

火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选研究

李 勤¹, 刘怡君², 周 帆¹

(1. 北京建筑大学 建筑与城市规划学院, 北京 100044; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 火灾的发生, 给人们的生命安全和经济财产都造成了巨大的损失, 并且给建筑本身的结构埋下了极大的安全隐患. 为了确保人们的生命和财产安全, 同时保证建筑结构的安全, 需要采取应急加固工作. 但是, 加固方案要求工艺简单且易于操作, 同时需要结合承载力和抗震性能的要求, 在此基础上做到经济合理. 因此, 针对我国火灾后钢筋混凝土结构建筑应急加固的工作特点, 本文构建了基于加权广义马氏距离改进 TOPSIS 方法的火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选模型, 并将模型应用于某实例中, 通过应用 SAP2000 对加固前后的承载能力对比分析表明, 各项指标显著提升. 研究结果表明, 该模型是熵权理论、加权广义马氏距离理论、TOPSIS 理论的有机结合, 为定量研究火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选工作提供了新的思路.

关键词: 安全工程; 火灾; 混凝土结构; TOPSIS 方法; 应急加固; 方案优选

中图分类号: X799.1; X931

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0821-08

Research on optimum selection of emergency reinforcement scheme for concrete structures after fire

LI Qin¹, LIU Yijun², ZHOU Fan¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The occurrence of fire has caused huge losses to people's life safety and economic property, and has buried great safety hazards in the structure of the building itself. In order to ensure the safety of people's lives and property, while ensuring the safety of the building structure, emergency reinforcement work is needed. However, the reinforcement scheme requires simple technology and easy operation, and at the same time, it needs to combine the requirements of bearing capacity and seismic performance, and be economical and reasonable on this basis. Therefore, in view of the characteristics of China's steel reinforced concrete structure after fire emergency reinforcement, this paper constructs an improved TOPSIS method of weighted generalized Mahalanobis distance based on the fire emergency plan optimization model of concrete structure reinforcement, and the model is applied to a fire engineering example, through the comparison of application of SAP2000 on the main performance before and after the reinforcement analysis shows that the index has significantly improved. The research results show that the model is an organic combination of entropy weight theory, weighted generalized Mahalanobis distance theory and TOPSIS theory. It provides a new idea for quantitative research of reinforcement scheme optimization of concrete structure after fire.

Key words: safety engineering; fire; concrete structure; TOPSIS method; emergency reinforcement; scheme optimization

近年来, 我国的火灾事故时有发生, 由此造成的人员伤亡和直接经济损失一直在增加. 2017 年 12 月 1 日, 天津市“城市大厦”火灾事故; 2017 年 11 月 18 日 11·18 北京大兴西红门镇“聚福缘公寓”火灾事故; 2015 年 8 月在天津滨海新区发生的

特大火灾事故, 事故造成 165 人遇难, 近 20 000 户居民房屋遭受了不同程度的损坏, 被烧毁的仓库和集装箱不计其数, 据估计直接经济损失高达 69 亿元. 发生火灾事故之后, 我们需要快速、准确且科学的判定烧损但未倒塌的建筑结构的受损程度,

收稿日期: 2020-05-20

修改稿日期: 2020-11-23

基金项目: 住建部 2018 年科学技术项目 (2018-K2-004); 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心资助项目 (udc2018010921, udc2016020100); 市属高校科研业务费项目 (X20055).

第一作者: 李 勤 (1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师. 主要从事城市规划与建筑设计理论, 城市遗产保护, 老旧城区更新改造, 旧工业建筑再生利用的研究. E-mail: 602724359@qq.com.

通信作者: 刘怡君 (1993—), 女, 博士研究生, 研究方向为旧工业建筑再生利用. E-mail: 474127542@qq.com.

计算剩余承载力,采取有效的加固方案进行修复,在最短的时间内尽快恢复建筑的原有使用功能,并尽量减少经济损失^[1]。

目前,我国针对火灾后结构检测、鉴定、加固方面的研究已取得一定成果,先后颁布了《火灾后混凝土构件评定标准》、《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)等^[2]。在学术研究方面,对于火灾后钢筋混凝土材料、构件的力学性能以及加固方案和加固后的力学性能相关的研究,在国内国外已经取得了部分研究成果^[3]。1995 年, Lie^[4] 等首次采用数学计算和实验室对比验证的方法,开展对钢筋混凝土空心结构柱的耐火性能参数化提升方法的研究,确定了各种因素对其耐火性能的影响。Yu^[5] 采用耐火性能更高的纤维增强聚合物(NSM-FRP)加固预制钢筋混凝土(RC)结构,实现结构抗火性能的提升,并通过实验和数值分析归纳相应规律。徐志胜等分析了 FRP 与受火损伤梁共同工作的机理和破坏机理^[6]。刘利先等分析了受损构件的受力机理及极限破坏机理,并推导出相应的计算方法^[7]。郑文忠等提出了一些计算公式,用于火灾后配筋混凝土梁裂缝宽度和正截面承载力^[8]。刘佳荣对 11 榀中等研究了普通混凝土剪力墙在三个方面对剪力墙火灾反应的影响^[9]。梁爱莉等探讨了高温后混凝土抗压强度的影响因素^[10]。张丽娜等分析不同楼层受火后对整体框架结构抗震性能的影响^[11]。王汉迎等探讨了某些关键参数对加固后混凝土 T 型梁抗剪性能的影响规律^[12]。在应急加固方案优选的研究方面,朱欣荣^[13] 针对隧道口边坡失稳展开了应急加固措施的研究;2011 年,周长东等^[14] 首次引入模糊层次分析法构造判断矩阵,通过计算模糊决策向量开展对震后桥梁结构应急加固方案优劣排序的研究;晋丽娜^[15] 运用层次分析法对地下室应急加固方案优选进行了研究。

但是,通过文献综述可以发现,现有的研究大部分针对火灾后构件和材料的力学性能、受力和破坏机理方面,但是在应急加固方面多采用层次分析法进行方案比选,相关研究存在一定不足,主要体现在指标体系不完善、研究方法选择单一等方面。针对上述问题,基于我国混凝土结构加固工程的自身特点,本研究在明确研究阶段、研究对象的基础上,参考类似项目研究成果的基础上,构建了基于加权广义马氏距离改进 TOPSIS 方法的火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选模型,并将模型应用于实例中,验证了模型的可行性,为定量研究应急加固方案优选工作提供新的思路,进而降低设计、

施工作业阶段盲目性导致的经济损失、安全事故的发生率。

1 基于改进 TOPSIS 法的火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选模型构建

1.1 指标体系的建立

考虑到混凝土受火后结构开裂、强度折减,钢筋的各项参数降低并严重威胁结构安全,随时存在倾覆的危险;基于此,一般要求采用工艺成熟、风险可控的技术方案解决问题,方案不仅需明显提升受损后的结构承载能力,立竿见影的解决实际问题,亦要满足经济性良好、实操性要强的要求。至此,基于科学、合理的原则,结合多个火灾项目现场的调研^[16],在文献综述^[1-2]的基础上,归纳分析火灾后结构应急加固的影响因素,最终建立火灾后钢筋混凝土结构应急加固方案优选指标体系,如表 1 所示。

表 1 火灾后钢筋混凝土结构应急加固方案优选指标体系
Tab. 1 Optimization index system of emergency reinforcement scheme for reinforced concrete structures after fire

一级指标	二级指标	指标类型
安全性 H_1	结构承载能力提升 H_{11}	定性指标、效益型指标
	结构抗震能力提升 H_{12}	定性指标、效益型指标
	结构耐久性能提升 H_{13}	定性指标、效益型指标
应急性 H_2	过火区破坏程度 H_{21}	定性指标、成本型指标
	大型机械的依赖 H_{22}	定性指标、成本型指标
	资源协调难度 H_{23}	定性指标、效益型指标
	施工工期进度 H_{24}	定量指标、成本型指标
经济性 H_3	直接加固成本 H_{31}	定量指标、成本型指标
	后续使用年限 H_{32}	定量指标、效益型指标
	原结构利用率 H_{33}	定量指标、效益型指标
	后续维护成本 H_{34}	定量指标、成本型指标
可行性 H_4	火灾后空间环境制约 H_{41}	定性指标、成本型指标
	对原结构的扰动程度 H_{42}	定性指标、成本型指标
	内部使用功能的影响 H_{43}	定性指标、成本型指标
	特殊工种的需求程度 H_{44}	定性指标、成本型指标

本文所建立的指标体系由定量和定性指标构成,且指标体系分为效益型和成本型指标,定量指标数据直接在方案中进行提取,定性指标数据的收集采用专家打分法采用 0~10 分制,效益型指标评分越大越好和成本型指标评分越小越好。待评价数据收集完成后先进行标准化处理,计算公式如下:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_i}, j \in B_1 \quad (1)$$

$$p_{ij} = \frac{\min x_i}{x_{ij}}, j \in B_2 \quad (2)$$

待指标经标准化处理后进行归一化处理,计算

公式如下:

$$p'_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^n p_{ij}} \quad (3)$$

1.2 熵值法计算指标权重

(1) 将各指标同度量化

$Y = (y_{ij})_{m \times n}$, 计算第 j 项指标下第 i 个方案

指标值的比重 $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$;

(2) 计算第 j 项指标的熵值^[17]

$e_i = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$, e_j 为指标熵值, k 为大于零的正数, 设定 $k = 1/\ln m$, 确保 $0 \leq e_j \leq 1$;

(3) 计算第 j 项指标的差异性系数

$g_j = 1 - e_j$, 熵值越小, 指标间差异系数越大, 指标越重要;

(4) 定义权数 $w_i = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^m g_j}$, 即为权重计算结果。

1.3 加权广义马氏距离改进 TOPSIS

(1) 马氏距离^[18]

1936 年, 印度统计学家 Mahalanobis 首次提出马氏距离, 这种方法可以不被坐标间的量纲影响且独立于测量尺度, 通过引进随机变量的协方差测度指标之间的联系, 可以把指标间的相关性消除。所以, 在 TOPSIS 方法中引入马氏距离是解决指标相关问题的有效手段, 计算方法如下。

$$d(X, Y) = \sqrt{(X - Y)^T \sum (X - Y)} \quad (4)$$

式中: \sum 为指标间的协方差矩阵。 \sum 不受指标量纲的影响, 同时还能消除指标间的相关性。

(2) 广义马氏距离^[19]

在进行计算时, 若协方差矩阵的行列式为 0, 则 \sum^{-1} 不存在, 无法计算马氏距离。而用 \sum 的 Moore-Penrose 伪逆矩阵代替逆矩阵, 解决了协方差矩阵不可逆的问题。计算方法如下:

$$d(X, Y) = \sqrt{(X - Y)^T \sum^+ (X - Y)} \quad (5)$$

\sum^+ 构造方法: \sum 奇异值分解形式 $\sum^+ = USV'$, 则 $\sum^+ = VTU'$, 其中 $S = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_r) > 0$ 。 r 是矩阵 \sum 的秩, U 、 V 为正交阵。若 $S(i, j) \neq 0$, 则 $T(i, j) = 1/S(i, j)$; 若 $S(i, j) = 0$, 则 $T(i, j) = 0$ 。

(3) 加权广义马氏距离^[20]

广义马氏距离考虑了指标之间的相关性, 消除了指标量纲的影响, 解决了协方差矩阵不可逆的问

题, 但没有考虑到指标间的重要性差异, 而用加权广义马氏距离代替欧氏距离应用于 TOPSIS 方法中将有效解决指标间的重要性差异、不同量纲和相关性对决策结果的影响以及协方差矩阵不可逆的问题, 计算公式如下

$$d(X, Y) = \sqrt{(X - Y)^T \Omega^T \sum^+ \Omega (X - Y)} \quad (6)$$

式中: $\Omega = \text{diag}(\sqrt{w_1}, \sqrt{w_2}, \dots, \sqrt{w_n})$ 。

1.4 基于加权广义马氏距离的 TOPSIS 方法实现步骤

步骤一:

构造标准化决策矩阵 A^* , 包含备选方案 m 个指标 n 个。

$$A^* = [A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m]^T \quad (7)$$

步骤二:

确定正理想解 A^+ 和负理想解 A^- 。

$$A^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq m} a_{ij} | j \in J^+), (\min_{1 \leq i \leq m} a_{ij} | j \in J^-)\} (1 \leq i \leq m)$$

$$A^- = \{(\min_{1 \leq i \leq m} a_{ij} | j \in J^+), (\max_{1 \leq i \leq m} a_{ij} | j \in J^-)\} (1 \leq i \leq n)$$

(8)

式中: J^+ 代表效益型指标集; J^- 代表成本型指标集。

步骤三:

计算加权广义马氏距离 B_i^+ 和 B_i^- 。式中, A_i 为备选方案。

$$B_i^+ = \sqrt{(A_i - A^+)^T \Omega^T \sum^+ \Omega (A_i - A^+)}$$

$$B_i^- = \sqrt{(A_i - A^-)^T \Omega^T \sum^+ \Omega (A_i - A^-)} \quad (9)$$

步骤四:

计算贴近度。

$$c_i = \frac{B_i^-}{B_i^+ + B_i^-} \quad (10)$$

步骤五:

计算 A_i 排序, 贴近度值越大方案越优。

2 模型的实例应用

2.1 实例应用

某综合办公楼于 2009 年建成, 为钢筋混凝土框架结构, 地上七层, 建筑面积 3 770 m²。此项目的抗震设防等级为七度, 安全等级是 2 级, 有五十年的设计年限, 地震加速度大约是 0.1 g, 地震分组为第 1 组, 抗震等级为 3 级, II 类场地类别。混凝土强度均为 C30, 平面布置如图 1 所示。

2.2 加固方案初选

该混凝土结构火灾后的检测鉴定结果为, 初步鉴定评级: 6 根柱、6 根梁、4 块板评级为 III 级, 其余为 II_b 级。详细鉴定评级: 4 根柱、8 根梁、4

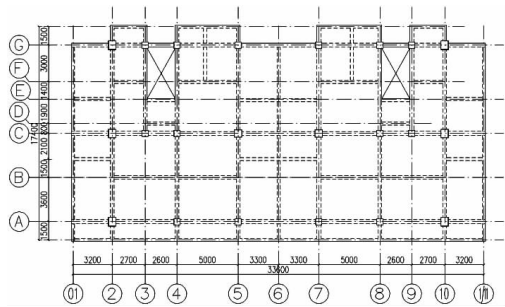


图 1 标准层结构平面布置图

Fig. 1 the layout of the standard layer structure

块板评级为 c 级, 其余为 b 级. 由评级结果可得,

表 2 四种备选加固方案

Tab. 2 Four alternative reinforcement schemes

序号	方案简介	详细解释
加固方案一	①粘贴碳纤维复合材加固法加固梁和板; ②外包型钢加固法加固柱	综合单价估算为 1 000/ m ² , 工期估算为 26 d, 后期维护费用基本为 2 300/ 年. 加固整体性好. 可以更好地提高构件的承载力, 施工工期更短. 该方案后期维修费用较高, 基本原结构使用空间无影响.
加固方案二	①置换混凝土法加固混凝土柱; ②碳纤维法加固梁、板	综合单价估算为 1 100/ m ² , 工期估算为 30 d, 后期维护费用约为 2 100/ 年. 施工技术成熟, 加固后的结构可靠性高, 但加固费用较高, 湿作业时间长, 噪音干扰较大.
加固方案三	①粘贴钢板加固法加固梁和板; ②二层局部增设钢支撑	该方案综合单价估算为 880/ m ² , 工期估算为 23 d, 后期维护费用基本为 2600/ 年, 施工工艺简单且无须模板和大型机械设备, 但施工质量对加固效果影响较大. 材料费和人工费较高. 对周围环境的影响小, 基本不占用原结构空间.
加固方案四	①增大截面法加固柱; ②碳纤维复合材加固法加固梁和板	该方案综合单价估算为 900/ m ² , 工期估算为 22 d, 后期维护费用基本为 2250/ 年, 采用该方案能保证加固后柱的承载力、刚度和耐久性, 与方案二相比, 能够缩短工期, 但费用有所提高.

2.3 方案优选过程

首先由设计院技术人员、科研机构教授师生、结构加固施工技术人员等 12 人组成的专家组对四

个加固方案进行数据采集, 取均值后得到初始决策指标量化值见表 3, 并采用熵值法计算得到各指标权重同见表 3.

表 3 初始决策指标量化值

Tab. 3 Quantitative value of initial decision-making indexes

指标编码	指标属性	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	权重
H ₁₁	效益型指标+	9.1	9.6	8.8	9.4	0.020
H ₁₂	效益型指标+	9.3	9.1	8.9	9.5	0.011
H ₁₃	效益型指标+	8.6	8.1	8.7	8.4	0.013
H ₂₁	成本型指标-	7.9	8.9	8.3	8.7	0.038
H ₂₂	成本型指标-	7.9	8.3	8.1	7.4	0.034
H ₂₃	效益型指标+	8.8	9.2	9	8.4	0.020
H ₂₄ /天	成本型指标-	26	30	23	22	0.253
H ₃₁ /元·m ⁻²	成本型指标-	1 000	1 100	880	900	0.141
H ₃₂ /年	效益型指标+	30	30	25	30	0.106
H ₃₃ /‰	效益型指标+	7.6	7.2	8.2	7.9	0.042
H ₃₄ /元·月	成本型指标-	2 300	2 100	2 600	2 250	0.105
H ₄₁	成本型指标-	7.2	7.8	6.9	7.6	0.041
H ₄₂	成本型指标-	7.9	8.8	7.2	8.1	0.093
H ₄₃	成本型指标-	6.8	6.6	7.1	7.7	0.060
H ₄₄	成本型指标-	8.1	7.9	8.2	7.5	0.022

按式(1)~(3)对表 3 中的数据进行标准化处
理, 得标准化矩阵 A^* .

利用 MATLAB 软件编程计算得到标准化决策
矩阵 A^* 的相关系数矩阵 A^x , 见表 3.

$$A^* = \begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ H_{11} & 0.247 & 0.260 & 0.238 & 0.255 \\ H_{12} & 0.253 & 0.247 & 0.242 & 0.258 \\ H_{13} & 0.254 & 0.240 & 0.257 & 0.249 \\ H_{21} & 0.267 & 0.237 & 0.254 & 0.242 \\ H_{22} & 0.250 & 0.238 & 0.244 & 0.267 \\ H_{23} & 0.249 & 0.260 & 0.254 & 0.237 \\ H_{24} & 0.239 & 0.207 & 0.271 & 0.283 \\ H_{31} & 0.241 & 0.219 & 0.273 & 0.267 \\ H_{32} & 0.261 & 0.261 & 0.217 & 0.261 \\ H_{33} & 0.246 & 0.233 & 0.265 & 0.256 \\ H_{34} & 0.250 & 0.274 & 0.221 & 0.255 \\ H_{41} & 0.255 & 0.236 & 0.267 & 0.242 \\ H_{42} & 0.252 & 0.226 & 0.276 & 0.246 \\ H_{43} & 0.258 & 0.266 & 0.247 & 0.228 \\ H_{44} & 0.244 & 0.250 & 0.241 & 0.264 \end{pmatrix}$$

表 3 相关系数矩阵 A^x

Tab. 3 Correlation matrix A^x

H_{44}	H_{11}	H_{12}	H_{13}	H_{21}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{31}	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{41}	H_{42}	H_{43}
H_{11}	1.000													
H_{12}	0.481	1.000												
H_{13}	-0.936	-0.141	1.000											
H_{21}	-0.696	-0.021	0.783	1.000										
H_{22}	0.102	0.841	0.219	-0.008	1.000									
H_{23}	-0.035	-0.827	-0.289	-0.069	-0.997	1.000								
H_{24}	-0.491	0.269	0.656	0.140	0.742	-0.764	1.000							
H_{31}	-0.659	0.035	0.752	0.206	0.560	-0.590	0.970	1.000						
H_{32}	0.831	0.765	-0.627	-0.199	0.307	-0.273	-0.410	-0.616	1.000					
H_{33}	-0.776	-0.115	0.825	0.299	0.419	-0.457	0.915	0.984	-0.728	1.000				
H_{34}	0.968	0.436	-0.916	-0.531	-0.035	0.092	-0.657	-0.810	0.882	-0.900	1.000			
H_{41}	-0.999	-0.494	0.930	0.718	-0.135	0.067	0.452	0.623	-0.819	0.746	-0.955	1.000		
H_{42}	-0.972	-0.376	0.944	0.583	0.083	-0.143	0.675	0.817	-0.842	0.903	-0.997	0.960	1.000	
H_{43}	0.130	-0.511	-0.346	0.139	-0.888	0.884	-0.928	-0.822	0.111	-0.709	0.333	-0.086	-0.352	1.000
1H00	0.665	0.777	-0.443	-0.609	0.762	-0.709	0.324	0.111	0.571	-0.064	0.493	-0.696	-0.479	-0.653

由相关系数矩阵 R^x 的计算结果可知, 指标之
间有较高的正、负相关性. 利用传统的 TOPSIS 不
再合理. 至此, 根据式(8)得到备选方案的正负理
想解, 即

$$A^+ = (0.260, 0.258, 0.257, 0.237, 0.238,$$
$$0.260, 0.207, 0.219, 0.261, 0.265, 0.221,$$
$$0.236, 0.226, 0.228, 0.241)$$
$$A^- = (0.238, 0.242, 0.240, 0.267, 0.267,$$
$$0.237, 0.283, 0.273, 0.217, 0.233, 0.274,$$
$$0.267, 0.276, 0.266, 0.264)$$
$$\Omega = \text{diag}(0.140, 0.104, 0.116, 0.196, 0.184,$$
$$0.143, 0.503, 0.375, 0.326, 0.205, 0.324, 0.203,$$
$$0.305, 0.245, 0.147)$$

由式(9)计算四个加固方案到“正理想解”的距
离 B^+ 和“负理想解”的距离 B^- 分别为

方案 A_1 : $B_1^+ = 0.436, B_1^- = 0.611$
方案 A_2 : $B_1^+ = 0.187, B_1^- = 0.780$
方案 A_3 : $B_1^+ = 0.687, B_1^- = 0.292$

方案 A_4 : $B_1^+ = 0.811, B_1^- = 0.372$
由式(10)得, 四个加固方案的贴进度分别为
方案 A_1 : $c_1 = \frac{0.611}{0.436+0.611} = 0.584$
方案 A_2 : $c_2 = \frac{0.780}{0.187+0.780} = 0.807$
方案 A_3 : $c_3 = \frac{0.292}{0.687+0.292} = 0.298$
方案 A_4 : $c_4 = \frac{0.372}{0.811+0.372} = 0.314$

贴进度排序即优越度: 方案 $A_2 >$ 方案 $A_1 >$ 方案 $A_4 >$ 方案 A_3 .

为了便于比较, 将本文提出的方法与传统 TOPSIS 方法对比分析, 得优越度: 方案 $A_2 >$ 方案 $A_1 >$ 方案 $A_3 >$ 方案 A_4 . 可以看出, 对比之后的最优方案保持一致, 证明了本文方法的可信性, 虽然 A_3 和 A_4 排序不同, 这是因为传统 TOPSIS 方法计算容易产生方案距离正、负理想解距离都相近的缺陷.

综上所述, 针对本工程项目, 最终选择加固方案 A_2 , 即采用置换混凝土法加固混凝土柱, 碳纤维法加固梁、板.

3 加固效果分析

对火灾后的钢筋混凝土框架结构进行加固时, 首先需要考虑的是结构的安全性, 而安全性又以结构承载能力提升指标最为关键, 利用 SAP2000 对关键技术指标在加固前与加固后的结构抗震承载力对比分析以期验证所选加固方案在承载能力提升方面的有效性和科学性, 从承载能力提升方面验证模型的可靠性. 计算模型如图 2 所示.



图 2 计算模型
Fig. 2 Computational model

3.1 模态分析

水平质量参与系数(前八阶振型)为 $95\% > 90\%$, 即取其来观察, 如图 3 所示.

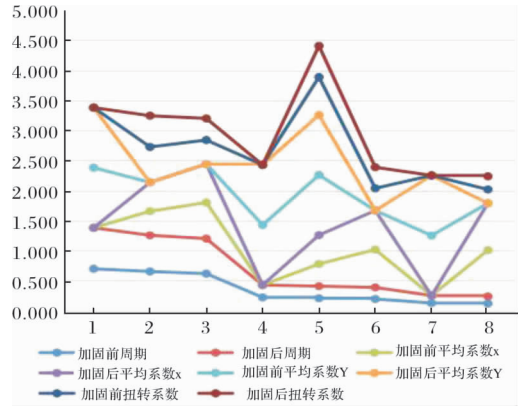


图 3 加固前后结构的自振周期和振动分量
Fig. 3 The self vibration period and vibration component of the structure before and after the solid

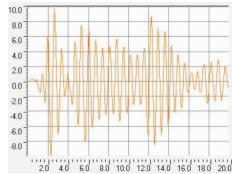
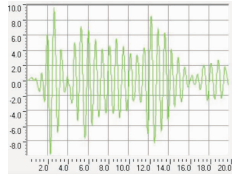
在进行加固之前, 第一自振周期的比值(扭转为主/平动为主): $T_t/T_1 = 0.653/0.697 = 0.937 > 0.9$, 不满足规范要求. 加固后, $T_t/T_1 = 0.602/0.683 = 0.881 < 0.9$, 满足规范要求.

3.2 顶点位移分析

取结构高度处 21.9 m(即屋面板)8 轴与 A 轴交汇处的 736 号节点 Y 向水平位移进行研究, 观测三组地震波作用下的位移时程曲线, 见表 5.

对比加固前后位移时程曲线可知, Taft 波作用下的位移峰值最大: 14.40 mm(加固前)与 13.32 mm(加固后); 兰州波作用下的位移峰值最小: 6.388 mm(加固前)与 5.131 mm(加固后). 后者最大位移峰值变化最大, 幅度约为 19.68%, 满足规范要求.

表 5 加固前后结构 736 节点 Y 向水平位移对比
Tab. 5 Comparison of horizontal displacement between 736 nodes and 736 nodes before and after reinforcement

波	加固前结构	加固后结构
El-centro		
波	Min: -10.39 mmat2.260 s Max: 10.762 mmat2.620 s	Min: -9.867 mmat2.260 s Max: 9.673 mmat2.640 s

3.3 层间位移角分析

加固前后结构在多遇地震作用下的最大层间位移角对比如图 4 所示.

总体来说, 无论在加固前还是加固后, 最大层间位移角在 3F 出现, 在加固了 2F 的受火构件之

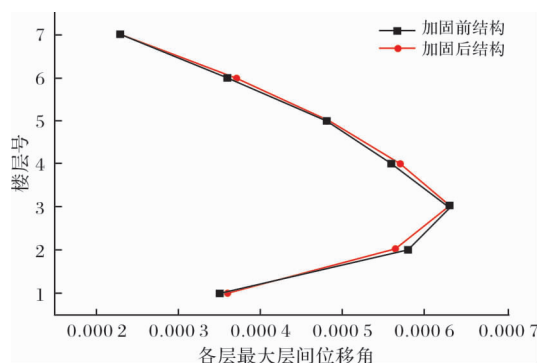


图4 EL-centro波作用下最大层间位移角对比

Fig. 4 Comparison of maximum interlayer displacement angle under El-centro wave action

后, 2F 层间位移角降低的较为明显, 其余楼层无明显变化, 满足规范要求。

4 结论

(1) 火灾后的应急加固是非常规的突发事件, 灾害本身带有强烈的不确定性, 具有极强的危害性和不确定性, 要求决策人员在极短的时间内对多种加固方案中进行快速决断, 本文所建立的火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选模型为该问题的解决提供了新的途径。

(2) 采用信息熵理论对各优选指标的权重进行赋权, 克服了常规方法优选过程主观性较大, 评价过程模糊的问题, 避免了人为导致的主观因素的影响, 使评价结果更加科学。

(3) 采用加权广义马氏距离改进 TOPSIS 方法可以有效解决协方差矩阵不可逆、指标间不同量纲及相关性的问题, 使评价结果更加准确, 将改进后的模型应用于工程实际, 采用 SAP2000 验证了所选方案在承载能力提升方面的有效性, 验证了模型所选方案的可信性, 为应急方案的优选提供了重要的理论依据。

参考文献 References

- [1] 李慧民. 土木工程安全生产与事故案例分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
LI Huimin. Analysis of civil engineering safety production and accident cases[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [2] 孟海, 李慧民. 土木工程安全检测、鉴定、加固修复案例分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
MENG Hai, LI Huimin. Civil engineering safety detection, identification, reinforcement and repair case analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.
- [3] 李家骏. 火灾后 RC 框架结构应急加固方案优选研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.

- LI Jiajun. Optimization research on emergency reinforcement scheme of RC frame structure after fire[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [4] LIE T T, IRWIN R J. Fire resistance of rectangular steel columns Filled with Bar-Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(5):797-805.
- [5] YU B. Fire response of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted FRP reinforcement[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2013, 17(4):517-529.
- [6] 徐志胜, 张威振, 冯凯. CFRP 用于火灾后钢筋混凝土梁抗弯加固的试验研究及有限元分析[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(2):53-57.
XU Zhisheng, ZHANG Weizhen, FENG Kai. Experimental investigation and FEM analysis on the flexural strengthening for RC beams strengthened with CFRP after fire damage[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(2):53-57.
- [7] 刘利先, 时旭东, 过镇海. 增大截面法加固高温损伤钢筋混凝土压弯构件承载力和变形的计算[J]. 工业建筑, 2005(S1):881-885.
LIU Lixian, SHI Xudong, GUO Zhenhai. Calculation of bearing capacity and deformation of reinforced concrete eccentrically compressed members after high temperature strengthened by augmented section[J]. Industrial Construction, 2005(S1):881-885.
- [8] 郑文忠, 陈伟宏, 侯晓萌. 火灾后配筋混凝土梁受力性能试验与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008(12):1861-1867.
ZHENG Wenzhong, CHEN Weihong, HOU Xiaomeng. Experiment and analysis on mechanical properties of reinforced concrete beam after fire[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008(12):1861-1867.
- [9] 刘桂荣. 混凝土剪力墙抗火性能及火灾后抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
LIU Guirong. Experimental study on fire-resistance and post-fire seismic behavior of concrete shear walls [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [10] 梁爱莉, 张倩茜, 袁广林, 等. 混凝土高温后抗压强度的影响因素研究[J]. 煤炭学报, 2010(12):2049-2052.
LIANG Aili, ZHANG Qianqian, YUAN Guanglin, et al. Study on the influencing factors of concrete compressive strength after elevated temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2010(12):2049-2052.
- [11] 张丽娜, 邹祖军. 区域火灾作用后框架结构的抗震性能分析[J]. 结构工程师, 2011(5):135-139.
ZHANG Lina, ZOU Zujun. Seismic performance of RC structures after local fire[J]. Structural Engineers, 2011(5):135-139.

- [12] 王汉迎,杨勇,王艾迪,等. 预应力钢带加固火灾后钢筋混凝土 T 型梁抗剪性能研究[J]. 工业建筑, 2015(3): 22-28.
WANG Hanying, YANG Yong, WANG Aidi, et al. Experimental study of shear resistance of after-fire reinforced concrete T-shaped beam reinforced with prestressed steel strips[J]. Industrial Construction, 2015 (3):22-28.
- [13] 朱欣荣. 扰动状态下起凤山隧道进口左侧边坡失稳应急加固措施研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.
ZHU Xinrong. Study on emergency reinforcement measures of the left side slope at the entrance of Fengshan Tunnel under disturbance state[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [14] 周长东,白晓彬,张艾荣,等. 震后桥梁结构应急加固方案优选[J]. 工程抗震与加固改造, 2011(3):82-87.
ZHOU Changdong, BAI Xiaobin, ZHANG Airong, et al. Emergency strengthening scheme optimization for post-earthquake bridge structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011(3):82-87.
- [15] 晋丽娜. 普通地下室平战功能应急转换加固技术方法研究与评价[D]. 济南:山东大学, 2010.
JIN Lina. Research and evaluation on the technique method of emergency conversion and reinforcement of common basement[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [16] 裴兴旺,李慧民,孟海. 考虑抗火性的工业厂房火灾后结构可靠性评级[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 48-53.
PEI Xingwang, LI Huimin, MENG Hai. Structural reliability rating of industrial building after fire considering fire resistance[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3):48-53.
- [17] 黄文成,帅斌,孙妍,等. 熵-TOPSIS-耦合协调法评价铁路危险品运输系统风险[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2):134-138.
HUANG Wencheng, SHUAI Bin, SUN Yan, et al. Evaluation of risk in railway dangerous goods transportation system by integrated entropy-TOPSIS-coupling coordination method[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2):134-138.
- [18] 邬书良,霍亮,严荣富. 直觉模糊集 TOPSIS 在边坡地震稳定性评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6):145-150.
WU Shuliang, HUO Liang, YAN Rongfu. Application of intuitionistic fuzzy set TOPSIS to evaluation of seismic stability of slopes[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6):145-150.
- [19] 陈欢. 广义马氏距离及其在数据挖掘中的应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2012.
CHEN Huan. Research on generalized Mahalanobis distance and its application in data mining[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [20] 关宏艳,李宗坤,葛巍,等. 基于加权广义马氏距离的 TOPSIS 方法在水库防洪调度决策中的应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(12): 1276-1281.
GUAN Hongyan, LI Zongkun, GE Wei, et al. application of TOPSIS method based on weighted generalized Markov distance in reservoir flood control decision making[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2016, 49(12): 1276-1281.

(编辑 吴海西 沈 波)