

文章编号:1673-9469(2025)04-0009-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.002

## 基于组合赋权-TOPSIS算法的砌体结构 抗震加固优选方法研究

吴平川<sup>1,2</sup>, 祁泽宇<sup>1\*</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省装配式结构工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 基于典型的砌体结构工程案例, 将结构层数和砂浆强度作为控制变量, 运用三种加固方案开展变参数建模计算, 得出变参数模型下楼层的综合抗震能力指数差值及加固费用, 建立砌体结构加固效费比模型。依据所建立的砌体结构加固效费比模型, 综合考虑经济、技术、功能、效果对加固方案的影响, 结合组合赋权-TOPSIS算法, 建立了一套基于效费比的砌体结构抗震加固优选方法。结果表明: 提出的优选方法, 能更有效地融合定量指标与定性指标, 科学、合理地确定最优加固方案。

**关键词:** 砌体结构; 加固效费比; 评价指标; TOPSIS算法; 方案优选

中图分类号: TU352

文献标识码: A

## Research on Seismic Reinforcement Optimization Method for Masonry Structures Based on Combined Assignment-TOPSIS Algorithm

WU Pingchuan<sup>1,2</sup>, QI Zeyu<sup>1\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Technology Innovation Center of Hebei Prefabricated Structure, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** Based on a typical masonry structure project, the number of structural floors and mortar strength are taken as control variables, and three reinforcement schemes are used to perform variable parameter modeling calculations, which results in the difference of comprehensive seismic capacity indices of floors and reinforcement costs of variable parameter models, and establishes a masonry structure reinforcement cost-effectiveness ratio model. According to the established masonry structural reinforcement cost-effectiveness ratio model, considering the economic, technological, functional, and effectiveness impacts of the reinforcement program in an integrated manner, combined with the combined assignment-TOPSIS algorithm, a set of masonry structural seismic reinforcement optimization methods based on cost-effectiveness ratio is established. The results show that the proposed optimization method can better combine quantitative and qualitative indicators to give the optimal reinforcement scheme in a scientific and reasonable way.

**Key words:** masonry structure; reinforcement cost-effectiveness ratio; evaluation index; TOPSIS algorithm; scheme preference

自汶川地震发生以来<sup>[1]</sup>, 该次地震已导致近7万人遇难, 由于砌体结构本身延性和整体性较差, 约35%的砌体房屋震后受损严重, 造成巨大的经济损失。据统计<sup>[2]</sup>, 我国早期建筑中砌体结构形

式已超过70%。近年来, 国家越来越重视可持续发展战略, 如对早期的房屋进行拆除重建, 不仅会对环境造成严重污染, 而且加固费用约为拆除重建所需费用的60%。因此, 本文提出合理的砌体

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2020402079); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2022049)

第一作者: 吴平川(1979—), 男, 河北曲周人, 博士, 教授, 主要从事结构抗震方面的研究。

\* 通信作者: 祁泽宇(1999—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事砌体结构抗震加固工作。

结构加固方案优选方法,为今后设计人员在选择加固方案时提供参考依据。

目前,大部分学者关注于加固方法对抗震能力提升<sup>[3-5]</sup>的研究,仅有少部分学者关注加固方案优选研究。石林<sup>[6]</sup>利用改进的层次分析法,逐步对建筑结构加固方案进行优选;李勤等<sup>[7]</sup>对传统的理想点法进行了改进,解决了规范化难度大及无法比较方案优劣的问题,建立了建筑结构加固方案优选模型;李义广<sup>[8]</sup>利用理想点法对砌体结构加固优选方案进行了研究。郑山锁等<sup>[9]</sup>基于多元线性回归方法,得到一套快速估算费用的砌体结构加固模型。

综上所述,目前仅有部分学者研究砌体结构加固优选方法,且优选方法缺少定量化指标,多依赖于主观工程经验,对实际工程指导应用存在不足。本文提出的加固效费比概念,是一个客观的定量化指标,并在加固效费比模型的基础上,建立了一套砌体结构加固优选新方法;同时分析了层数、砂浆强度对砌体结构加固优选方案的影响。

## 1 砌体加固效费比模型

### 1.1 工程概况

某教学楼为四层砌体结构房屋,建于20世纪70年代,该房屋建筑面积约1 800 m<sup>2</sup>,南北向总宽

为24 m,东西向总长为38.7 m,层高三.6 m,内外墙墙厚分别为240、370 mm;屋盖及楼盖的内、外墙上均设有圈梁,仅在楼梯间四角设置构造柱;1~3层砖的强度推定值为MU10,砂浆的强度推定值为M0.4。抗震设防烈度为7度(0.1 g)。标准层平面如图1所示。

### 1.2 对房屋进行抗震鉴定

根据《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)<sup>[10]</sup>规定,该房屋按后续使用年限为30年的A类建筑进行抗震鉴定。A类房屋的抗震鉴定分为一级鉴定和二级鉴定,当一级抗震鉴定构造措施不满足鉴定要求时,应当进行二级鉴定。

一级鉴定主要包括楼层高度、层数,结构体系,整体性连接构造以及局部易倒塌部位的连接等方面。通过对该房屋进行检测,发现其砂浆强度、层高、圈梁和构造柱的设置不满足规范要求,因此需要进行二级鉴定。

该房屋在多个方面的抗震构造措施均不满足要求,楼层综合抗震能力指数 $\beta_{ci}$ <sup>[10]</sup>能较为全面地反映这些问题,故采用该指数进行二级鉴定,计算公式表示为

$$\beta_{ci} = \psi_1 \psi_2 \beta_i \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_{bi} \xi_{0i} \lambda} \quad (2)$$

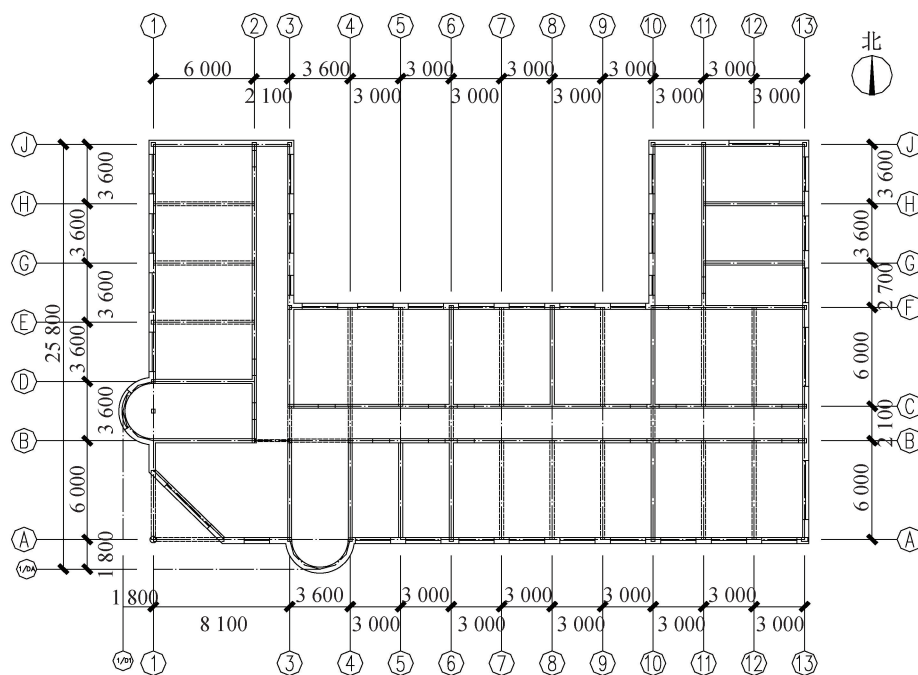


图1 标准层平面图(单位:mm)

Fig. 1 Standard floor plan (unit:mm)

式中:  $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$  为体系、局部影响系数;  $\beta_i$  为楼层平均抗震能力指数;  $A_i$  为墙体在层高为 1/2 处的总净截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_{bi}$  为建筑平面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\xi_{0i}$  为墙体基准面积率;  $\lambda$  为烈度影响系数。

### 1.3 砌体结构加固方法介绍

砌体结构有如下加固方法:(1)钢筋网水泥砂浆面层加固是在墙体两侧铺设钢筋网片并抹水泥砂浆进行养护,该方法加固成本低,但是加固后抗震承载能力提升幅度不大;(2)水泥砂浆与钢筋混凝土板墙加固原理类似,该方法能够大幅提高墙体抗震承载力,但造价较高,施工工期较长,并会较大程度减少结构的使用面积;(3)钢绞线网-聚合物砂浆面层加固是将钢绞线网片锚固于墙体两侧,对墙面进行清理后再抹聚合物砂浆并养护,该方法成本高,加固后构件抗震承载力有一定程度的提升。

因为砌体结构的水泥砂浆面层及板墙加固方法应用较为广泛<sup>[11-12]</sup>,故本文针对双面钢筋网水泥砂浆面层加固、双面钢筋混凝土板墙加固和双面钢绞线网-聚合物砂浆面层加固三种加固方法进行了对比优选研究。

### 1.4 加固前后抗震能力提升计算

A 类房屋建造年代久远且多数抗震构造措施

不满足要求,震后损害较为严重,故以此工程为算例背景,建立变参数的砌体结构模型。

对于变参数的选取,应有针对性选取关键性因素作为控制变量,本文选取 1~4 层(选取标准层建模)、砂浆强度(M0.4、M1.0、M2.5)作为控制变量。为了简化计算,本文采用全楼加固的方式。假设加固后的楼层综合抗震能力指数<sup>[13]</sup>为  $\beta_{si}$ ,则抗震能力提升指数  $\beta$  按式(3)计算:

$$\beta = \beta_{si} - \beta_{ci} \quad (3)$$

$$\beta_{si} = \eta_{pi} \varphi_1 \varphi_2 \beta_{ci} \quad (4)$$

式中:  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  为加固后的体系、局部影响系数;  $\eta_{pi}$  为加固增强系数;  $\beta_{ci}$  为加固前楼层综合抗震能力指数。

该变参数模型共有 36 种不同的加固方案,以三层砌体结构为例,计算出纵向抗震能力提升指数,结果见图 2。

计算结果表明:三种加固方法加固前后,纵向楼层综合抗震能力指数均大于 1.0,满足标准<sup>[10]</sup>要求;板墙的加固效果明显优于其余两种加固方案,仅在砂浆强度为 M0.4 时略微低于其余两种方案,这是因为砂浆强度为 M0.4 时,其他两种方案的加固增强系数较大,使得加固效果明显。

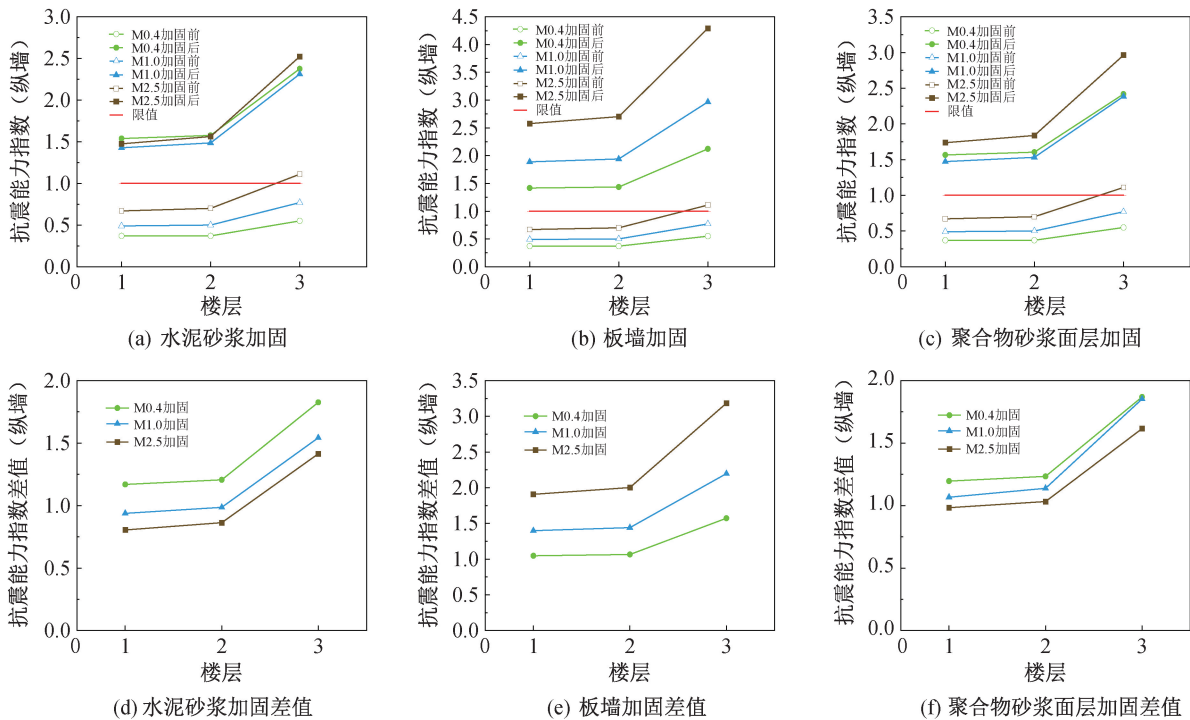


图 2 抗震能力提升计算(纵墙)

Fig. 2 Seismic capacity enhancement calculation (longitudinal wall)

### 1.5 加固费用计算

三种方案的加固费用采用工程量乘以单价的方式进行计算。加固的综合单价根据《房屋建筑维修与加固工程》<sup>[14]</sup>进行确定,综合单价包括人工费、材料费、机械费等,能较为综合地反映不同加固工程的普遍费用,如表1所示。

表1 加固综合单价

Tab.1 Consolidated unit price for reinforcement

加固方法	钢筋配置	单价/ (元·m <sup>-2</sup> )	工程 量/m <sup>2</sup>
水泥砂浆面层 (双面70mm厚)	HPB235	320	10
板墙 (双面120mm厚)	HPB235	6 610	10
聚合物砂浆面层 (双面70mm厚)	6×7+1WS 金属 股芯钢绞线	1 380	10

### 1.6 效费比模型

基于典型的工程实例,设计了大量的变参数模型,根据对这些变参数模型楼层综合抗震能力指数差值及加固费用的计算,建立了考虑楼层层数、砂浆强度的砌体结构加固效费比模型。砌体结构加固效费比模型按式(5)计算:

$$R = \frac{\beta}{C} = \frac{\beta_{si} - \beta_{ci}}{C} \quad (5)$$

式中:R为加固效费比;β为抗震能力指数差值;C为加固费用,元。

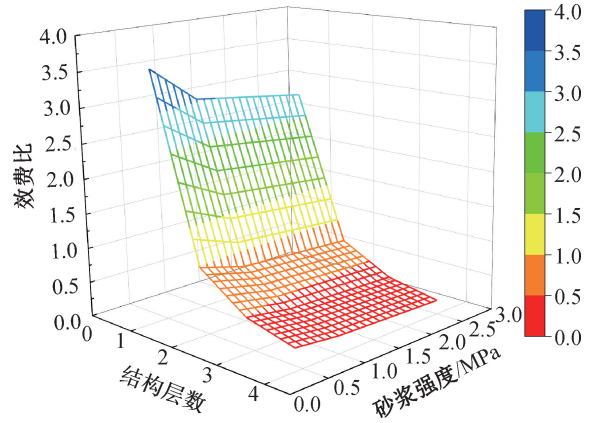
计算出三种加固方案在结构层数(1~4层)、砂浆强度(M0.4、M1.0、M2.5)变化时的抗震能力指数差值和加固费用,再根据式(5)求出相应情况下的加固效费比;并通过线性插值的方式,求出三种加固方案在结构层数(1~4层)、砂浆强度(M0.4~M2.5)变化时的加固效费比,建立加固效费比模型,见图3。

计算结果表明:三种加固方案的效费比受结构层数的影响较大,受砂浆强度影响相对较小;且均在1层结构时具有最大的效费比。水泥砂浆面层和聚合物砂浆面层加固效费比呈现出相似的变化规律。聚合物砂浆面层加固具有最低的效费比,这是因为其提升抗震能力的效果较差且综合单价较高。

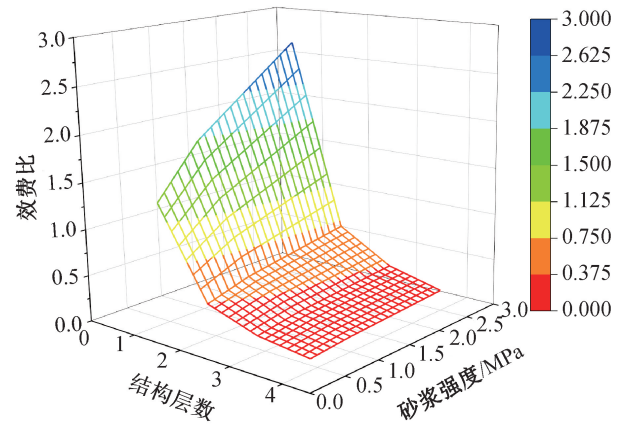
## 2 组合赋权-TOPSIS 优选算法

### 2.1 评级指标的权重

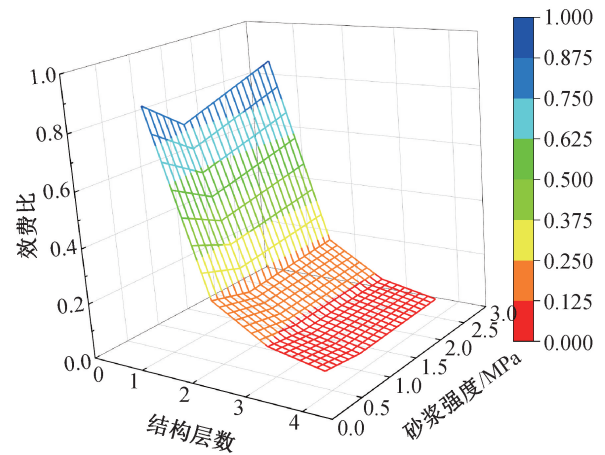
将主观法和客观法相结合,采用层次分析法



(a) 水泥砂浆加固



(b) 板墙加固



(c) 聚合物砂浆面层加固

图3 加固效费比模型

Fig.3 Reinforcement efficiency cost ratio model

(Analytic Hierarchy Process, AHP)和熵值法进行组合赋权<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.1 AHP

AHP是指将评价指标拆分成多种层次的决策方法。具体计算步骤如下:

(1)建立各层指标的判断矩阵

采用1—9标度法建立各层指标的判断矩阵。

(2) 确定各层指标的相对权重

$$\bar{\omega}'_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{k=1}^n \alpha_{kj}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中:  $\bar{\omega}'_i$  为最大特征值对应的特征向量;  $\alpha_{ij}$  为指标各自所占的权重。

判断矩阵的一致性检验计算公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(B\omega)_i}{\omega_i} \quad (9)$$

(3) 确定各层指标的组权权重

$$\omega'_i = \sum_{i=1}^m b_i c_{mi} \quad (10)$$

### 2.1.2 熵值法赋权

熵值法通过差异系数来判断指标的离散程度,具体计算步骤如下:

(1) 熵值  $e_i$  的计算公式如下:

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (11)$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (12)$$

式中:  $e_i$  为第  $i$  个指标的熵值;  $f_{ij}$  第  $j$  个方案第  $i$  个指标的特征比重;  $x_{ij}$  为第  $j$  个方案第  $i$  个指标的表现数值。

(2) 指标权重的计算:

$$\omega''_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{i=1}^m e_i} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega''_i = 1 \quad (14)$$

### 2.1.3 组合赋权

本文根据层次分析法得出的主观权重  $\bar{\omega}'_i$  和熵值法求出的客观权重  $\omega''_i$ , 采用乘法合成的方式求得组合权重。组合权重的计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}'_i \cdot \omega''_i}{\sum_{i=1}^m \bar{\omega}'_i \cdot \omega''_i} \quad (15)$$

## 2.2 TOPSIS 算法

TOPSIS 算法具体计算步骤<sup>[16]</sup>如下:

(1) 构造决策矩阵

设有  $m$  个加固方案,  $n$  个评价指标, 构造决策矩阵  $A$ :

$$A = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $a_{ij}$  为第  $i$  个方案的第  $j$  个指标。

(2) 将决策矩阵规范化

由于定量指标数值量纲的不一致性, 因此需要对其进行相应的归一化处理。

成本型指标, 归一化公式如下:

$$z_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (17)$$

效益型指标, 归一化公式如下:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (18)$$

规范化后的决策矩阵  $Z$ :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

(3) 确定加权后的决策矩阵

决策矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,  $x_{ij} = \omega_j \times z_{ij}$ , 其中  $\omega_j$  为第  $j$  个指标的组权权重。加权后的决策矩阵:

$$Z = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} \omega_1 z_{11} & \omega_2 z_{12} & \cdots & \omega_n z_{1n} \\ \omega_1 z_{21} & \omega_2 z_{22} & \cdots & \omega_n z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1 z_{m1} & \omega_2 z_{m2} & \cdots & \omega_n z_{mn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

(4) 确定最优指标和最劣指标

确定各项指标的“理想解”和“负理想解”:

$$Z^+ = (\max\{x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}\}, \max\{x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2}\}, \dots, \max\{x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn}\}) \quad (21)$$

$$Z^- = (\min\{x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}\}, \min\{x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2}\}, \dots, \min\{x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn}\}) \quad (22)$$

(5) 计算各评价指标到最优指标的距离

方案  $A_i$  到“理想解”的距离:

$$s_1^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - z_j^+)^2} \quad (23)$$

方案  $A_i$  到“负理想解”的距离:

$$s_1^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - z_j^-)^2} \quad (24)$$

(6)计算各方案的贴近度

方案  $A_i$  到“理想解”的贴近程度:

$$c_i^* = \frac{s_1^-}{s_1^+ + s_1^-} \quad (25)$$

计算出多种方案的贴近系数  $c_i^*$ , 并对其进行排序, 贴近系数  $c_i^*$  最大的为最优加固方案。

### 2.3 基于效费比的砌体加固优选方法

根据建立的加固效费比模型, 结合组合赋权-TOPSIS 算法, 建立砌体结构加固方案优选方法, 具体操作流程见图 4。

### 3 基于 TOPSIS 进行方案优选

本文以该工程(结构层数为 4 层、砂浆强度为 M0.4)为例, 对砌体结构加固方案进行优选, 各项指标的权重系数如下:

$$\omega = [0.662\ 9 \quad 0.258\ 1 \quad 0.026\ 5 \quad 0.000\ 7 \\ 0.001\ 9 \quad 0.003\ 8 \quad 0.000\ 1 \quad 0.004\ 0 \\ 0.004\ 3 \quad 0.010\ 8 \quad 0.021\ 5 \quad 0.005\ 4]$$

根据式(19)确定砌体结构加固方案的规范化决策矩阵, 进一步求出正理想解  $Z^+$  和负理想解  $Z^-$ :

$$Z^+ = [0.662\ 9 \quad 0.258\ 1 \quad 0.021\ 2 \quad 0.000\ 7 \\ 0.001\ 0 \quad 0.002\ 5 \quad 0.000\ 1 \quad 0.002\ 6 \\ 0.003\ 4 \quad 0.010\ 3 \quad 0.017\ 2 \quad 0.482\ 1] \\ Z^- = [0.000\ 0 \quad 0.000\ 0 \quad 0.005\ 3 \quad 0.000\ 4 \\ 0.000\ 4 \quad 0.001\ 3 \quad 0.000\ 1 \quad 0.001\ 4 \\ 0.001\ 5 \quad 0.007\ 0 \quad 0.267\ 4 \quad 0.002\ 7]$$

计算方案评价指标到“正理想解”和“负理想解”的距离:

$$s_1^+ = (0.509\ 3 \quad 0.729\ 9 \quad 0.857\ 6) \\ s_1^- = (0.713\ 9 \quad 0.380\ 5 \quad 0.259\ 9)$$

得出三种加固方案的贴近度:

$$c_i^* = (0.583\ 6 \quad 0.342\ 6 \quad 0.232\ 6)$$

通过计算贴近度进行对比分析, 可知该砌体结构的加固方案选择顺序为: 水泥砂浆面层 > 板墙 > 聚合物砂浆面层, 可知该工程选用水泥砂浆面层进行加固为宜。

### 4 结论

1) 三种加固方案的效费比受结构层数的影响相对较大, 受砂浆强度的影响相对较小, 且三种方案均在 1 层结构具有最大的效费比; 水泥砂浆面层和板墙加固的效费比变化规律相似; 聚合物砂浆

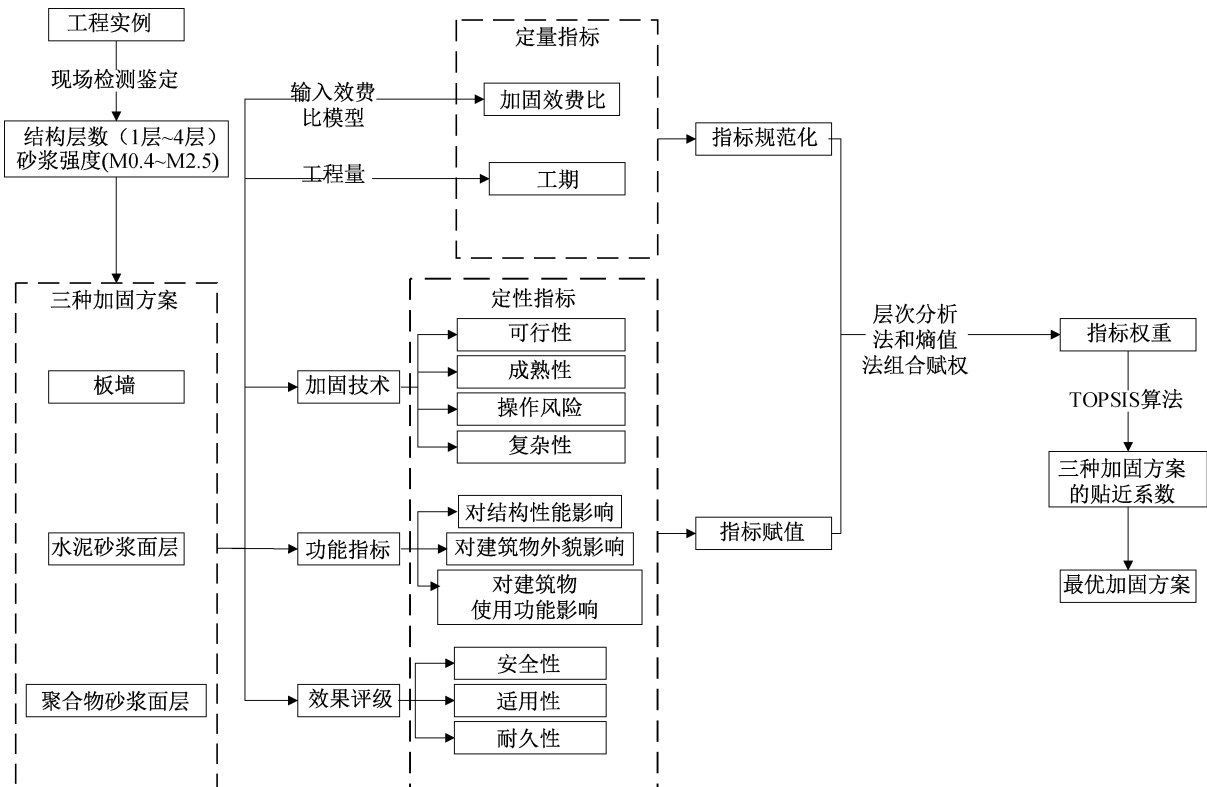


图 4 操作流程  
Fig. 4 Operation flow

面层加固的效费比最低。

2) 基于加固效费比模型, 构建了涵盖经济、技术、功能、效果4个维度的二级评价指标体系, 为砌体结构加固方案优选提供了研究基础。

3) 结合组合赋权-TOPSIS建立了基于加固效费比的砌体抗震结构加固优选方法, 并给出具体操作流程, 为今后设计人员选择加固方案时提供了便利。通过引入效费比这一定量指标, 减少了主观因素对加固方案优选的影响。采用组合赋权的方法, 将主观因素和客观因素相结合, 确保了指标权重的准确性。

### 参考文献:

- [1] 叶列平, 陆新征. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 36(4): 1-9.  
YE L P, LU X Z. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 36(4): 1-9.
- [2] 李昶. 既有砌体建筑调查分析与加固改造策略研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.  
LI C. Investigation analysis and maintenance strategy of existing masonry buildings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.
- [3] 王露. 高延性混凝土加固砌体结构振动台试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.  
WANG L. Shaking table experimental study on high ductility concrete reinforced masonry structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [4] MICHEL C, KARBASSI A, LESTUZZI P. Evaluation of the seismic retrofitting of an unreinforced masonry building using numerical modeling and ambient vibration measurements[J]. Engineering Structures, 2018, 158:124-135.
- [5] AKHTAR G, BASHIR A, ULLAH I K, et al. Improving seismic capacity of dry stacked interlocking masonry structure through confinement at corners[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 24(2):546-165.
- [6] 石林. 基于改进的层次分析法的建筑结构加固方案优选[D]. 济南: 山东大学, 2009.  
SHI L. Optimization of reinforcement plans for architectural structures based on improved analytical hierarchy process [D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [7] 李勤, 盛金喜, 田飞. 基于改进理想点法的建筑结构加固方案优选[J]. 工业建筑, 2016, 46(8): 155-157.  
LI Q, SHENG J X, TIAN F. Optimization of building structure reinforcement schemes based on improved topsis method [J]. Industrial Construction, 2016, 46(8): 155-157.
- [8] 李义广. 既有砌体结构抗震加固方案优选及其效果评价[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.  
LI Y G. The seismic reinforcement scheme optimization and effect evaluation of existing masonry structure [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [9] 郑山锁, 丁明松, 郑捷, 等. 基于多元线性回归方法的砌体结构加固费用估算模型研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 6-13.  
ZHENG S S, DING M S, ZHENG J, et al. A retrofit cost estimation model of masonry structures based on the multiple linear regression method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 6-13.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震鉴定标准: GB 50023—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic appraisal of buildings: GB 50023—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [11] 吴碧野. 钢筋网砂浆面层加固在役和震损砌体结构抗震性能数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.  
WU B Y. Numerical simulation on seismic performance of inservice and damaged masonry structures retrofitted by external steel-meshed mortar layer [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022.
- [12] 李周阳. 钢板加固砖砌体墙的抗震性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.  
LI Z Y. Study on seismic performance of brick masonry wall strengthened with steel plate [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震加固技术规程: JGJ 116—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for seismic strengthening of buildings: JGJ 116—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [14] 四川省建设工程造价管理总站. 四川省建设工程工程量清单计价定额—房屋建筑维修与加固工程 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
Sichuan Provincial Construction Engineering Cost Management General Station. Sichuan provincial construction project bill of quantities pricing quota—building maintenance and strengthening works [M]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [15] 赵丹. 基于组合赋权-TOPSIS模型的桥梁加固方案优选[J]. 交通运输研究, 2015, 1(4): 95-100.  
ZHAO D. Scheme optimization of bridge reinforcement based on combination weighting-TOPSIS model [J]. Transport Research, 2015, 1(4): 95-100.
- [16] HAEKEUM P, KIBUM K, JINSEOK H, et al. Decision-making for the hazard ranking of water distribution networks using the TOPSIS method [J]. Water Supply, 2023, 23(2): 715-726.

(责任编辑 周雪梅)