

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.06.007

基于组合赋权的工程安全管理能力体系适用性评价

王凯, 张延敬, 毕文珂

(天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

摘要: 为改善传统工程项目安全管理现状, 对工程安全管理能力体系的适用性进行评价是提升安全管理智慧化水平的重要前提和条件。首先通过对工程安全管理能力体系适用性影响因素分析, 构建预期目标性、框架合理性、内容协调性和运行实效性4个层面的工程安全管理能力体系适用性评价体系。然后采用层次分析法、熵权法及主客观组合赋权法确定权重, 利用模糊综合评价法评价实际工程项目适用性等级。研究结果表明: 该体系在此项目实际运行过程中基本实现了工程项目安全管理智慧化、网络化及协同化的预期目标, 可为工程安全管理能力体系的推广及应用提供实践参考和借鉴。

关键词: 工程安全管理能力; 适用性评价; 组合赋权; 模糊综合评价

中图分类号: TU714

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)06-0052-09

引文格式: 王凯, 张延敬, 毕文珂. 基于组合赋权的工程安全管理能力体系适用性评价[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(6): 52-60.

Applicability Evaluation of Engineering Safety Management Capability System Based on Combination Weighting

WANG Kai, ZHANG Yanjing, BI Wenke

(School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The applicability evaluation of the engineering safety management capability system is an important prerequisite and condition for enhancing the level of intelligent safety management to improve the status quo of traditional engineering project safety management. Based on an analysis of the influencing factors of the applicability of the engineering safety management capability system, applicability evaluation system for the engineering safety management capability system is constructed at four levels: expected goals, framework rationality, content coordination, and operational effectiveness. Analytic hierarchy process (AHP), entropy weight method and subjective-objective combination weight method are used to determine the weight, while fuzzy comprehensive evaluation method is adopted to evaluate the applicability level of practical engineering projects. The results show that the system basically achieves the expected goal of intelligent, networked and collaborative engineering safety management during the actual operation of the engineering, thus providing practical reference for the promotion and application of the engineering safety management capability system.

Keywords: safety management ability; applicability evaluation; combination weighting; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 天津城建大学本科教育教学改革与研究基金资助重点项目(JG-ZD-22024)

作者简介: 王凯(1972-), 男, 山西永济人, 天津城建大学副教授, 硕士, 主要研究方向为工程项目管理, 智慧建造,

E-mail: wangkai_TCU@126.com

随着建筑业的蓬勃发展,高难度的建筑设计和技术层出不穷,安全事故频发成为制约建筑业健康发展的重要因素。《“工业互联网+安全生产”行动计划(2021—2023年)》政策的出台表明智慧建造已成为建筑业安全生产的重要手段。建筑企业日益重视如何将安全管理理论和智慧建造技术转化为有效应用,提升企业的安全动态管理能力,但由于受到传统安全管理影响,安全管理能力体系建设效果各有差异。因此,构建一套实用、可行的工程安全管理能力适用性评价体系,评估其结构适用性及实施运行效果,对于改善企业安全管理现状,提升事故预防效果具有重要意义。

在适用性评价过程中,针对适用性评价体系的研究集中于两方面:一是适用性评价指标体系的构建,有学者从程序过程研制、内容结构编排、预期目标制定和可行预测调控4个方面进行研究^[1],也有学者综合考虑了体系效益性和体系应用程度等方面^[2]。二是评价方法的选择,适用性评价方法研究主要有层次分析法^[3]、TOPSIS法^[4]、模糊综合评价法^[5-6]、熵权法^[7]、G1法^[8]、灰色关联法^[9]、基于中心点三角白化权函数的灰色评估方法^[10]等。确定权重是一项关键任务,可以通过主、客观赋权法确定,综合评价方法是获得评价结果的重要手段^[11]。其中陈勇等^[12]采用AHP、熵权法以及两者组合赋权确定各评价指标的权重,通过案例分析得出某航运公司安全管理有效性评价结

果。周雪等^[13]利用层次分析法和熵值法计算权重,将主客观权重结合,通过博弈论理论计算组合权重,最后用云模型评价铁路旅客运输安全。而模糊综合评价方法等不能直接确定权重,而是应用主、客观赋权法确定权重,从而实现综合评价。

上述研究为适用性评价体系构建提供了重要的理论支撑,但对工程安全管理能力体系适用性评价的研究却是凤毛麟角。对于体系适用性评价多用于标准体系,尚未开展能力体系适用性评价研究。因此,本研究拟从预期目标性、框架合理性、内容协调性和运行实效性4个方面构建工程安全管理能力适用性评价指标体系,采用组合赋权法对安全管理能力体系进行适用性评价,基于模糊综合评价法构建评价模型并进行实证分析,为工程安全管理能力体系适用性评价指标的优选提供依据。

1 工程安全管理能力体系

通过文献分析结合实践调研,运用IDEF理论、系统论、智慧建造理论和事故致因理论等对工程安全管理能力体系进行理论分析,并从“技术-信息-业务”三个维度探寻当前工程安全管理能力体系存在的问题,分析智慧建造背景下工程安全管理的发展趋势。在工程安全管理系统需求、业务结构和要素组成分析的基础上,运用系统优化理论和IDEF0方法构建工程安全管理能力体系,如表1所示。

表1 工程安全管理能力体系

Table 1 Engineering safety management capability system

目标层	准则层	指标层	指标说明
工程安全管理能力体系	智慧感知系统	信息识别与分析能力	通过物联网感知机制与信息处理机制实现危险源信息识别与分析的能力
		数据形成与处理能力	通过数据形成机制获得危险源信息数据形成与处理的能力
		危险源感知能力	将信息数据传递至智慧监测系统形成安全管理危险源信息感知的能力
	智慧监测系统	危险源动态监测能力	通过动态监测机制进入危险源信息数据动态监测环节形成动态监测的能力
		安全隐患排查能力	对可能形成安全隐患的危险源通过隐患分析机制实现安全隐患排查的能力
		信息数据汇总能力	通过BIM技术与信息集成机制实现安全隐患的信息数据汇总工作的能力
	智慧评估系统	安全隐患优先级排列能力	通过优先级评估确定安全隐患的优先级排查顺序的能力
		安全隐患数据评估能力	通过优先级评估机制对安全隐患数据进行优先级评估的能力
		安全隐患处理能力	通过信息处理机制对安全隐患数据处理与排查的能力
	智慧预警系统	安全隐患信息分类能力	通过评估机制和信息分类机制实现安全隐患信息分类处理的能力
		安全隐患预警能力	依据安全隐患优先级顺序确定预警指标激发安全隐患预警的能力
		安全隐患数据反馈能力	通过信息反馈机制将处理结果反馈至感知、监测、评估各系统的能力
	智慧应急系统	数字化监测能力	以大数据、BIM技术为基础对人、机、料、法、环进行数字化监测的能力
		智慧化管控能力	以智慧建造技术完成全生命周期信息集成并实施安全风险预警的能力
		网络化协同能力	以工程智慧安全管理平台完成全过程、全方位、全主体协同工作的能力

工程安全管理能力体系对工程项目全生命周期的智慧化管控具有核心指导性作用,由于不同地区建筑工程的经济、技术以及环境等条件存在较大差异,因此在项目全生命周期内广泛应用工程安全管理能力体系前要对体系的严谨性、科学性、可行性等方面进行综合系统的适用性评价,否则在体系实施时不仅

不能发挥出应有的积极效果,反而会出现各种负面效果。所以,建立一套科学、合理的工程安全管理能力适用性评价体系,适用于不同地区以及不同类型的建筑工程项目,同时根据具体项目的实际情况(项目规模、项目所处环境等)进行动态调整,对提升工程项目安全管理水平是非常必要的。以表1构建的

工程安全管理能力体系为例, 对其进行适用性评价, 并以碧桂园某项目为实例验证, 进一步提出有针对性的改进建议。

2 工程安全管理能力体系适用性评价体系

2.1 适用性评价的影响因素

工程安全管理能力体系适用性评价体系构建是一项系统性工作, 在构建过程中不仅要保证评价体系各指标间的独立性, 还要注重指标能够真实反映安全管理能力体系在工程项目运行中的适用性。结合

工程安全管理能力体系情况对其影响因素进行分析, 影响安全管理能力体系适用性主要分为内部因素与外部因素, 而内部因素又包括框架和内容, 外部因素包括目标和运行, 其变化直接改变安全管理能力体系的适用性, 而且因素之间也存在影响关系^[14-15], 具体如图1所示。故选取文献分析法及专家咨询法相结合的方式确定评价指标, 具体过程如下: 首先, 根据文献分析的结果初步筛选出包括体系完整性、体系指向性、体系智慧性、体系权威性等在内的23个指标; 其次, 将其以表格的形式汇集进行专家咨询, 在专家咨询的建议下确定最终评价指标并分类; 最后, 完成适用性评价体系构建。

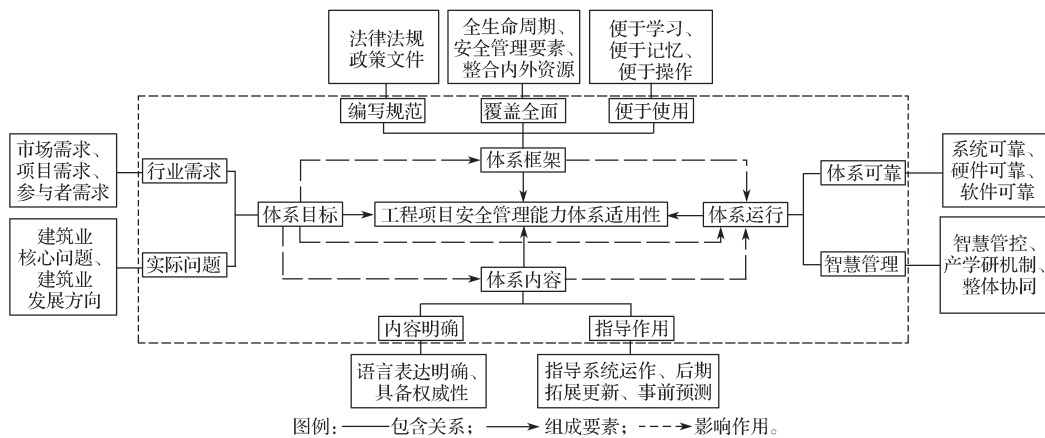


图1 工程安全管理能力体系适用性影响因素集

Fig. 1 Influencing factor set of engineering safety management capability system applicability

2.2 适用性评价指标体系构建

通过对工程安全管理能力体系适用性评价的影响因素分析, 根据专家咨询的最终意见确定18项指标, 结果如表2所示。从内部角度来说, 对安全管理

能力体系的适用性评价应体现框架合理性及体系内容协调性; 从外部角度来看, 要对安全管理能力体系是否实现预期目标且体系运行实效性等情况进行适用性评价^[16-17]。

表2 工程安全管理能力体系适用性评价指标体系

Table 2 Applicability evaluation index system for engineering safety management capability system

目标层	一级指标	二级指标	指标说明	指标来源	
工程项目安全管理能力体系适用性评价	体系预期目标性 (B ₁)	一致性 (B ₁₁)	能力体系预期目标与市场需求能否高度一致	董胜华等 ^[14]	
		恰当性 (B ₁₂)	能力体系是否恰当, 满足项目参与者各项需求		
		指向性 (B ₁₃)	能力体系是否指向当前的建筑市场核心问题		
		完整性 (B ₁₄)	能力体系目标是否完整反映建筑业发展方向		
	体系框架合理性 (B ₂)	全面性 (B ₂₁)	能力体系内容对智慧安全管理要点全面覆盖	雷妍等 ^[2]	
		适宜性 (B ₂₂)	能力体系对接智慧安全管理系统要素适宜性		
		创新性 (B ₂₃)	利用 IDEF0 方法分析智慧安全管理的创新性	李琳等 ^[16]	
		规范性 (B ₂₄)	能力体系编写与制定是否符合相关规范要求		
		整合性 (B ₂₅)	能力体系是否有整合内外资源协同作业能力	任冠华等 ^[17]	
		指导性 (B ₃₁)	体系内容是否能指导智慧安全管理系统运作		
	体系内容协调性 (B ₃)	扩展性 (B ₃₂)	体系内容是否能随着行业变化不断扩展更新	刘会娟等 ^[19]	
		明确性 (B ₃₃)	体系内容表述保障语言明确, 并有一定认知性		
		权威性 (B ₃₄)	能力体系整体内容能具备业界权威与代表性	赵春等 ^[20]	
		预测性 (B ₃₅)	体系内容能根据行业动态变化进行事前预测		
		反馈性 (B ₄₁)	能力体系是否能对安全隐患进行全过程反馈		刘学峰等 ^[21]
	体系运行实效性 (B ₄)	协同性 (B ₄₂)	能力体系是否在安全管理之中起到协同作用		
		智慧性 (B ₄₃)	能力体系运行过程能否发挥智慧管控的特性	汪林等 ^[7]	
		支撑性 (B ₄₄)	能力体系是否有产学研融合机制作为支撑		

3 组合赋权适用性评价模型

工程安全管理能力体系适用性评价是多属性评价, 权重的计算对工程安全管理能力体系适用性的确定具有重要作用。按照主客观性不同, 可将权重计算方法分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是根据专家知识和经验进行赋权, 符合常识但存在主观性, 主要有层次分析法和德尔菲法等。客观赋权法根据原始数据及内在规律计算权重, 不受评价者的经验和偏好影响, 评价结果具有客观性, 包括熵权法和变异系数法等。单纯采用一种评价方法会导致评价结果偏主观或客观。因此, 本研究采用组合赋权法确定各指标权重, 提高决策的科学性。

3.1 层次分析法

层次分析法作为一种主观赋权法, 有利于充分发挥个体的主观能动性, 从而保证评价的有效性, 研究的主要思路为: 构造判断矩阵并邀请相关领域专家进行打分、计算一二级指标并进行一致性检验、形成适用性评价指标体系权重表 3 个部分。由此, 通过发放问卷的形式将工程安全管理能力体系适用性评价调查问卷发放给 6 名专家, 包括知名高校教授、从事建筑行业安全管理的高级工程师, 以及业界安全管理领域专家等各两名, 对工程安全管理能力体系的适用性进行打分。

1) 构造判断矩阵。本文主要以构建安全管理能力体系间评价指标量分标准为主, 而后对安全管理能力体系适用性评价指标体系内的指标进行两两评价。1~9 标度及其倒数的打分量表是最常用的一种形式, 本研究打分量表如表 3 所示。

表 3 工程安全管理能力体系适用性评价指标打分量表
Table 3 Scoring scale for applicability evaluation indicators of engineering safety management capability system

标度	关联程度	标度	关联程度
1	同等重要	1	同等重要
3	稍微重要	1/3	稍微不重要
5	比较重要	1/5	比较不重要
7	十分重要	1/7	十分不重要
9	绝对重要	1/9	绝对不重要

注: 2 的程度介于 1, 3 之间, 4, 6, 8 同理。

2) 求解判断矩阵。判断矩阵是上述层的某个元素作为判断的标准, 根据标度方法, 通过两两相比较, 确定出相对于上一层目标的下层各要素的权重系数。对 N 个物体, 满足以下 3 个条件: $a_{ij} > 0$; $a_{ij} = 1/a_{ji} (i \neq j)$; $a_{ii} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。其中 a_{ij} 指的是与指标 j 相比, i 的重要程度。

指标相对权重计算过程如下^[3]。

将判断矩阵正规化, 正规化矩阵按行求和得 v_{ij} :

$$v_{ij} = \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (1)$$

式中 p_{ij} 为正规化矩阵中的元素

对加总和 v_i 再正规化, 得到特征向量元素 w_{ij} :

$$w_{ij} = v_{ij} / \sum_{j=1}^n v_j \quad (2)$$

3) 判断矩阵的一致性检验。计算判断矩阵一致性指标 CI 和一致比例 CR :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

式(4)中 RI 为平均随机一致性指标。

$CR < 0.1$ 则通过一致性检验, 否则需要修正。

通过对专家打分表的回收, 利用式(3)和(4)计算出 CR 值, 利用式(2)计算一二级指标权重, 此过程借助层次分析法软件 yaahp 进行计算, 根据 1~9 的比率标准主观地度量指标^[22], 得到一二级指标权重与一致性检验数据。6 名专家所反馈的各级指标评分打分结果均通过一致性检验, 计算平均值将其形成综合权重结果, 结果如表 4 所示。

表 4 工程安全管理能力体系适用性指标权重

Table 4 Weight of applicability indicators for engineering safety management capability system

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	综合权重
B_1	0.039 9	0.565 0	0.055 3	0.037 9	0.152 4	0.083 8	0.155 7
B_2	0.566 0	0.055 3	0.262 2	0.211 9	0.389 9	0.232 3	0.286 3
B_3	0.267 4	0.262 2	0.117 5	0.108 0	0.389 9	0.137 7	0.213 8
B_4	0.126 7	0.117 5	0.565 0	0.642 1	0.067 9	0.546 2	0.344 2
B_{11}	0.099 4	0.076 3	0.083 3	0.060 4	0.100 4	0.118 6	0.089 7
B_{12}	0.184 7	0.193 5	0.156 4	0.093 8	0.200 0	0.495 1	0.220 6
B_{13}	0.044 8	0.052 9	0.485 3	0.508 6	0.566 8	0.083 6	0.290 3
B_{14}	0.671 1	0.677 3	0.275 0	0.337 2	0.132 8	0.302 8	0.399 4
B_{21}	0.095 1	0.093 0	0.048 1	0.035 4	0.234 4	0.133 7	0.106 6
B_{22}	0.215 9	0.507 9	0.115 8	0.111 5	0.243 3	0.250 8	0.240 9
B_{23}	0.064 7	0.049 6	0.074 7	0.121 8	0.046 7	0.082 0	0.073 3
B_{24}	0.432 5	0.314 8	0.522 4	0.507 6	0.344 7	0.486 8	0.434 8
B_{25}	0.191 8	0.034 8	0.239 0	0.223 8	0.130 9	0.046 7	0.144 5
B_{31}	0.063 4	0.257 9	0.147 0	0.085 0	0.122 4	0.117 6	0.132 2
B_{32}	0.129 0	0.032 5	0.074 7	0.149 6	0.430 9	0.074 4	0.148 5
B_{33}	0.261 5	0.505 6	0.277 0	0.311 8	0.122 4	0.286 6	0.294 2
B_{34}	0.512 8	0.057 6	0.406 1	0.351 0	0.271 5	0.474 4	0.345 6
B_{35}	0.033 3	0.146 4	0.095 0	0.102 6	0.052 8	0.047 0	0.079 5
B_{41}	0.375 0	0.091 5	0.103 8	0.080 4	0.098 8	0.120 1	0.144 9
B_{42}	0.125 0	0.574 1	0.409 1	0.397 1	0.115 8	0.075 3	0.282 7
B_{43}	0.375 0	0.282 1	0.165 3	0.149 3	0.262 6	0.534 9	0.294 9
B_{44}	0.125 0	0.052 3	0.321 9	0.373 2	0.522 9	0.269 7	0.277 5

3.2 熵权法

1) 对原始矩阵 X 进行标准化, 可以得到矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$, 进一步对指标等级归一化处理^[7]。

$$\text{对于负向指标: } y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (5)$$

$$\text{对于正向指标: } y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (6)$$

2) 计算第 i 个指标的熵 e_i ^[8]:

$$e_i = -K \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (7)$$

式中: $K=1/\ln n$; $f_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij}$, 并且规定当 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$;

3) 第 i 个指标的差异系数 $g_i: g_i = 1 - e_i$; (8)

4) 计算第 i 个指标的熵权 $W_{ei}: W_{ei} = g_i / \sum_{i=1}^m g_i$ 。(9)

将问卷发放于 8 位在工程项目安全管理领域内具有 5 a 及以上工作经验的从业人员, 并让其对工程安全管理能力体系各级指标进行非常不重要到非常重要 9 个程度的打分, 分值为 1~9 分。最终, 根据打分结果利用式 (8) 计算熵权法权重, 此过程借助 SPSSAU 软件进行计算, 得到的结果如表 5 所示。

表 5 工程安全管理能力体系适用性指标熵权值

Table 5 Entropy weight value of applicability index for engineering safety management capability system

指 标	信息熵值 e	信息效用值 d	权重系数 w
体系预期目标性 (B_1)	0.976 5	0.023 5	0.085 1
体系框架合理性 (B_2)	0.953 1	0.046 9	0.169 4
体系内容协调性 (B_3)	0.878 9	0.121 1	0.437 8
体系运行实效性 (B_4)	0.914 9	0.085 1	0.307 7
一致性 (B_{11})	0.979 0	0.021 0	0.109 3
恰当性 (B_{12})	0.970 5	0.029 5	0.153 6
指向性 (B_{13})	0.884 4	0.115 6	0.601 1
完整性 (B_{14})	0.973 8	0.026 2	0.136 1
全面性 (B_{21})	0.997 7	0.002 3	0.013 9
适宜性 (B_{22})	0.980 1	0.019 9	0.118 1
创新性 (B_{23})	0.929 0	0.071 0	0.421 2
规范性 (B_{24})	0.971 1	0.028 9	0.171 6
整合性 (B_{25})	0.953 6	0.046 4	0.275 2
指导性 (B_{31})	0.887 9	0.112 1	0.428 5
扩展性 (B_{32})	0.961 2	0.038 8	0.148 3
明确性 (B_{33})	0.991 4	0.008 6	0.032 8
权威性 (B_{34})	0.929 9	0.070 1	0.267 9
预测性 (B_{35})	0.967 9	0.032 1	0.122 6
反馈性 (B_{41})	0.940 9	0.059 1	0.271 2
协同性 (B_{42})	0.975 1	0.024 9	0.114 1
智慧性 (B_{43})	0.923 8	0.076 2	0.349 7
支撑性 (B_{44})	0.942 3	0.057 7	0.265 0

3.3 组合赋权法

为了保障指标权重的合理性, 采取组合赋权的方法对指标赋权, 以求取主客观权重平均值方式计算出组合权重, 结果如表 6 所示。

表 6 工程安全管理能力体系适用性评价组合权重表

Table 6 Combination weight table for applicability evaluation of engineering safety management capability system

指 标	主观权重	客观权重	组合权重
体系预期目标性 (B_1)	0.155 7	0.085 1	0.120 4
体系框架合理性 (B_2)	0.286 3	0.169 4	0.227 9
体系内容协调性 (B_3)	0.213 8	0.437 8	0.325 8
体系运行实效性 (B_4)	0.344 2	0.307 7	0.326 0
一致性 (B_{11})	0.089 7	0.109 3	0.099 5
恰当性 (B_{12})	0.220 6	0.153 6	0.187 1
指向性 (B_{13})	0.290 3	0.601 1	0.445 7
完整性 (B_{14})	0.399 4	0.136 1	0.267 8
全面性 (B_{21})	0.106 6	0.013 9	0.060 3
适宜性 (B_{22})	0.240 9	0.118 1	0.179 5
创新性 (B_{23})	0.073 3	0.421 2	0.247 3
规范性 (B_{24})	0.434 8	0.171 6	0.303 2
整合性 (B_{25})	0.144 5	0.275 2	0.209 9
指导性 (B_{31})	0.132 2	0.428 5	0.280 4
扩展性 (B_{32})	0.148 5	0.148 3	0.148 4
明确性 (B_{33})	0.294 2	0.032 8	0.163 5
权威性 (B_{34})	0.345 6	0.267 9	0.306 8
预测性 (B_{35})	0.079 5	0.122 6	0.101 1
反馈性 (B_{41})	0.144 9	0.271 2	0.208 1
协同性 (B_{42})	0.282 7	0.114 1	0.198 4
智慧性 (B_{43})	0.294 9	0.349 7	0.322 3
支撑性 (B_{44})	0.277 5	0.265 0	0.271 3

4 实证研究

选取潍坊某碧桂园项目作为实证研究对象, 该项目为 13 栋洋房及高层的住宅项目, 在调研期间, 该项目处于一期一标段 13 栋楼已经交付使用及二期二标段 3 栋楼主体施工阶段, 核心工程项目全过程管理参与主体有: 建设单位、设计单位、施工单位、政府及后期运维单位。在调研过程中, 通过问卷的形式对该项目全过程进行工程安全管理能力体系的适用性评价, 将问卷投放给参与主体, 共投放问卷 92 份, 回收 83 份, 其中有效问卷 80 份。据此构建基于模糊综合评价的工程安全管理能力体系适用性评价模型, 并对体系内各指标进行综合评价得出其适用性得分, 进而提出相关对策建议。

4.1 适用性评价模型构建

4.1.1 确定评判对象集与因素集

模糊综合评价评判对象集指评价主要对象, 同时是评价指标体系中的目标层部分, 因素集是指评价指标体系中的一二级指标。因此, 评价的对象集为: $C=\{\text{工程安全管理能力体系适用性}\}$ 。因素集为: $B=\{B_1, B_2,$

B_3, B_4 ; $B_1=\{B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}\}$; $B_2=\{B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{24}, B_{25}\}$;
 $B_3=\{B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{34}, B_{35}\}$; $B_4=\{B_{41}, B_{42}, B_{43}, B_{44}\}$ 。

4.1.2 确定各指标评判评价集

在评价过程中指标评判评价集是形容各指标状态的集合, 可以表示为 $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ ^[11]。根据工程安全管理能力体系的特征将评价集划分为非常不重要、比较不重要、一般、比较重要、非常重要 5 个等级。同时, 为了对各级指标综合评分时能直观地展示安全管理能力体系的适用性效果, 将评价集的 5 个等级按照 100, 90, 80, 70, 60 进行赋分, 便于判断安全管理能力体系的适用性效果。其中, 体系内某项指标分值越高, 说明其在企业内适用性效果较好; 分值越低, 适用性效果越差。

4.1.3 确定隶属度矩阵

对工程安全管理能力体系评价指标量化的过程是确定单因素对因素集隶属度的过程, 因此需要构建隶属度矩阵 R 。

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i1} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{mi} & \cdots & r_{mi} \end{pmatrix}。$$

首先通过自上而下的形式向企业各职工发放问卷, 邀请对安全管理能力体系进行评分, 后将结果汇总并通过隶属度矩阵计算得隶属度评价集。根据回收问卷对该体系评价指标的数据处理形成各级指标隶属度。处理二级指标数据, 根据各参与主体的选择结果按百分比进行数据处理形成表 7 所示隶属度结果。

表 7 二级指标隶属度值

Table 7 Membership degree of second-level indicators

指标	隶 属 度				
	非常符合	比较符合	一般	比较不符合	非常不符合
B_{11}	0.687 5	0.125 0	0.062 5	0.125 0	0
B_{12}	0.625 0	0.125 0	0.125 0	0.125 0	0
B_{13}	0.600 0	0.250 0	0.025 0	0.125 0	0
B_{14}	0.375 0	0.125 0	0.187 5	0.312 5	0
B_{21}	0.437 5	0.187 5	0.237 5	0.137 5	0
B_{22}	0.350 0	0.150 0	0.125 0	0.250 0	0.125 0
B_{23}	0.425 0	0.250 0	0.125 0	0.200 0	0
B_{24}	0.462 5	0.212 5	0.137 5	0.187 5	0
B_{25}	0.387 5	0.250 0	0.237 5	0.125 0	0
B_{31}	0.362 5	0.262 5	0.225 0	0.150 0	0
B_{32}	0.250 0	0.250 0	0.125 0	0.312 5	0.087 5
B_{33}	0.312 5	0.312 5	0.225 0	0.150 0	0
B_{34}	0.412 5	0.287 5	0.125 0	0.175 0	0
B_{35}	0.387 5	0.237 5	0.200 0	0.175 0	0
B_{41}	0.187 5	0.187 5	0.250 0	0.200 0	0.175 0
B_{42}	0.125 0	0.175 0	0.187 5	0.200 0	0.312 5
B_{43}	0.262 5	0.175 0	0.187 5	0.250 0	0.125 0
B_{44}	0.187 5	0.200 0	0.125 0	0.237 5	0.250 0

根据二级指标计算得出一级指标隶属度, 见表 8。

表 8 一级指标隶属度

Table 8 Membership degree of first-level indicators

指标	隶 属 度				
	非常符合	比较符合	一般	比较不符合	非常不符合
B_1	0.553 2	0.180 7	0.091 0	0.175 2	0
B_2	0.415 9	0.217 0	0.159 2	0.185 7	0.022 4
B_3	0.355 6	0.274 0	0.177 0	0.184 3	0.013 0
B_4	0.199 3	0.184 4	0.183 6	0.226 3	0.206 5

4.1.4 确定模糊评价结果向量

对各级指标模糊综合评分后得出各指标的适用性综合评分, 通过组合赋权获得的权重 W 与其相对的隶属度矩阵 R 合并计算获得模糊评价结果向量 B :

$$B_i = W \times R。$$

例如, 根据最大隶属度原则, 从体系运行实效性指标来看, 其权重为

$$B_4 = (0.208 1 \ 0.198 4 \ 0.322 3 \ 0.271 3)$$

而其隶属度矩阵则为

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.187 5 & 0.187 5 & 0.250 0 & 0.200 0 & 0.175 0 \\ 0.125 0 & 0.175 0 & 0.187 5 & 0.200 0 & 0.312 5 \\ 0.262 5 & 0.175 0 & 0.187 5 & 0.250 0 & 0.125 0 \\ 0.187 5 & 0.200 0 & 0.125 0 & 0.237 5 & 0.250 0 \end{pmatrix}，$$

得出体系运行实效性评价等级权重:

$$A_4 = (0.199 3 \ 0.184 4 \ 0.183 6 \ 0.226 3 \ 0.206 5)。$$

由此可得, 工程安全管理能力体系的运行实效性总评价得分为

$$W_4 = 0.199 3 \times 100 + 0.184 4 \times 90 + 0.183 6 \times 80 + 0.226 3 \times 70 + 0.206 5 \times 60 = 79.44 \text{ 分}。$$

4.2 工程安全管理能力体系适用性评价结果与分析

安全管理能力体系适用性评价结果如表 9 所示。

表 9 各评价指标得分表

Table 9 Score table of each evaluation indicator

目标层得分	准则层得分	各评价因子	评价因子得分
工程 安全 管理 能力 体系 适用性 评价 (85.66)	体系预期目标性 (B_1) (91.13)	一致性 (B_{11})	93.75
		恰当性 (B_{12})	92.50
		指向性 (B_{13})	93.25
		完整性 (B_{14})	85.63
	体系框架合理性 (B_2) (88.20)	全面性 (B_{21})	89.25
		适宜性 (B_{22})	83.50
		创新性 (B_{23})	89.00
		规范性 (B_{24})	89.50
		整合性 (B_{25})	89.00
	体系内容协调性 (B_3) (88.06)	指导性 (B_{31})	88.38
		扩展性 (B_{32})	84.63
		明确性 (B_{33})	87.88
		权威性 (B_{34})	89.38
		预测性 (B_{35})	88.38
体系运行实效性 (B_4) (79.44)	反馈性 (B_{41})	80.13	
	协同性 (B_{42})	76.00	
	智慧性 (B_{43})	82.00	
	支撑性 (B_{44})	78.38	

根据模糊综合评价结果,可看出工程安全管理能力体系适用性总得分为85.66分,4个一级指标的分数及排名依次为:体系预期目标性(91.13)、体系框架合理性(88.20)、体系内容协调性(88.06)、体系运行实效性(79.44)。表明该体系在此项目实际运行过程中智慧化、网络化及协同化安全管理预期目标基本实现,但由于不同项目间存在差异性,体系以涵盖大部分工程为目标进行体系内容编排及框架编写,与此项目的安全管理存在少量偏差。由于此项目为住宅项目,涉及安全管理能力及其技术水平。相对于部分项目,要求较低且开发商更加追求经济效益,故体系在此项目运行实效性中缺少大量技术成本投入、产学研技术人才培育及技术开发,因此最终导致体系实际运行应用指标得分较小。

在体系预期目标性下的二级指标得分依次为:一致性(93.75)、指向性(93.25)、恰当性(92.50)、完整性(85.63)。表明体系在此项目的运行过程中,安全管理目标与建筑市场保持一致,基本满足项目参与主体安全管理需求及指向该项目安全管理能力存在的核心问题,但与建设单位安全管理能力的未来发展方向存在一定偏差,且由于项目所处地理位置和规模问题,智慧化发展水平不高,并不能完整地反映出建筑业的发展方向。在体系框架合理性下的二级指标得分依次为:规范性(89.50)、全面性(89.25)、创新性(89.00)和整合性(89.00)、适宜性(83.50)。表明体系基本覆盖此项目安全管理能力要点、创新安全管理能力建设、符合安全管理各项规范要求,且整合各主体内外资源协同管理能力,但由于项目具备智慧化专业能力的工作人员较少,使得项目人员在对接智慧安全管理系统各要素方面存在一定差距。在体系内容协调性下的二级指标得分中,依次为:权威性(89.38)、指导性(88.38)和预测性(88.38)、明确性(87.88)、扩展性(84.63)。表明体系在此项目运行过程中,可以指导智慧安全管理系统建设及运作、明确安全管理能力建设方向、在安全管理能力提高过程中具有一定权威性,但是建筑市场瞬息万变,工程建设周期内社会经济水平不断变化,企业对于未知的市场变化准备不足,所以根据市场变化进行动态调整以及扩展业务的能力较弱。体系运行实效性下的二级指标得分依次为:智慧性(82.00)、反馈性(80.13)、支撑性(78.38)、协同性(76.00)。表明体系充分发挥此项目现有的安全管理能力、智慧管控要素,且能够提升安全隐患排查能力反馈性,但是由于项目前期施工及后期运行阶段涉及主体较多,建设单位和施工单位等各参与主体以及各部门

之间难以进行联动性的高效配合,整体协同性较弱,并且以成本最优为原则,在项目实施过程中缺少了对产学研技术人才的培育,导致安全管理能力协同性及产学研融合支撑体系构建方面存在不足。

总体来说,对工程安全管理能力体系适用性效果的整体评价处于良好水平,说明构建的工程安全管理能力适用性评价体系的构建是合理且可行的,但安全管理能力体系适用性效果仍有较大的提升空间,通过体系得分表明当前工程安全管理受国家政策与相关法律法规的指引,已制定了较为恰当并且一致的能力体系实施目标,应重点从安全管理能力体系的框架结构、内容协调、运行过程3个维度制定详细实施建议,强化工程安全管理能力体系的适用性。

4.3 安全管理能力体系实施建议

1) 完善能力体系完整性及扩展性。工程安全管理能力体系的研究与完善是一项长期工作,随着安全管理理论及政策的不断更新,工程项目各参与主体应了解建筑市场需求、弥补安全管理能力技术与管理方面的不足,确定未来安全管理能力智慧化、网络化、协同化的发展方向,提升安全管理能力体系的完整性。同时,注重资金、人才及技术等要素的投入比例,构建智慧安全管理系统,完善信息化的基础设施建设和能力体系。

2) 加快构建多主体信息共享平台。智慧协同是贯穿工程安全管理能力体系的核心要点,在智慧建造理论及技术不断发展的前提下,若想真正实现工程项目智慧化安全管理、形成智慧协同的安全管理体系,加快构建多主体信息平台是关键所在。由于安全事故自身具有突发性、破坏性等特点,智慧协同的安全管理能力体系要求对工程项目全过程的危险源感知监测及安全隐患排查与预前控制,但由于项目前期施工及后期运行阶段涉及主体较多,各单位难以进行联动性的高效配合,导致安全隐患的预前管控较差。因此,需要以智慧协同为核心,构建连接建设单位、施工单位、监理单位、政府的信息共享平台来实现工程智慧化安全管理的信息闭环路线,进一步提高安全隐患预前管控效果。

3) 推动体系配套基础设施建设。要使体系长久发展,技术、人员及资金等内外资源投入必不可少。工程项目各参与主体应加强产学研融合机制建设作为体系运行技术研发及人员培养支撑,以协调资源为关键推动体系配套基础设施建设。工程安全管理能力体系的实施需要各主体共同参与、协同合作,通过加强产学研融合和基础设施建设的同时,明确各参与主体任务,提升建筑企业、政府、科研机构间的合作互

动,促使合作机制形成,并通过体系运行过程中对合作机制的不断优化,将体系完善与运行改进在各参与主体智慧协同过程中进行。

5 结语

随着智慧建造技术的广泛推广和应用,我国工程项目安全管理面临智慧化转型升级,传统工程项目安全管理能力体系系统性差、智慧化程度低的弊端日益显现。通过对工程智慧化安全管理能力体系的构建并将组合赋权的方法应用于工程安全管理能力体系适用性评价中,计算得出准确的适用性评价权重值。实际工程项目验证合理,为安全管理能力体系适用性评价方法的选择提供了新思路。采用模糊综合评价法构建适用性评价模型,并选择潍坊某碧桂园项目进行实证分析,得出安全管理能力体系适用性评价等级处于良好水平,说明该体系在实际运行过程中具有较好的适用性,与建筑业智慧建造发展要求相对应,有利于促进工程安全管理能力体系的不断完善和优化,解决传统工程安全管理与当前建筑业智慧建造发展不协同的突出问题,提出全面系统的安全管理能力体系解决方案,提升工程项目安全管理智慧化水平,为工程项目安全管理数字化监测、网络化协同与智慧化管控提供参考思路。各单位可考虑使用该适用性评价体系进行自查,建立自我完善机制,以促进工程安全管理能力的进一步优化和提升,为各单位构建工程安全管理能力体系以及验证其适用性提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 吕红. 高等教育质量标准体系适用性评价研究[J]. 教育学术月刊, 2016(11): 81-88.
LÜ Hong. Applicability Evaluation of Higher Education Quality Standard System[J]. Education Research Monthly, 2016(11): 81-88.
- [2] 雷妍. 装配式混凝土结构建筑标准体系适用性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LEI Yan. Study on Applicability Evaluation of Architectural Standard System of Assembled Concrete Structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [3] 孙志宏, 贾云洁, 张旭光, 等. 沙区生态产业技术适用性评价指标体系的构建[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 9-16.
SUN Zhihong, JIA Yunjie, ZHANG Xuguang, et al. The Construction of Evaluation Index System for the Applicability of Eco-Industry Technology in Sand Areas[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 9-16.
- [4] 胡光伟, 廖江威, 张明. 基于TOPSIS模型的湖南省新型城镇化发展质量综合评价[J]. 湖南工业大学学报(社会科学版), 2020, 25(4): 95-103.
HU Guangwei, LIAO Jiangwei, ZHANG Ming. Comprehensive Evaluation of the Quality of New Urbanization Development in Hunan Province Based on TOPSIS Model[J]. Journal of Hunan University of Technology (Social Science Edition), 2020, 25(4): 95-103.
- [5] 姜兰, 吕忠, 彭亚, 等. 基于组合权重-Fuzzy的航空公司安全管理体系有效性评估[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5): 2107-2113.
JIANG Lan, LÜ Zhong, PENG Ya, et al. Evaluation of Safety Management System Effectiveness for Airline Companies Based on Combined Weights and Fuzzy Method[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5): 2107-2113.
- [6] 柴蕴栩, 肖长来, 梁秀娟, 等. 改进AHP法灰色关联和模糊综合评价在地下水水质评价中的适用性[J]. 水利水电技术, 2019, 50(4): 146-152.
CHAI Yunxu, XIAO Changlai, LIANG Xiujian, et al. Applicability of Grey Relational and Fuzzy Comprehensive Evaluation of Improved AHP Method in Groundwater Quality Evaluation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(4): 146-152.
- [7] 汪林, 张立影, 贾玲, 等. 基于组合赋权的节水型用水器具适用性评价方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(11): 195-206.
WANG Lin, ZHANG Liying, JIA Ling, et al. Combined Weighting Method-Based Evaluation on Applicability of Water Use Appliance[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(11): 195-206.
- [8] 周应堂, 贾馥蔚. 基于综合集成赋权法的农田水利管护模式适用性评价研究[J]. 节水灌溉, 2018(8): 71-74.
ZHOU Yingtang, JIA Fuwei. Applicability Evaluation of the Farmland Water Conservancy Management Mode Based on Comprehensive Integrated Weighting Method[J]. Water Saving Irrigation, 2018(8): 71-74.
- [9] 宋健, 黄元生. 江苏省工业企业生产效率分析及评价: 以国有控股工业企业为例[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(3): 77-83.
SONG Jian, HUANG Yuansheng. Analysis and Evaluation of Production Efficiency of Industrial Enterprises in Jiangsu Province: A Case Study of State-Owned Holding Industrial Enterprises[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(3): 77-83.
- [10] 金武剑. 基于中心点三角白化权函数的灰色评估方法在核电标准适用性评价中的应用[J]. 核标准计量与质量, 2018(4): 13-20.

- JIN Wujian. Application of Grey Evaluation Method Based on Triangle Whitening Weight Function of Central Point in Applicability Evaluation of Nuclear Power Standards[J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2018(4): 13-20.
- [11] 张霞, 何南. 综合评价方法分类及适用性研究[J]. 统计与决策, 2022, 38(6): 31-36.
ZHANG Xia, HE Nan. Study on Classification and Applicability of Comprehensive Evaluation Methods[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(6): 31-36.
- [12] 陈勇, 胡甚平, 轩少永, 等. 航运公司安全管理有效性组合赋权评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(8): 78-84.
CHEN Yong, HU Shenping, XUAN Shaoyong, et al. Model for Evaluating the Effectiveness of Shipping Company Safety Management Based on Combination Weight[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(8): 78-84.
- [13] 周雪, 左忠义, 程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(增刊1): 158-164.
ZHOU Xue, ZUO Zhongyi, CHENG Wei. Safety Evaluation of Railway Passenger Transport Based on Combined Weighted Cloud Model[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(S1): 158-164.
- [14] 董胜华. 工程建设标准体系框架建立与评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
DONG Shenghua. Study on Establishment and Evaluation of Construction Standard[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010.
- [15] 白学平. 高速公路安全设施适用性评价及优化技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
BAI Xueping. Study on Applicability Evaluation and Optimization Technology of Expressway Safety Facilities[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [16] 李琳, 张领先, 李道亮, 等. 温室智能控制系统适用性评价指标体系选择模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 148-153.
LI Lin, ZHANG Lingxian, LI Daoliang, et al. Indicators Selecting Model for Applicability Evaluation of Greenhouse Intelligent Control System[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 148-153.
- [17] 任冠华, 魏宏, 刘碧松, 等. 标准适用性评价指标体系研究[J]. 世界标准化与质量管理, 2005(3): 15-18.
REN Guanhua, WEI Hong, LIU Bisong, et al. Research on Indexes System of Standard Applicability Evaluation[J]. World Standardization and Quality Management, 2005(3): 15-18.
- [18] 郑晓萍. 绿色能源技术应用适用性评价体系再探: 以广州海珠生态城绿色能源系统规划为例[J]. 南方建筑, 2015(3): 119-123.
ZHENG Xiaoping. Discussion of the Applicability Evaluation System of Green Energy Technology: Case of the Planning of Green Energy System in Guangzhou Haizhu Eco-City[J]. South Architecture, 2015(3): 119-123.
- [19] 刘会娟. PPP模式在保障房建设领域的适用性评价[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
LIU Huijuan. Applicability Evaluation of PPP Model in the Field of Affordable Housing Construction[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
- [20] 赵睿. 房地产企业绿色营销适用性评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
ZHAO Rui. Study on Applicability Evaluation of Green Marketing in Real Estate Enterprises[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011.
- [21] 刘学锋. 既有铁路改造为市郊铁路线路适用性评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LIU Xuefeng. Study on Applicability Evaluation of Existing Railway Transformation into Suburban Railway Line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [22] 张科学, 王晓玲, 何满潮, 等. 智能化无人开采工作面适用性多层次模糊综合评价研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 47-56.
ZHANG Kexue, WANG Xiaoling, HE Manchao, et al. Research on Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation of the Applicability of Intelligent Unmanned Mining Face[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 47-56.

(责任编辑: 申剑)