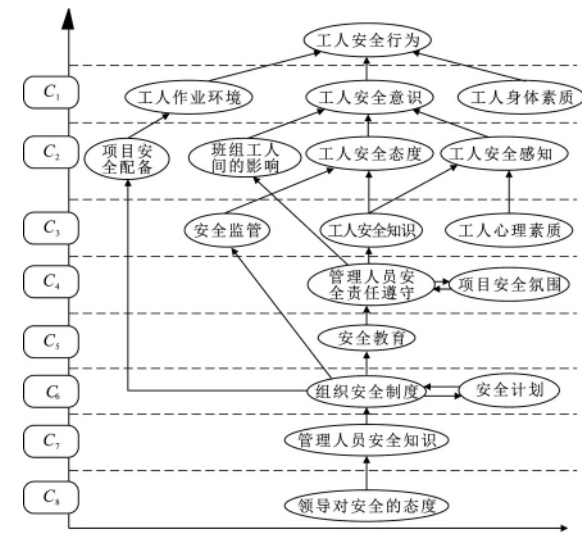


图1 工人安全行为影响因素多层递阶结构模型

2.5 混合建模分析

在 DEMATEL 建模结果中,影响工人安全行为因素根据原因度可分为原因集合与结果集合。原因集合中因素对其他因素影响较大,结果集合中因素容易受其他因素影响。同时根据中心度排序可以确定关键影响因素。在 ISM 建模结果中,多层递阶结构模型可以清楚地反映工人安全行为影响因素之间具体的影响关系和层次结构。现将两种建模结果结合起来,首先对工人安全行为影响因素进行了归类,展现了因素相互作用的层次结构;此外通过原因集合与结果集合的元素分布确定各类因素集之间的影响效力,结合中心度排序确定各类因素集中的关键因素,形成混合模型如图2所示。

由图2可知,建筑工人安全行为影响因素可归纳为4类。第一类因素集命名为组织安全环境,包括领导对安全的态度、管理人员知识、组织安全制度、安全计划 and 安全教育;第二类因素集命名为组织安全实施,包括项目配备、管理人员安全责任遵守、项目安全氛围 and 安全监管;第三类因素集命名为工人自身因素,包括工人心理素质、工人安全知识、工人安全感知、工人安全态度、工人安全意识和工人身体素质;第四类因素集命名为前线安全环境,包括工人作业环境和班组工人间的影响。工人安全行为的产生是各类因素综合作用

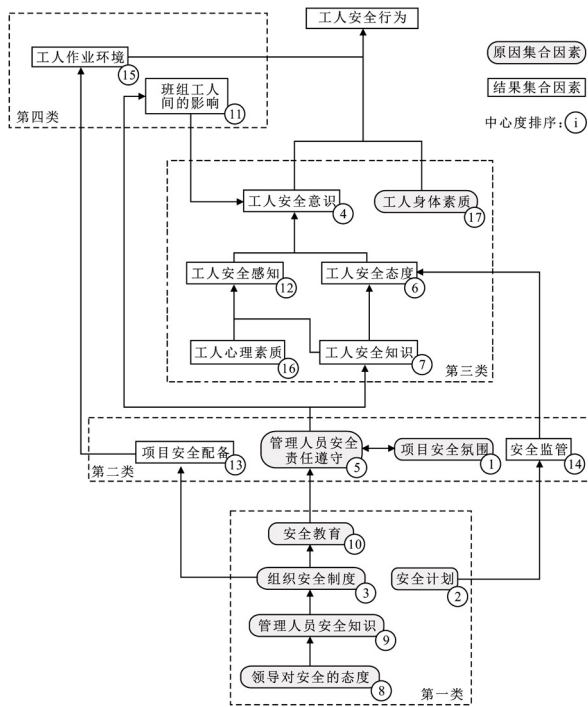


图2 混合建模分析

下的产物。

首先,组织安全环境类因素位于结构模型顶端,并且全部属于原因集合因素。说明良好的组织安全环境对工人的安全行为有着显著的根源影响。在这一层次中,领导对安全的态度一定程度上可以影响整个项目管理人员对安全的重视程度,管理人员良好的安全知识会促进安全计划的部署和组织安全制度的完善,进而有助于公司和项目部高质量的安全教育落实。根据中心度排序,领导对安全的态度,构建良好的组织安全环境,部署安全计划与完善安全制度是关键。

其次,在良好的组织安全环境下,组织安全实施环节对工人的安全行为也有着深层影响作用。这一层次因素是连接组织安全环境和工人自身因素以及前线安全环境的枢纽。项目的安全配备和安全监管影响工人的安全作业环境,同时安全监管能够改变工人安全态度和修正工人的行为,项目安全氛围与管理人员安全责任遵守属于原因集合因素。项目安全氛围可以让工人感知到项目安全制度和组织安全环境的好坏,管理人员安全责任遵守一方面有助于安全制度与安全计划的落实,另一方面对工人能起到安全示范作用。根据中心度排序与原因集合因素分析,营造项目安全氛围与加强管理人员安全责任遵守是推动组织安全实施的杠杆点。

另外,前线安全环境对工人自身因素和工人安全行为有直接的影响。前线安全环境包含生产的作业环境(如安全设施、安全风险源分布情况

等)、心理环境(如工期要求、工作压力等)和班组内部环境(如工友之间安全知识的相互学习,安全作业的相互监督与配合等),这些都是直接影响工人行为的表层直接环境因素。根据中心度排序,建立良好的前线安全环境,注重班组工人之间的影响是关键。

最后,工人自身因素中,工人的安全知识和心理素质直接影响工人的安全态度和安全感知,并结合班组工人之间的影响共同作用于工人的安全意识,最终与工人的身体素质一起综合影响工人的安全行为。根据中心度排序,工人安全意识、工人安全态度和工人安全知识是这一环节的关键因素。

3 工人安全行为促进措施

从混合建模分析中可知,工人安全行为是系统因素综合下的产物。工人安全行为因素系统可分为宏观、中观和微观层面理解。促进工人安全行为的措施需要三管齐下,系统把控。

(1) 在宏观层面,构建良好的组织安全环境是关键。安全计划,组织安全制度和领导对安全的态度是关键因素。因此,领导者要重视安全问题,引导和要求管理人员注重组织安全制度体系的完善,将项目安全责任落实到位,并且部署好项目日常工作,针对风险源提前识别评价,做好风险前馈控制。

(2) 在中观层面,注重组织安全环境下的安全制度与规范实施是核心。项目安全氛围和管理人员安全遵守是杠杆点。管理人员在安全问题上应以身作则,宣贯安全法规及标准规范,严格落实各个环节的安全问题,完善项目安全配备,营造良好的项目安全氛围。

(3) 在微观层面,重视前线安全环境和工人自身因素是着力点。班组工人间的影响、工人安全意识、工人安全态度和工人安全知识属于关键因素。因此,建立良好的前线安全环境,注重班组工人之间的影响,引导班组工友之间安全良性互动,建立班组层面联保互保机制很有必要。此外,重视工人安全教育,在潜移默化中对工人安全态度产生积极影响,引导并促进安全意识的发展是关键。

4 结论

(1) 从个人、班组、组织和环境方面,确定了

建筑工人安全行为影响因素体系,并对每个影响因素进行了释义说明。

(2) 利用 DEMATEL 建模分析了各个工人安全行为影响因素的中心度,根据原因度划分了影响因素的原因集合和结果集合;利用 ISM 建模分析了工人安全行为影响因素的层次结构,得到了影响因素多层递阶结构模型。

(3) 结合 DEMATEL 和 ISM 建模结果进行了混合模型分析,得出了 4 类影响工人安全行为的因素集,即组织安全环境、组织安全实施、前线安全环境和工人自身因素。同时针对 4 类因素集中各个因素的相对重要性进行了分析,结合关键因素从宏观、中观和微观三个层面提出了工人安全行为促进措施。

参 考 文 献

- [1] Feng Y, Zhang S, Wu P. Factors influencing workplace accident costs of building projects[J]. *Safety Science*, 2015, 72: 97-104.
- [2] Haslam R A, Hide S A, Gibb A G F, et al. Contributing factors in construction accidents[J]. *Applied Ergonomics*, 2005, 36(4): 401-415.
- [3] Suraji A, Duff A R, Peckitt S J. Development of causal model of construction accident causation[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2001, 127(4): 337-344.
- [4] Choudhry R M. Choudhry. Behavior-based safety on construction sites: A case study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 70: 14-23.
- [5] 居 婕, 杨高升, 杨 鹏. 建筑工人不安全行为影响因素因子分析及控制措施研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013, 9(11): 179-184.
- [6] Choudhry R M, Fang D. Why operatives engage in unsafe work behavior: Investigating factors on construction sites[J]. *Safety Science*, 2008, 46(4): 566-584.
- [7] Tam C M, Zeng S X, Deng Z M. Identifying elements of poor construction safety management in China[J]. *Safety Science*, 2004, 42(7): 569-586.
- [8] Hung Y H, Smith-Jackson T, Winchester W. Use of attitude congruence to identify safety interventions for small residential builders[J]. *Construction Management and Economics*, 2011, 29(2): 113-130.
- [9] Shin M, Lee H S, Park M, et al. A system dynamics approach for modeling construction workers' safety attitudes and behaviors[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2014, 68: 95-105.
- [10] Neal A, Griffin M A, Hart P M. The impact of organizational climate on safety climate and individual behavior[J]. *Safety Science*, 2000, 34(1-3): 99-109.
- [11] 蒋中铭. 建筑施工安全相关行为的建模与仿真[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [12] Seo H C, Lee Y S, Kim J J, et al. Analyzing safety behaviors of temporary construction workers using structural equation modeling[J]. *Safety Science*, 2015, 77: 160-168.
- [13] Fang D, Jiang Z, Zhang M, et al. An experimental method to study the effect of fatigue on construction workers' safety performance[J]. *Safety Science*, 2015, 73: 80-91.
- [14] Mitropoulos P, Memarian B. Team processes and safety of workers: Cognitive, affective, and behavioral processes of construction crews[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 138(10): 1181-1191.
- [15] Guo B H W, Yiu T W, González V A. Predicting safety behavior in the construction industry: Development and test of an integrative model[J]. *Safety Science*, 2016, 84: 1-11.
- [16] Pousette A, Larsson S, Törner M. Safety climate cross-validation, strength and prediction of safety behaviour[J]. *Safety Science*, 2008, 46(3): 398-404.
- [17] Vinodkumar M N, Bhasi M. Safety management practices and safety behaviour: Assessing the mediating role of safety knowledge and motivation[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2010, 42: 2082-2093.
- [18] 周德群. 系统工程方法与应用[M]. 电子工业出版社, 2015.
- [19] 周德群, 章 玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(2): 20-26.
- [20] 申 霞, 夏 越, 杨校毅, 等. 集成 DEMATEL/ISM 的煤矿工人违章行为影响因素研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 25(9): 145-151.