

中文引用格式:陈大川,段晓峰,陈明思,等. 基于组合赋权和改进 TOPSIS 的商业建筑运维阶段结构安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 140–148.

英文引用格式:CHEN Dachuan, DUAN Xiaofeng, CHEN Mingsi, et al. Structural safety evaluation of commercial buildings in operation and maintenance phase based on combined empowerment and improved TOPSIS [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 140–148.

基于组合赋权和改进 TOPSIS 的商业建筑运维阶段 结构安全评价*

陈大川¹教授, 段晓峰¹, 陈明思², 文征东³高级工程师, 石劲松³

(1 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083; 2 湖南大学 设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410006; 3 中国太平洋财产保险股份有限公司 湖南分公司, 湖南 长沙 410005)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1605

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701308)。

【摘要】 为预防商业建筑在运维阶段发生结构安全事故,提高商业建筑结构安全评估的客观性与准确性,首先,建立商业建筑运维阶段结构安全评价体系,并采用基于层次分析法(AHP)—指标相关性权重确定法(CRITIC)的主客观组合赋权法,确定体系中各个评价指标的权重;其次,结合引入区间数改进后的优劣解距离法(TOPSIS),确定商业建筑在不同结构安全等级状况下对应安全评价指标的区间值,得到不同安全状况等级下的相对贴近度;最后,以长沙市某商业综合体建筑为例,基于现场检测数据,评价其安全状况,并与专业检测机构鉴定后出具的检测报告结果对比,验证所构建的指标体系和计算结果的准确性和适用性。研究结果表明:结合行业规范和专家经验确立评价指标体系,在现有研究的基础上使用组合赋权方法及区间数改进后的 TOPSIS 评价法,能够提高商业建筑结构安全评估的客观性和准确性。

【关键词】 商业建筑; 运维阶段; 结构安全评价; 组合赋权; 优劣解距离法(TOPSIS)

Structural safety evaluation of commercial buildings in operation and maintenance phase based on combined empowerment and improved TOPSIS

CHEN Dachuan¹, DUAN Xiaofeng¹, CHEN Mingsi², WEN Zhengdong³, SHI Jinsong³

(1 School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410083, China;

2 Hunan University Design and Research Institute, Changsha Hunan 410006, China;

3 Hunan Branch, China Pacific Insurance Co., Ltd., Changsha Hunan 410005, China)

Abstract: In order to prevent structural safety accidents in commercial buildings during the operation and maintenance phase and enhance the objectivity and accuracy of structural safety assessments for commercial buildings, the following steps were taken: First, a structural safety evaluation system for the operation and maintenance phase of commercial buildings was established. The weights of each evaluation indicator within the system were determined using a combined objective-subjective weighting method based

on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) method. Second, by incorporating the improved TOPSIS method with interval numbers, the interval values of safety evaluation indicators corresponding to different structural safety levels of commercial buildings were determined, yielding relative proximity values under different safety condition levels. Finally, taking a commercial complex building in Changsha City as an example, the safety condition was evaluated based on on-site inspection data, and the results were compared with those from the inspection report issued by a professional inspection institution after appraisal to verify the accuracy and applicability of the established indicator system and calculation results. The study indicates that by combining industry standards and expert experience to establish the evaluation indicator system, and using the combined weighting method and the interval-based TOPSIS evaluation method improved with interval numbers on the basis of existing research, the objectivity and accuracy of structural safety assessment for commercial buildings can be enhanced.

Keywords: commercial building; operations and maintenance phase; structural safety evaluation; combination weighting; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS)

0 引 言

随着我国城市化水平的不断推进,商业建筑的体量及数量不断增加、业态构成越来越复杂^[1]。由于商业综合体建筑往往人流密集^[2],若发生安全事故,会对人民群众的生命财产安全以及社会的稳定造成恶劣的后果。因此,准确快速地分析和预测商业建筑结构安全状态,对防治由于结构性能下降甚至丧失而引发的结构安全事故有重要的理论意义。

近年来,国内外学者采用层次综合评定和赋权理论针对各类房屋建筑建立了结构安全评价体系。乔雄等^[3]依托甘南地区拉卜楞隧道,评估邻近古建筑结构的安全性。杨斯玲等^[4]从装配式建筑现场施工方面提出 1 种基于结构熵权和修正证据理论的安全风险评价方法。HUAN Junzhong 等^[5]提出了基于结构熵权-物元可拓模型的古建筑木结构安全评价模型。SHEN Zhouyang 等^[6]基于深度神经网络提出了 1 种新的结构安全状态快速评估方法。上述结构评估方法虽然能够发挥一定作用,但指标权重的确定受专家主观经验的影响较大,不能客观反映各指标的影响程度。在评价方法层面,优劣解距离法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 已经广泛地运用到安全评价领域,但是,传统的 TOPSIS 法具有局限性,只能得出评估方案的相对优劣结果。尽管现有评价方法在结构安全评价中取得一定成果,但工程复杂环境下,难以准确有效反映实际状况。

鉴于此,笔者以多层混凝土框架结构形式的商

业建筑作为研究对象,结合影响商业建筑运维阶段结构安全的潜在风险源,构建全面的结构安全评价体系,并使用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和指标相关性权重确定法 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC) 相结合的组合赋权法和区间数改进 TOPSIS 法,评价建筑结构安全,构建结构安全评价模型,并将文中所建模型应用于湖南某商业建筑结构的安全评价,验证该模型的准确性和适用性,以期为确定同类建筑的结构安全状况提供依据。

1 商业建筑运维阶段结构安全评价

1.1 结构安全评价流程

首先,结合专家意见及整理相关资料,归纳出商业建筑在运维阶段影响其结构安全的 21 个指标因素;其次,采用 AHP 法和 CRITIC 法结合的组 合赋权法计算指标的综合权重,使最终权重值更具可靠性^[7];然后,根据不同安全等级下的指标值,从最优状况到最差状况共选取 5 组数据,运用传统 TOPSIS 法计算出这 5 种状况下的相对贴近度,确定基于相对贴近度大小的结构安全状况分级标准,同时,根据现场检测采集到的数据确定指标值的区间范围,使用区间数改进后的 TOPSIS 法来确定待评估建筑的相对贴近度;最后,根据分级标准,确定该建筑的结构安全状况等级。商业建筑在运维阶段的结构安全评价模型构建的技术路线如图 1 所示。

1.2 结构安全评价指标体系

在广泛调研相关文献和总结大量工程案例的

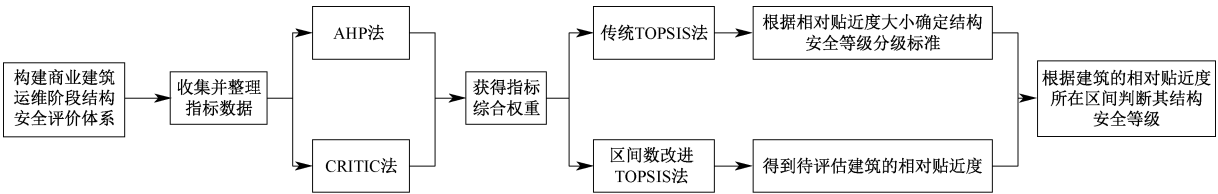


图1 结构安全评价流程

Fig.1 Structural safety evaluation flowchart

基础上,根据《民用建筑可靠性鉴定标准》^[8]中对于既有建筑的安全评估和鉴定方面的规定,建立的评价指标均需反映房屋建筑某一部分的安全性能^[9],同时,考虑商业综合体在运营维护阶段的特

异性,从6个方面考虑影响商业建筑在运营阶段的结构安全的一级指标,并将这些一级指标细分为21个分项评价指标,构建结构安全评价体系,如图2所示。

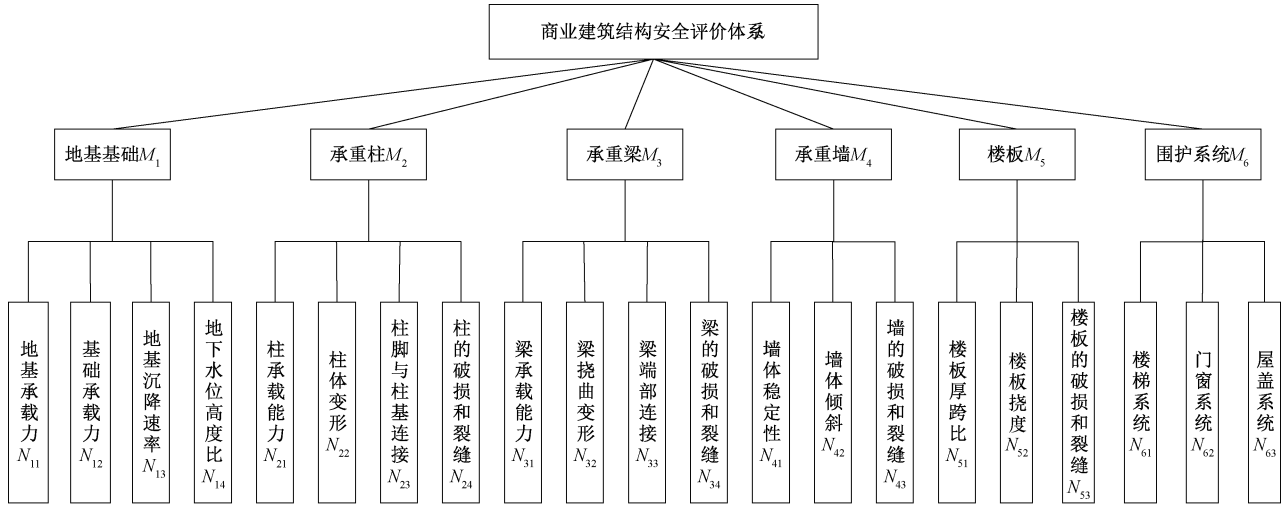


图2 商业建筑结构安全评价体系

Fig.2 Structural safety evaluation system for commercial buildings

在结构安全评价体系中,21个分项评价指标可根据数据获取方式分为客观指标和主观指标。

客观指标是指可通过现场检测、设计资料查阅等方式获取量化值的评价指标,后续可将其输入结构计算模型进行安全分析。如地基承载力 N_{11} 可通过平板载荷等现场试验确定其承载力特征值;梁、柱承载力 N_{31} 、 N_{21} 可经过回弹或钻芯法计算得到承载力特征值。构建的评价体系中共16个客观指标。

主观指标难以通过具体数据表示,只能通过多名专家根据经验主观赋分,最后得到综合评分。如柱脚与柱基的连接 N_{23} 等。此类指标的核心评估内容并非客观数值,而是评价指标对结构整体安全性能的影响程度,分值反映其在结构整体受力时的重要性和可靠性程度。在构建的评价体系中,共有5个主观指标。

1.3 评价指标权重的确定

访谈调查10位专家(包含检测公司技术负责

人、结构安全设计从业人员^[10]及相关领域的高校教授),汇总他们对各指标之间相对重要性的评判结果。文中所提出的评价指标的主观、客观权重及组合赋权后得到的综合权重汇总见表1。

1.4 区间数改进 TOPSIS 法

TOPSIS法由HWANG等^[11]于1981年提出,它通过计算出指标与正、负理想解之间的距离来分析比选不同方案之间的优劣。但只能对指标优劣程度进行排序,方案优劣度的评判具有模糊性与不确定性^[12],无法实现对结构安全状况的定性分级。建筑物结构是1个由各承重部件构成的复杂多元系统^[13],这意味着实际的工程问题常伴随着不确定性,难以得到精确的指标值,而确定这些指标值的所处区间范围则相对更容易,利用区间数进行多指标决策更加符合现场工程的实际情况。

文中引入区间数改进后的TOPSIS法,将具有不确定性的区间数来替代具体的指标值,计算过程

表 1 第二层次指标主观、客观及综合权重汇总

Table 1 Summary of subjective, objective and composite weights of level 2 indicators

第一层次指标	第二层次指标	第一层次指标权重	第二层次指标主观权	第二层次指标一致性检验	第二层次指标客观权重	第二层次指标综合权重
M_1	N_{11}	0.368	0.38	通过	0.31	0.464
	N_{12}		0.46		0.21	0.380
	N_{13}		0.07		0.18	0.050
	N_{14}		0.09		0.30	0.106
M_2	N_{21}	0.232	0.09	通过	0.24	0.087
	N_{22}		0.05		0.26	0.052
	N_{23}		0.54		0.25	0.541
	N_{24}		0.32		0.25	0.321
M_3	N_{31}	0.123	0.25	通过	0.22	0.225
	N_{32}		0.05		0.28	0.057
	N_{33}		0.58		0.25	0.594
	N_{34}		0.12		0.25	0.123
M_4	N_{41}	0.166	0.69	通过	0.48	0.797
	N_{42}		0.25		0.28	0.168
	N_{43}		0.06		0.24	0.035
M_5	N_{51}	0.076	0.64	通过	0.45	0.758
	N_{52}		0.08		0.31	0.065
	N_{53}		0.28		0.24	0.177
M_6	N_{61}	0.035	0.28	通过	0.42	0.342
	N_{62}		0.07		0.26	0.053
	N_{63}		0.65		0.32	0.605

如下:

1) 计算加权标准化矩阵,如下式:

$$\boldsymbol{F}_{ij} = \boldsymbol{\Omega}_z \boldsymbol{X}_{ij} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{F}_{ij}$ 为第 i 个评价方案的第 j 个评价指标的加权标准化矩阵; $\boldsymbol{\Omega}_z$ 为组合赋权法所确定的指标的综合权重矩阵; $\boldsymbol{X}_{ij}$ 为标准化后的评价矩阵。

2) 计算正理想解 F_j^+ ,负理想解 F_j^- ,如下式:

$$F_j^+ = \{(\max_i F_{ij} \mid j \in J_1), (\min_i F_{ij} \mid j \in J_2)\} \tag{2}$$

$$F_j^- = \{(\min_i F_{ij} \mid j \in J_1), (\max_i F_{ij} \mid j \in J_2)\} \tag{3}$$

式中: J_1 为正向指标,即指标越大越好; J_2 为负向指标,即指标越小越好。

3) 计算欧氏距离,如下式:

$$O_i^+ = \sum_{j=1}^n \sqrt{(F_{ij} - F_j^+)^2} \tag{4}$$

$$O_i^- = \sum_{j=1}^n \sqrt{(F_{ij} - F_j^-)^2} \tag{5}$$

式中:针对 n 个待评价指标, O_i^+ 为方案与正理想解之间的欧氏距离; O_i^- 为方案与负理想解之间的欧氏距离。

4) 计算出各个安全等级所对应的相对贴近度 E ,如下式:

$$E = \frac{O_i^-}{O_i^+ + O_i^-} \tag{6}$$

5) 定义区间数。 $\hat{x} = (x_1, x_2) = \{x \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \mid \underline{x}, \bar{x} \in R\}$,针对 i 个评价方案,对 j 个指标构造初始评价矩阵 $\boldsymbol{G}$ 。

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \cdots & \hat{x}_{1j} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \cdots & \hat{x}_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{x}_{i1} & \hat{x}_{i2} & \cdots & \hat{x}_{ij} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中:假定指标值 x 的区间数 $\hat{x}$ 分别存在最大值 $\bar{x}$,最小值 $\underline{x}$, R 为实数集合。

6) 计算正向指标,如下式:

$$f_{ij} = \left(\frac{\underline{x}}{\max(\bar{x}_{ij})}, \frac{\bar{x}}{\max(\bar{x}_{ij})} \right) \tag{8}$$

式中: f_{ij} 为归一化后的评价指标; $\bar{x}_{ij}$ 为已有评价指标的区间最大值。

计算负向指标,如下式:

$$f_{ij} = \left(1 - \frac{x}{\max(\bar{x}_{ij})}, 1 - \frac{\bar{x}}{\max(\bar{x}_{ij})} \right) \quad (9)$$

运用式(8)、式(9)将 G 进行归一化。

7) 确定理想最优、最劣解,如下式:

$$f_j^+ = \{ (\max_i \bar{f}_{ij} \mid j \in J_1), (\min_i \bar{f}_{ij} \mid j \in J_2 \mid i \in R) \} \quad (10)$$

$$f_j^- = \{ (\min_i \bar{f}_{ij} \mid j \in J_1), (\max_i \bar{f}_{ij} \mid j \in J_2 \mid i \in R) \} \quad (11)$$

式中: f_j^+ 为第 j 个评价指标的理想最优解; f_j^- 为第 j 个评价指标的理想最劣解; $\bar{f}_{ij}$ 为评价指标区间最大值; $\underline{f}_{ij}$ 为评价指标区间最小值。

8) 计算目前状况与最优状况的欧氏距离 o_i^+ , 如下式:

$$o_i^+ = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \omega_z (|f_j^+ - \underline{f}_{ij}|^2 + |f_j^+ - \bar{f}_{ij}|^2)} \quad (12)$$

式中 ω_z 为组合赋权法所确定综合权重。

计算目前状况与最劣状况的欧氏距离 o_i^- , 如

下式:

$$o_i^- = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \omega_z (|f_j^- - \underline{f}_{ij}|^2 + |f_j^- - \bar{f}_{ij}|^2)} \quad (13)$$

计算出结构当前安全状况下所对应的相对贴近度 e ,如下式:

$$e = \frac{o_i^-}{o_i^+ + o_i^-}, 0 \leq e \leq 1 \quad (14)$$

1.5 评价指标取值区间确定

2 类指标具体分级情况见表 2。根据《民用建筑可靠性鉴定标准》^[8] 中规定以及专家意见,商业建筑运营阶段的结构安全状况可分为 4 个等级: A 级表示安全,可以满足正常使用要求;B 级表示较安全,建筑物整体承载能力满足正常使用要求,个别结构构件可能存在细微裂缝;C 级表示较危险,部分承重构件的损伤及裂缝会影响局部结构安全,必须采取防护及加固措施并实时监测;D 级表示危险,多数结构构件损伤,整体承载能力不满足要求,随时可能发生安全事故,必须采取加固措施或者拆除建筑物。

表 2 评价指标因素分级

Table 2 Grading of evaluation indicator factors

第一层次指标	第二层次指标	指标取值			
		A 级	B 级	C 级	D 级
M_1	N_{11}	(1.0,2.0]	(0.95,1.0]	(0.9,0.95]	(0,0.9]
	N_{12}	(1.0,2.0]	(0.95,1.0]	(0.9,0.95]	(0,0.9]
	N_{13}	(0,1]	(1,2]	(2,5]	(5,10]
	N_{14}	(1.0,2.0]	(0.95,1.0]	(0.90,0.95]	(0,0.9]
M_2	N_{21}	(1.0,2.0]	(0.95,1.0]	(0.9,0.95]	(0,0.9]
	N_{22}	(0,1/300]	(1/300,1/250]	(1/250,1/200]	(1/200,1/10]
	N_{23}	(75,100] 连接方式正确, 无缺陷	(50,75] 连接方式正确, 局部表面有缺陷	(25,50] 连接方式不当, 结构构件有缺陷	(0,25] 连接方式不当, 构件明显有严重缺陷
	N_{24}	(0,0.1]	(0.1,0.5]	(0.5,1]	(1,10]
M_3	N_{31}	(1.0,2.0]	(0.95,1.0]	(0.9,0.95]	(0,0.9]
	N_{32}	(0,1/300]	(1/300,1/275]	(1/275,1/250]	(1/250,1/10]
	N_{33}	(75,100] 连接方式正确, 无缺陷	(50,75] 连接方式正确, 局部表面有缺陷	(25,50] 连接方式不当, 结构构件有缺陷	(0,25] 连接方式不当, 构件明显有严重缺陷
	N_{34}	(0,0.1]	(0.1,0.5]	(0.5,0.7]	(0.7,10]
M_4	N_{41}	(0,12]	(12,24]	(24,35]	(35,50]
	N_{42}	(0,1/250]	(1/250,1/200]	(1/200,1/100]	(1/100,1/10]
	N_{43}	(0,0.1]	(0.1,0.5]	(0.5,1]	(1,10]
M_5	N_{51}	(1/30,1/10]	(1/35,1/30]	(1/40,1/35]	(0,1/40]
	N_{52}	(0,1/300]	(1/300,1/275]	(1/275,1/250]	(1/250,1/10]
	N_{53}	(0,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,10]

续表 2

第一层 次指标	第二层 次指标	指标取值			
		A 级	B 级	C 级	D 级
M_6	N_{61}	(75,100] 楼梯无变形, 强度满足要求	(50,75] 楼梯变形较小, 强度满足要求	(25,50] 楼梯局部破损、变形严 重,局部强度不满足要求	(0,25] 楼梯大部分破损、变 形严重,不满足要求
	N_{62}	(75,100] 门窗强度高,无变形	(50,75] 门窗强度较高,基本 无变形或变形较小	(25,50] 门窗强度一般,部分 门窗变形严重	(0,25] 门窗强度差,多数门 窗变形严重
	N_{63}	(75,100] 屋顶强度和刚度 良好,无破损	(50,75] 屋顶强度和刚度 良好,破损较小	(25,50] 屋顶强度和刚度 一般,破损裂缝明显	(0,25] 屋顶强度和刚度较 差,破损裂缝明显

注.: N_{23} 、 N_{33} 、 N_{61} 、 N_{62} 、 N_{63} 为主观指标,应根据现场实际情况来综合评分,相应评分标准为表中文字描述。

对于客观指标取值区间的确定,需要选取构件,并通过表 2 所涉及的公式计算,确定取值区间。例如:各类构件承载能力的取值区间的确定是同类构件结构抗力与作用效应之比的汇总,即将所抽取的构件的抗力与效应比值的范围作为本项指标的取值范围;另一部分客观指标通过现场监测或查询设计资料来确定指标取值区间。如地基沉降速率为商业建筑连续 2 月内地基沉降速度的平均值,可通过现场监测数据获得。

对于主观指标取值区间的确定,通过邀请 10 位行业内的专家,根据其对现场情况的评价分数,舍去两极值,最终得到各项主观指标的取值范围。

2 运维阶段结构安全评价案例分析

2.1 工程概况

某商业综合体地下室及多层商业建筑的部分混凝土结构构件、填充墙体等出现开裂、渗漏和其他破损。该项目地下部分为 2 层地下室,地上部分由 7 栋建筑组成,开裂区域主要集中在纯地下室区域(2 层框架结构)、1 号栋(地下 2 层,地上 3 层的框架结构)、2 号栋和 5 号栋(均为地下 2 层,地上 2 层的框架结构),其平面布置如图 3 所示。

项目东、南、北侧均为已建成建筑,西侧为正在施工的地下交通枢纽工程项目,处于基坑开挖阶段,已开挖约 1.8~3.6 m 深。地下室底板存在多处开裂,地下室底板裂缝的形态、分布如图 4 所示。

2.2 基于 TOPSIS 法的结构安全等级

1) 由表 2 建立 5 个典型样本,得到初始评价矩阵,并根据组合赋权后得到的综合权重矩阵计算得到加权规范矩阵:

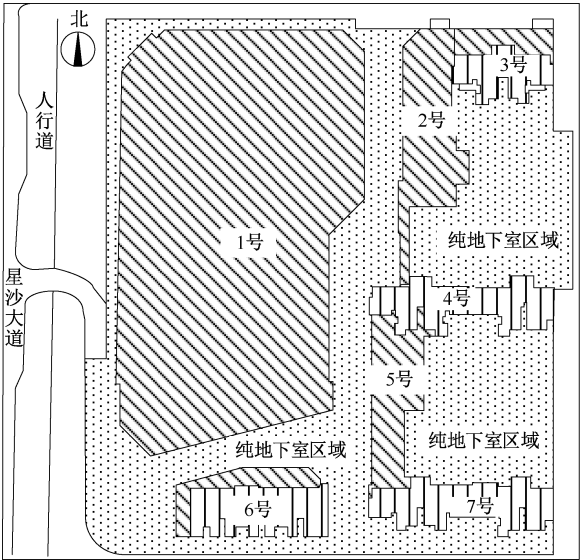


图 3 项目平面布置

Fig. 3 Project layout schematic



图 4 地下室底板裂缝分布

Fig. 4 Distribution of cracks in basement slab

$$F_{5,21} = \begin{bmatrix} 0.131\ 8 & 0.065\ 9 & 0.062\ 6 & 0.059\ 3 & 0 \\ 0.107\ 9 & 0.054\ 0 & 0.051\ 3 & 0.048\ 6 & 0 \\ 0 & 0.001\ 6 & 0.003\ 2 & 0.008\ 1 & 0.016\ 1 \\ 0.030\ 1 & 0.015\ 1 & 0.014\ 3 & 0.013\ 6 & 0 \\ 0.015\ 6 & 0.007\ 8 & 0.007\ 4 & 0.007\ 0 & 0 \\ 0 & 0.000\ 4 & 0.000\ 5 & 0.000\ 6 & 0.012\ 0 \\ 0.091\ 7 & 0.068\ 7 & 0.045\ 8 & 0.022\ 9 & 0 \\ 0 & 0.000\ 7 & 0.003\ 7 & 0.007\ 4 & 0.074\ 0 \\ 0.021\ 4 & 0.010\ 7 & 0.010\ 1 & 0.009\ 6 & 0 \\ 0 & 0.000\ 2 & 0.000\ 3 & 0.000\ 3 & 0.007\ 0 \\ 0.053\ 4 & 0.040\ 0 & 0.026\ 7 & 0.013\ 3 & 0 \\ 0 & 0.000\ 2 & 0.000\ 8 & 0.001\ 1 & 0.015\ 1 \\ 0 & 0.023\ 8 & 0.047\ 6 & 0.069\ 5 & 0.099\ 2 \\ 0 & 0.001\ 1 & 0.001\ 4 & 0.002\ 8 & 0.027\ 7 \\ 0 & 0.000\ 1 & 0.000\ 3 & 0.000\ 6 & 0.005\ 8 \\ 0.051\ 4 & 0.017\ 1 & 0.014\ 7 & 0.012\ 9 & 0 \\ 0 & 0.000\ 2 & 0.000\ 2 & 0.000\ 2 & 0.004\ 9 \\ 0 & 0.000\ 1 & 0.000\ 3 & 0.000\ 5 & 0.013\ 4 \\ 0.008\ 7 & 0.006\ 6 & 0.004\ 4 & 0.002\ 2 & 0 \\ 0.001\ 4 & 0.001\ 0 & 0.000\ 7 & 0.000\ 3 & 0 \\ 0.015\ 5 & 0.011\ 6 & 0.007\ 7 & 0.003\ 9 & 0 \end{bmatrix}^T$$

2) 利用式(2)、式(3)计算正负理想解:

$$F_j^+ = [0.131\ 8 \quad 0.107\ 9 \quad 0 \quad 0.030\ 1 \quad 0.015\ 6 \quad 0 \\ 0.091\ 7 \quad 0 \quad 0.021\ 4 \quad 0 \quad 0.053\ 4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0.051\ 4 \quad 0 \quad 0 \quad 0.008\ 7 \quad 0.001\ 4 \quad 0.055]^T$$
$$F_j^- = [0 \quad 0 \quad 0.016\ 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0.012\ 0 \quad 0 \quad 0.074\ 0 \quad 0 \\ 0.007\ 0 \quad 0 \quad 0.015\ 1 \quad 0.099\ 2 \quad 0.027\ 7 \quad 0.005\ 8 \\ 0 \quad 0.004\ 9 \quad 0.013\ 4 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

3) 利用式(4)、式(5)计算在 5 种不同情况下与正负理想解之间的距离:

$$O^+ = [0 \quad 0.100\ 6 \quad 0.122\ 4 \quad 0.149\ 0 \quad 0.248\ 7]^T$$
$$O^- = [0.248\ 7 \quad 0.164\ 5 \quad 0.138\ 2 \quad 0.117\ 0 \quad 0]^T$$

利用式(6)计算相对贴近度,得到不同安全状况等级下所对应的相对贴近度见表 3。

表 3 结构安全等级分级标准

Table 3 Structural safety classification criteria	
<i>E</i>	结构安全等级
(0,0.439 8]	D
(0.439 8,0.530 3]	C
(0.530 3,0.620 5]	B
(0.620 5,1]	A

2.3 基于区间数改进 TOPSIS 法的结构安全评价

根据现场工程实际情况并结合专家打分,确定该项目中结构安全评价指标的取值,见表 4。

表 4 某商业建筑结构安全评价指标取值
Table 4 Values of structural safety evaluation indexes for a commercial building

第一层次指标	第二层次指标	指标取值
M_1	N_{11}	[0.93,0.98]
	N_{12}	[0.96,1.02]
	N_{13}	[2,3.45]
	N_{14}	[0.90,1.02]
M_2	N_{21}	[0.95,1.03]
	N_{22}	[1/300,1/250]
	N_{23}	[70,80]
	N_{24}	[0.1,0.3]
M_3	N_{31}	[0.95,1.03]
	N_{32}	[0,1/300]
	N_{33}	[75,85]
	N_{34}	[0.1,0.3]
M_4	N_{41}	[15,18]
	N_{42}	[0,1/250]
	N_{43}	[0.1,0.3]
M_5	N_{51}	[1/35,1/30]
	N_{52}	[0,1/300]
	N_{53}	[0.1,0.3]
M_6	N_{61}	[80,90]
	N_{62}	[75,80]
	N_{63}	[85,90]

由式(8)、式(9)得到归一化后的评价矩阵:

$$F = [(0.465\ 0, 0.490\ 0) \quad (0.480\ 0, 0.510\ 0) \\ (0.655\ 0, 0.800\ 0) \quad (0.450\ 0, 0.510\ 0) \quad (0.4750, \\ 0.515\ 0) \quad (0.960\ 0, 0.966\ 7) \quad (0.700\ 0, 0.800\ 0) \\ (0.970\ 0, 0.990\ 0) \quad (0.475\ 0, 0.515\ 0) \quad (0.966\ 7, \\ 1.000\ 0) \quad (0.750\ 0, 0.850\ 0) \quad (0.970\ 0, 0.990\ 0) \\ (0.640\ 0, 0.700\ 0) \quad (0.960\ 0, 1.000\ 0) \quad (0.970\ 0, \\ 0.990\ 0) \quad (0.285\ 7, 0.333\ 3) \quad (0.966\ 7, 1.000\ 0) \\ (0.970\ 0, 0.990\ 0) \quad (0.800\ 0, 0.900\ 0) \quad (0.750\ 0, \\ 0.800\ 0) \quad (0.850\ 0, 0.900\ 0)]$$

由式(12)、式(13)得到评估状况与最优解、最劣解之间的距离:

$$o_i^+ = 0.606\ 7, o_i^- = 0.509\ 5$$

由式(14)计算得出相对贴近度:

$$e = 0.456\ 4$$

通过改进后的 TOPSIS 法计算得到相对贴近度为 0.456 4,根据表 3 确定其结构安全状况等级为 C 级,即建筑物的局部承载能力可能不满足要求,必须采取房屋修缮及加固措施进行处理,并实时监测影响结构安全的指标。评价结果与经过现场检测后得出来的结果相符,证明文中方法具有一定的准确性和适用性。

3 结 论

- 1) 商业建筑在运营阶段的结构安全评价体系共有 6 个一级指标,并进一步可细分为 21 个二级指标。根据评价指标的不同取值范围,结构安全等级可划分为 4 个等级。
- 2) 利用 AHP-CRITIC 组合赋权法计算评价体系中各指标的综合权重,能够降低最终结果受主观性的影响。

- 3) 将区间数引入 TOPSIS 评价法,能够减少商业建筑结构安全状况评价过程中受到的工程不确定性和复杂性的影响,提高评价效率。
- 4) 案例研究结果表明:文中提出的结构安全评价模型得到的评价等级与工程实际状况相符,证明文中方法具有一定的准确性和适用性。所提出的指标体系与计算方法可为同类商业建筑的结构安全评价提供借鉴和参考。

参 考 文 献

[1] 路世昌,倪照鹏,刘鑫,等. 大型商业综合体消防安全管理探讨[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(12): 1 752-1 755.
LU Shichang, NI Zhaopeng, LIU Xin, et al. Study on fire safety management of large commercial complexes[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(12): 1 752-1 755.

[2] 刘勇,徐志胜,赵望达. 商业综合体人员密度调查与分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(5): 175-180.
LIU Yong, XU Zhisheng, ZHAO Wangda. Investigation and analysis on personnel density in commercial complex[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(5): 175-180.

[3] 乔雄,刘文高,倪伟淋,等. 基于爆破荷载等效施加方法的振动波形预测与古建筑安全评估[J]. 地震工程学报, 2024, 46(1): 16-25.
QIAO Xiong, LIU Wen'gao, NI Weilin, et al. Prediction of vibration waveform and a safety assessment of ancient buildings based on the equivalent simulation method of blasting load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1): 16-25.

[4] 杨斯玲,黄和平,刘伟,等. 基于结构熵权和修正证据理论的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(6): 143-149, 153.
YANG Siling, HUANG Heping, LIU Wei, et al. Safety risk assessment of prefabricated building construction based on structure entropy weight and modified evidence theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(6): 143-149, 153.

[5] HUAN Junzhong, MA Donghui, WANG Wei, et al. Safety-state evaluation model based on structural entropy weight-matter element extension method for ancient timber architecture[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(6): 1 087-1 097.

[6] SHEN Zhouyang, PAN Peng, ZHANG Dongbin, et al. Rapid structural safety assessment using a deep neural network[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(5): 2 625-2 641.

[7] 周海怡,鲍全贵,叶茂,等. 基于组合赋权法的城市桥梁可靠性模糊综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 156-161.
ZHOU Haiyi, BAO Quanguai, YE Mao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of urban bridge reliability based on combination weighting method[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1):156-161.

[8] GB 50292—2015, 民用建筑可靠性鉴定标准[S].
GB 50292-2015, Standard for appraisal of reliability of civil buildings[S].

[9] 江杰,汤娟,甘雨,等. 基于组合赋权法的建筑结构安全评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17):

7 278-7 285.

JIANG Jie, TANG Juan, GAN Yu, et al. Safety evaluation of building structure based on combination weighting method[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7 278-7 285.

[10] 魏海霞, 赵明, 祝杰. 基于模糊层次分析法的建筑结构安全评价体系研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 181-186, 198.

WEI Haixia, ZHAO Ming, ZHU Jie. Safety evaluation system of building structure based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(5): 181-186, 198.

[11] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making methods and applications[M]. Springer, Berlin Heidelberg, 1981: 12-23.

[12] 陈文强, 杨睿孜, 赵宇飞, 等. 基于组合权重-TOPSIS 的岩质边坡稳定性评价[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1 198-1 206.

CHEN Wenqiang, YANG Ruizi, ZHAO Yufei, et al. Rock slope stability evaluation based on combined weighted and TOPSIS[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1 198-1 206.

[13] 段在鹏, 李帆, 郭进, 等. 城市易涝区房屋结构安全集成预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 173-180.

DUAN Zaipeng, LI Fan, GUO Jin, et al. Integrated warning model for structural safety of buildings in urban waterlogged area [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 173-180.

作者简介： 陈大川 （1967—）,男,四川营山人,博士,教授,主要从事结构检测和房屋安全鉴定等方面的研究。E-mail:745914148@qq.com。

