

吴平川,杨壮,齐虎,等. 2024. 基于组合赋权法与 TOPSIS 法的砌体结构加固方案优选[J]. 地震研究, 47(1): 146–155, doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0036.

Wu P C, Yang Z, Qi H, et al. 2024. Optimization of masonry structure reinforcement scheme based on the combination weighting and TOPSIS methods[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 146–155, doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0036.

基于组合赋权法与 TOPSIS 法的砌体结构加固方案优选*

吴平川^{1,2}, 杨 壮^{1*}, 齐 虎³, 袁世茂¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省装配式结构技术创新中心, 河北 邯郸 056000;

3. 国质(北京)建设工程检测鉴定中心, 北京 100835)

摘要: 砌体加固方案优选方法对实际工程遴选方案具有重要意义。为此建立了组合赋权法与 TOPSIS 法相结合的砌体结构加固方案优选方法, 引入加固效费比模型, 以效费比值为定量指标, 以施工工期、施工技术、效果、整体效应 4 个因素作为定性指标, 建立砌体结构抗震加固优选方案指标体系。以某教学楼为例, 运用 G1–COWA 组合赋权法与 TOPSIS 法, 求出该结构最佳加固方案为板墙加固方案。结果表明: 所提出的优选方法具有一定的实用性和有效性, 也适用于一般砌体加固改造工程; 优选方法能根据既有结构的基本信息, 科学便捷地决策出最佳方案, 为砌体结构的加固设计实施提供更科学的技术支撑。

关键词: 砌体结构; 加固效费比; 组合赋权; TOPSIS 法; 方案优选

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2024)01–0146–10

doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0036

0 引言

强震的频繁发生, 常导致大量建筑物破坏, 砌体结构的损伤尤其严重。我国大多数砌体结构建筑的建造时间久远, 砌块及砂浆强度会随着时间衰减, 导致结构的安全性、整体性降低, 在地震中易受损, 严重威胁人民的生命财产安全(张桂欣, 孙柏涛, 2018; 陆新征等, 2019; 李昶, 2019)。因此, 砌体结构的抗震加固改造显得格外重要, 而构建针对砌体结构加固方案的优选方法, 选出合理的加固方案对房屋加固改造、震后修缮具有一定的指导意义。

目前, 我国对砌体结构加固改造有着深入的研究, 但多数研究着重于用于提升结构抗震能力的新加固方法(邓明科等, 2020; 王亭等, 2012; 吴乐乐等, 2023; 吴繁超等, 2023), 仅

少数学者研究砌体结构加固方案的优选, 如王永等(2020)采用层次分析法和熵值法组合的方式求解指标权重, 并结合 TOPSIS 法, 构建了既有砌体结构抗震加固方案优选模型; 杨新华等(2019)以 AHP 为理论依据, 将定性分析转为定量计算, 对砌体宿舍楼抗震加固改造方案进行分析决策; 李慧民等(2020)对 TOPSIS 法进行改进, 并构建了既有建筑抗震加固方案的优选模型; 符浩彬(2022)将公理化设计理论中的信息公理与模糊数学理论相结合, 构建了基于 Vague 集信息量的多属性决策方法, 可对震后砌体结构构造柱加固方案进行评价优选。

多数学者从定性指标的角度来分析研究砌体加固方法, 而缺乏对定量指标的深入探索, 而且在优选过程中, 过于依赖主观工程经验。本文将主观赋权法与客观赋权法相结合, 既能避免由于决策者认知不同所造成的偏差, 又能克服缺乏经

* 收稿日期: 2023–04–27.

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2022049); 水库底泥固化及矿井填充工艺性能研究(E2020402079).

第一作者简介: 吴平川(1979–), 教授, 博士, 主要从事结构抗震方面的研究. E-mail: wpch2006@126.com.

✉ 通信作者简介: 杨 壮(1999–), 硕士研究生在读, 主要从事砌体结构抗震加固研究. E-mail: yz19953684846@163.com.

验指导的缺陷；同时借鉴了加固效费比概念，建立加固效费比模型（吴小宾等，2022），以效费比值为定量指标，结合其它定性指标，选择组合赋权法与 TOPSIS 法结合的方式，选出砌体结构的最佳加固方案。

1 加固效费比模型

1.1 选用加固方法介绍

板墙加固法属于复合截面加固法。其原理是通过在原墙体上铺设钢筋和混凝土面层，以实现增大结构受压和受剪能力。该方法抗震性和耐久性好，但施工不便，且用钢量较大（王坚，2022）。

高延性混凝土面层加固法。其工作原理是在原砌体结构上铺设高延性混凝土面层，与之形成整体，以此来增加它们的抗拉、抗裂、耐久等性能。高延性混凝土面层加固后的砖砌体，开裂荷载、极限荷载及整体性能都得到较大的提高，抗压承载力提高约 1.5 ~ 3.5 倍。

钢筋网水泥砂浆面层加固法。其工作原理是在原墙面铺设一定厚度含有钢筋的水泥砂浆，使其成为组合墙体，共同作用。砂浆面层可采用人工涂抹法和喷射法（徐天航等，2016）。

1.2 背景工程算例

本文以某教学楼为背景工程算例，建立砌体结构加固效费比模型。该背景工程算例的结构现状及标准层平面如图 1 所示。该结构为 4 层砌体结构房屋，位于河北省高碑店市，抗震设防烈度为 VII 度（ $PGA = 0.15 \text{ g}$ ），抗震设防分类为丙类，场地类别为 II 类。该结构平面呈 L 型，具有一定的代表性。

据现场检测报告，建筑东西长 53.30 m，南北宽 16.40 m，结构高度为 14.40 m，层高为 3.60 m；最大横墙间距为 13.90 m；内、外墙墙厚分别为 240、370 mm；采用烧结砖和砂浆砌筑。1~4 层砖强度等级推定值满足设计 MU10 的要求，砂浆强度推定值为 1.1 MPa。

该建筑建于 20 世纪 70 年代，根据《建筑抗震鉴定标准》（GB 50023—2009）（简称“鉴定标准”）规定，属于 A 类建筑。在鉴定过程中，分 2 级进行抗震鉴定，即第一级抗震鉴定和第二级抗震鉴定。根据该工程检测鉴定报告可知，在第一级抗震鉴定中多项措施不满足规范要求，故需要对其进行第二级抗震鉴定。经建模计算，由鉴定结果可知，该建筑 1~4 层综合抗震能力指数不满足鉴定标准要求，应当采取整体抗震加固措施。

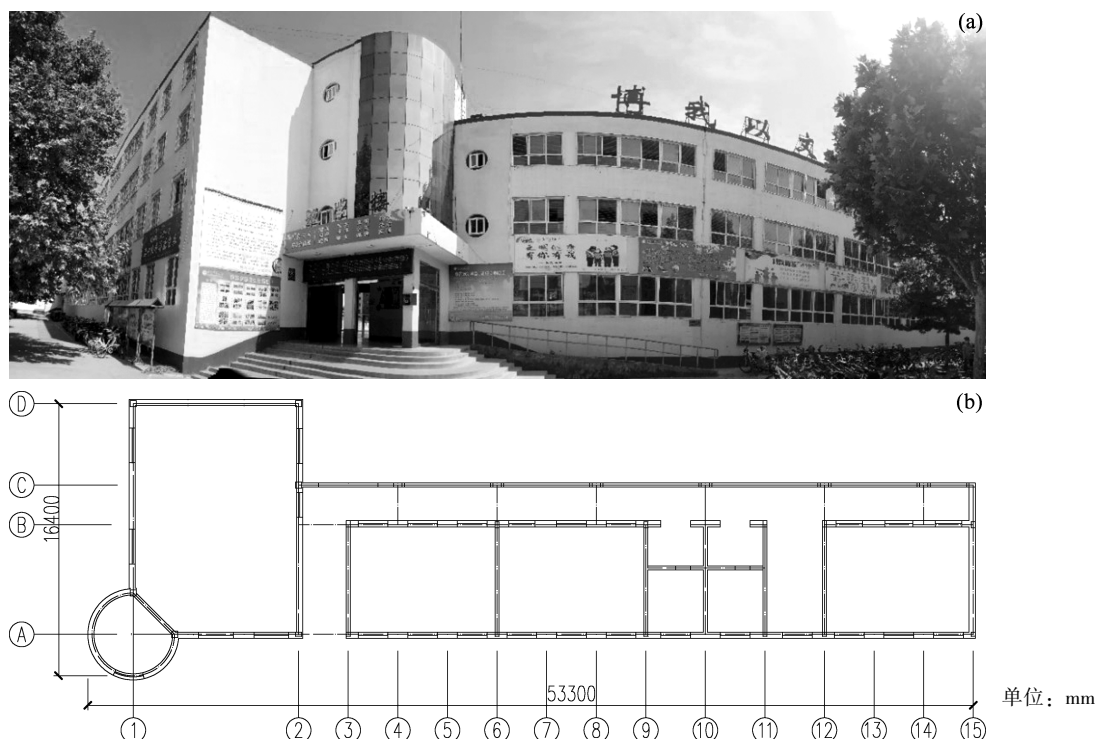


图 1 某教学楼的背景工程图 (a) 及其标准层平面布置图 (b)

Fig. 1 A school building (a) and the layout of the building's standard floor (b)

1.3 抗震鉴定

本文采用盈建科结构设计软件进行二级抗震鉴定验算。以楼层综合抗震能力指数作为砌体结构加固后抗震能力是否提升的评判指标,该指数综合考虑了多种因素,如材料强度、结构体系、结构的整体性和易损性等,计算科学合理,较为贴合实际工程。砌体结构楼层综合抗震能力指数 β_{ci} 表示为:

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

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

式中: ψ_1 为体系影响系数; ψ_2 为局部影响系数; β_i 为第*i*层横向或纵向墙体平均抗震能力指数;

A_{bi} 为第*i*层的建筑平面面积; A_i 为第*i*层对应横向或纵向抗震墙在层高1/2处的总净截面积; ξ_{0i} 为第*i*层的基准面积率; λ 为烈度影响系数。

1.4 变参数模型计算

针对选定的背景工程结构进行变参数建模计算,分别针对水泥砂浆面层加固、板墙加固、高延性砼面层加固3种方案进行分析,研究这3种方案下工程结构的抗震加固效果。选定砂浆强度和楼层数作为变量,砂浆强度分别假定为M0.4、M1.0和M2.5,楼层数分别选定1~4层。

根据鉴定标准要求,本文以楼层综合抗震能力指数1.0为限值,若建筑物的二级抗震鉴定计算结果大于1.0,则表示抗震验算通过。变参数模型计算流程如图2所示。

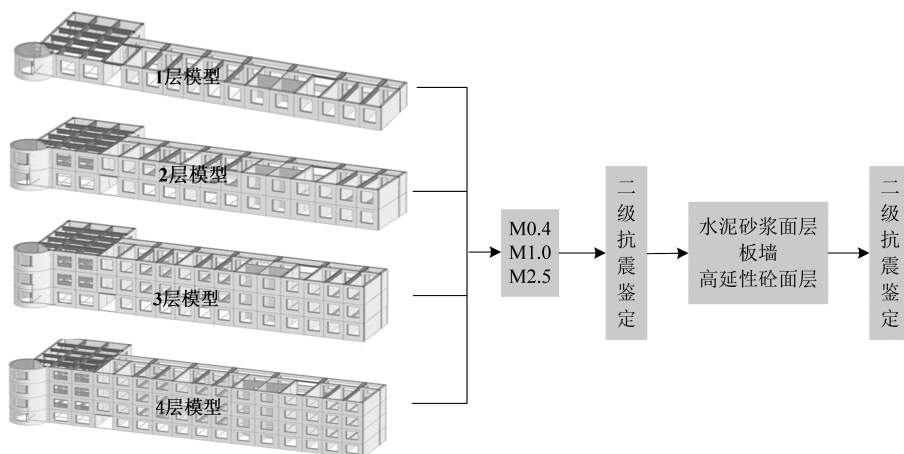


图2 变参数模型计算流程

Fig. 2 Flow chart of the variable-parameter model calculation

加固费用综合单价参考《四川省维修与加固工程定额》(四川省建设工程造价管理总站,2015),见表1。

表1 加固项目费用清单

Tab. 1 List of the expenses of the reinforcement items

项目编号	工程量	单价/元
HC0124 砌体加固/水泥砂浆加固(35 mm厚)	10 m ²	323
HC0113 墙加固/砖墙面包混凝土/中砂 C25	10 m ³	6 618
HDC 墙加固(15 mm厚)	10 m ²	825

1.5 加固效费比模型

通过典型工程算例,进行大量变参数模型计算。分析在不同楼层数下的砌体结构使用不同加

固方案的抗震性能,同时估算出不同工况下的加固费用,对数据进行归一化处理,建立考虑多因素下的砌体结构加固效费比模型。砌体结构加固效费比公式如下:

$$M = (\beta - \beta_0) / (C_0 + \lambda) \quad (3)$$

式中: M 为砌体结构加固效费比; β 为加固后楼层综合抗震能力指数; β_0 为加固前楼层综合抗震能力指数; C_0 为震损砌体压力注浆修复费用; λ 为加固费用。

一般砌体结构加固方案优选,参考效费比结果进行插值选用:

$$Z = F(P_1, P_2, P_3) \quad (4)$$

式中: P_1 为砌体结构层数(1~4层); P_2 为既有

结构材料强度； P_3 为不同加固方案（水泥砂浆面层、板墙、高延性砼面层加固）。应用于实际工程

时，既有结构材料强度由现场检测鉴定得到。砌体结构加固效费比建模路线如图 3 所示。

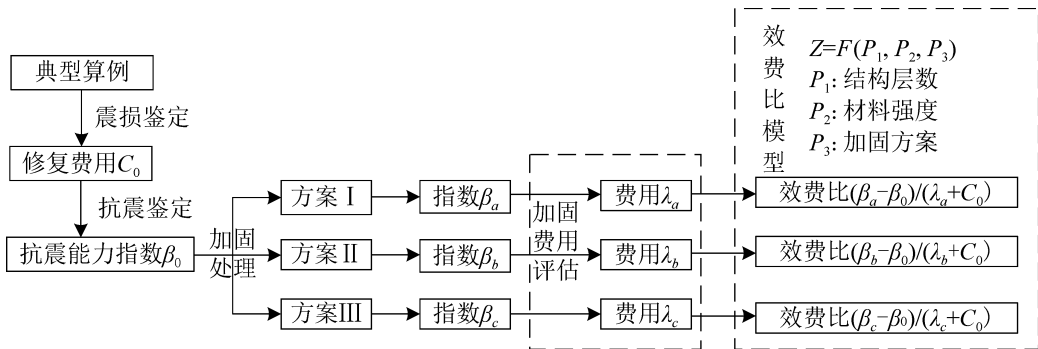


图 3 砌体结构加固效费比建模路线

Fig. 3 Roadmap of the reinforcement cost-effectiveness ratio modelling of the masonry structure

根据 1 ~ 4 层模型、M0.4 ~ M2.5 以及 3 种加固方案等参数，总计得出 36 个加固方案。基于工程量乘以单价的方法计算出每种工况的加固费用。由于实际结构没有出现震损，无法进行震损鉴定，故本文修复费用定为 0。计算出各种工况效费比值后，通过线性插值，最后建立效费比模型。以选定的背景工程为例，将检测砌体强度，代入 3 种加固方案效费比模型中得到对应值，此数值可作为后续优选方案里的定量指标。砌体结构效费比三维曲线如图 4 所示。

2 评价指标

2.1 评价指标确定

砌体结构最优加固方案须具有加固费用低、效果明显、技术可行、施工简便等特点。基于这个目标，结合砌体加固的技术要求和特点，找出影响方案选定的因素。为此，需确定出该评价体系中的各项指标。

经查阅大量文献和实际加固工程范例，本文选择效费比、工期、施工技术、效果和整体效应 5 个指标建立砌体结构抗震加固优选方案的指标体系（王晶，2016）。综合考虑加固方案的多种影响因素，确立 5 个一级评价指标，建立评价指标体系，见表 2。

2.2 指标值归一化处理

砌体加固方案优选影响因素很多，涉及的评价指标也很多，其中包含多个定性指标与定量指标。

表 2 评价指标体系

Tab. 2 System of the evaluation indexes

一级评价指标	二级评价指标
效费比 A_1	裂缝修复费用 B_{11}
	直接加固费用 B_{12}
工期 A_2	施工工期 B_{21}
施工技术 A_3	加固技术可行性 B_{31}
	施工工艺复杂性 B_{32}
	加固技术成熟性 B_{33}
效果 A_4	满足安全性要求 B_{41}
	满足适用性要求 B_{42}
	满足耐久性要求 B_{43}
整体效应 A_5	加固后对结构整体的影响 B_{51}
	加固后对建筑物原貌的影响 B_{52}
	加固墙体与原构件协调工作的能力 B_{53}

由于各项指标量纲有所不同，所以需要对各指标去量纲化，以此消除量纲因素带来的不公平性，这对方案优选至关重要。

(1) 定量指标处理

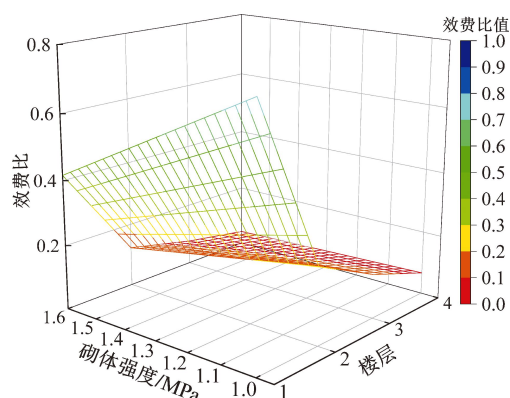
定量指标是指可以用数值表示的、并直接用来作为方案优选的评价指标。对于砌体结构而言，可采用加固效费比模型输出值作为本文的定量指标。

(2) 定性指标处理

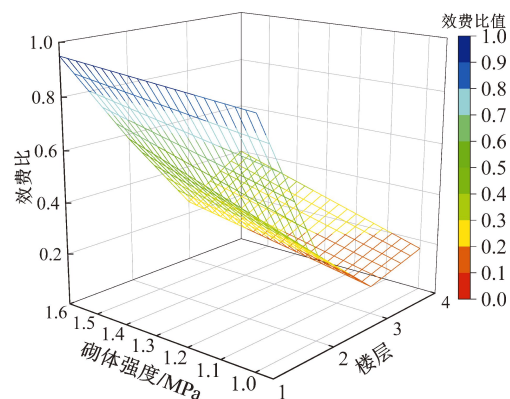
定性指标是指在评价体系中某些指标只能用来定性估计和评判。针对定性指标的处理，采用去量纲化方法，使得所有指标均能赋予一个特定

的值。这样就可以与其它定量指标共同参选方案,使评定结果更为客观公正。

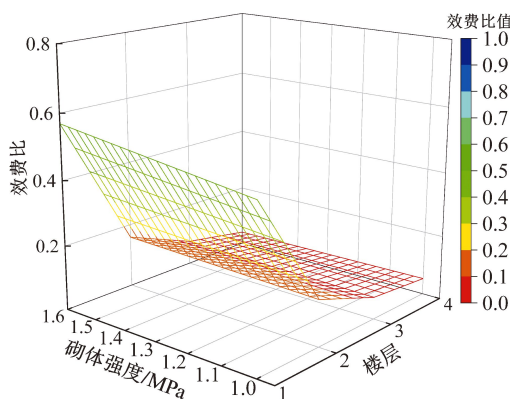
参考王永等(2020)提出的七级因素评价集,即 $D = \{\text{很差, 差, 较差, 中, 较好, 好, 很好}\}$, 指标赋值范围为 $0 \sim 1$, 对其进行赋值得到 $D = \{0.05, 0.20, 0.35, 0.50, 0.65, 0.80, 0.95\}$ 。为了能直接比较各项指标, 对各项指标进行归一化处理, 对比之后再选出最优抗震加固方案。



(a) 水泥砂浆面层加固



(b) 板墙加固



(c) 高延性砼面层加固

图4 砌体结构效费比模型

Fig. 4 Cost-effectiveness ratio model of the masonry structure

3 G1 - COWA 组合赋权法

3.1 常见赋权法

确定指标权重的方法有主观赋权法、客观赋权法、主客观赋权法。主观赋权法比较依赖于决策者自身的经验判断, 有较强的个人主观性, 缺乏科学性。G1法(杨笛等, 2022)作为一种主观赋权法, 它基于改良的 AHP 法克服了因指标过多导致难以通过一致性检验的困难, 而且无需构造矩阵, 减低了繁杂的计算工作。客观赋权法比较依赖于数据的内在规律, 虽然可以规避主观意识的影响, 但得出的结果易偏离实际。COWA 法(李忠富等, 2021)是一种客观赋权法, 它通过对评价价值重新排序, 削弱极端值对权重的影响。因此, 本文采用 G1 - COWA 组合赋权法, 既能体现出决策者的主观性, 又可以避免赋权的极端性, 使决策者的评价更加合理。

3.2 G1 - COWA 组合赋权法

(1) G1 赋权法

①对同层级指标排序。首先建立评价指标集, 假设评价指标集为 $\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$, 然后请本领域的专家给出指标集中所有指标的重要性排序。

②确定指标重要程度 r_i 。 r_i 值表示第 $i-1$ 个指标与第 i 个指标的重要程度之比。根据 r_i 赋值参考表对各项指标进行量化。其公式为:

$$r_i = \omega_{i-1} / \omega_i \quad (i = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2) \quad (5)$$

式中: ω_i 为评价指标 x_i 的权重; ω_{i-1} 为评价指标 x_{i-1} 的权重。当 r_i 取值为 1.0 时, 表明指标 x_{i-1} 和指标 x_i 的重要性程度一致, r_i 取值越大表示指标 x_{i-1} 相对指标 x_i 更为重要。

③计算相应指标权重 ω_i 。根据上述步骤, 分别对一级、二级指标进行单一指标权重系数计算, 计算公式如下:

$$\omega_i = (1 + \sum_{i=2}^n \prod_{k=1}^n r_k)^{-1} \quad (6)$$

$$\omega_{i-1} = \omega_i r_i \quad (i = n, n-1, \dots, 2, 1) \quad (7)$$

(2) COWA 赋权法

①对决策数据进行降序排列和编号。假设评

价指标 N_i 的决策数据为 $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ ，对其进行降序排列并编号，得到 $b_0 \geq b_1 \geq b_j \geq \dots \geq b_{n-1}$ ，即 $(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$ 。

②计算数据 b_j 的加权向量 ω_{j+1} 为：

$$\omega_{j+1} = C_{n-1}^j / 2^{n-1} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (8)$$

式中： C_{n-1}^j 为在 $n-1$ 个数据中取出 j 个数据的组合数值。

③计算指标绝对权重 $\bar{\omega}_i$ 。根据加权向量 ω_{j+1} 对决策数据 $(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$ 进行加权集结，计算出 N_i 指标的绝对权重值 $\bar{\omega}_i$ 为：

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j b_j \quad (\omega_j \in [0, 1], j \in [1, n]) \quad (9)$$

④计算 N_i 指标的相对权重 ω_i 为：

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

(3) 组合赋权法

为确保各项指标评价结果的科学有效，采用 G1 法与 COWA 算子相结合进行线性加权耦合，计算步骤如下：

$$T_i = \xi_1 \omega'_a + \xi_2 \omega''_a \quad (11)$$

式中： T_i 为组合赋权最终得到的权重； ω'_a 为 G1 法计算得到的指标权重； ω''_a 为 COWA 法计算得到的指标权重； ξ_1 和 ξ_2 分别为主客观权重的偏好系数，通常情况下， ξ_1, ξ_2 可取 0.5（黄文静，2022）。

4 基于 TOPSIS 法的加固方案优选方法

TOPSIS 法是一种常用的综合评价方法，它通过原始数据信息能精确反映出各方案之间的差距。此方法的计算步骤比较简单、数据利用率比较高，对被评价对象的数量、指标数量无严格要求，通常被用来寻找最优方案与最劣方案，可以进行多目标决策，适用于加固改造方案的最优选择问题。该方法通过计算得出的正理想解和负理想解与各方案作比较，按照与正理想解距离最近、与负理想解距离最远这一原则确定最佳方案（李勤等，2016）。

TOPSIS 法计算步骤如下：

(1) 构建归一化初始矩阵。设共有 i 个待评价方案，每种方案又有 j 个指标，则 x_{ij} 表示第 i 种方

案的第 j 个指标的评价值。初始矩阵 P 为：

$$P = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (12)$$

(2) 求出规范化矩阵。设决策矩阵为 $X = \{x_{ij}\}$ ，规范化矩阵为 $Y = \{y_{ij}\}$ ，则：

$$y_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (13)$$

(3) 构造加权规范化矩阵 $Z = \{Z_{ij}\}$ ，表示为：

$$Z_{ij} = \omega_j y_{ij} \quad (14)$$

(4) 计算正理想解和负理想解，公式分别为：

$$V^+ = \{(\max v_{ij} \mid (j = 1, 2, \dots, n))\} = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \quad (15)$$

$$V^- = \{(\min v_{ij} \mid (j = 1, 2, \dots, n))\} = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \quad (16)$$

(5) 计算正理想解和负理想解距离，公式为：

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (17)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (18)$$

(6) 计算相对贴进度 C_i ，并根据大小排序， C_i 越大说明方案越优。公式如下：

$$C_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (19)$$

5 工程实例应用

本文根据选定的背景工程进行应用分析，根据该砌体结构现状，选出了 3 种备选加固方案：方案 I（水泥砂浆面层加固）、方案 II（板墙加固）、方案 III（高延性砼面层加固），其加固优选流程如图 5 所示。

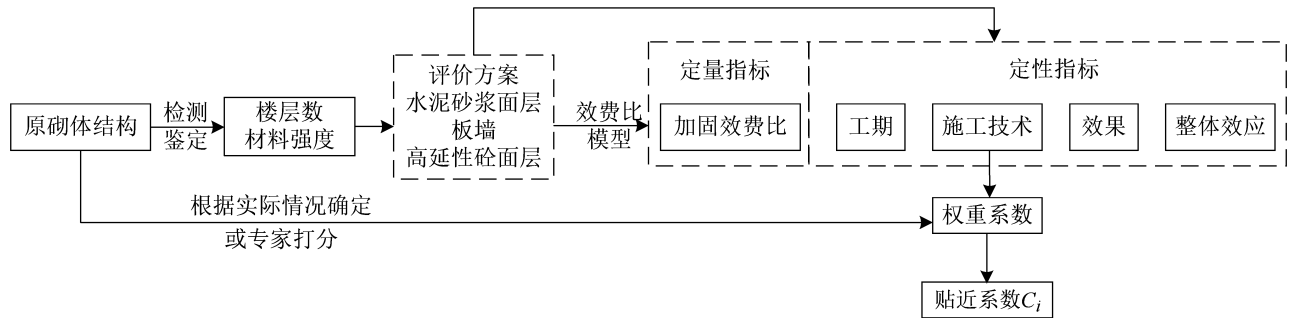


图5 基于加固效费比模型的砌体加固方案优选流程

Fig. 5 Optimization flow of the masonry reinforcement schemes based on the reinforcement cost-effectiveness ratio model

5.1 指标值确立

根据砌体结构优选方案确定可评价指标体系。定量指标由效费比模型输出得到,定性指标则由专家打分,采用七级因素评价集,对其进行赋值得到 $D = \{0.05, 0.20, 0.35, 0.50, 0.65, 0.80, 0.95\}$, 最终确定3种方案的各项定性指标评价价值,见表3。

表3 评价指标

Tab. 3 Evaluation indicators

加固方案	效费比 A_1	工期 A_2	施工技术 A_3	效果 A_4	整体效应 A_5
方案Ⅰ	—	0.95	0.95	0.50	0.95
方案Ⅱ	—	0.65	0.80	0.95	0.65
方案Ⅲ	—	0.50	0.80	0.95	0.80

5.2 G1-COWA 组合赋权法组合权重赋值

(1) G1 法计算初始指标权重

以一级指标准则层 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 为例进行计算。专家针对评价指标进行重要性排序,结果如下: $A_1 > A_4 > A_2 > A_3 > A_5$ 。相邻两个指标之间的重要性关系为: $r_2 = \omega_1/\omega_2 = 1.2$, $r_3 = \omega_2/\omega_3 = 1.4$, $r_4 = \omega_3/\omega_4 = 1.2$, $r_5 = \omega_4/\omega_5 = 1.2$ 。根据式(6)、(7)可计算出准则层权重系数为: $\omega_1 = 0.300$, $\omega_2 = 0.249$, $\omega_3 = 0.178$, $\omega_4 = 0.149$, $\omega_5 = 0.124$ 。根据式(5)~(7),最终计算得出各指标层权重。

(2) COWA 法计算初始指标权重

邀请8位业内专家对加固方案的各项指标重要度进行打分,为避免误差大的影响,设置赋值范围为1~5,同时允许是0.5的倍数,评分值越大,

说明该指标风险越重要。以 A_1 指标为例,将 A_1 指标的决策数据按由大到小顺序进行排序,得到 $d = (4.5, 4.5, 4.5, 4.5, 4.5, 4, 4, 3)$, $n = 8$; 由式(8)计算得到加权向量为 $(0.008, 0.055, 0.164, 0.273, 0.273, 0.164, 0.055, 0.008)$; 根据式(9),计算出 $A_1 \sim A_5$ 指标的绝对权重值分别为 4.379、3.605、3.855、3.641、3.004; 最后根据式(10)求出5个指标相应的相对权重值 $\omega_1 = 0.237$, $\omega_2 = 0.195$, $\omega_3 = 0.209$, $\omega_4 = 0.196$, $\omega_5 = 0.163$ 。二级指标也使用上述方法计算得出。

(3) 确定组合权重

由G1法计算得到的主观权重 ω'_a 和COWA法计算得到的客观权重 ω''_a , 代入公式 $T_i = 0.5\omega'_a + 0.5\omega''_a$ 中,得出各指标综合权重值,详见表4。

5.3 基于TOPSIS法进行方案优选

针对背景工程进行砌体结构加固方案优选,各项指标和权重系数的输入参数见表5。根据式(13)、(14)构件砌体加固方案的决策矩阵,进一步求出正理想解 V^+ 和负理想解 V^- : $V^+ = (0.249, 0.141, 0.115, 0.147, 0.098)$; $V^- = (0.052, 0.093, 0.097, 0.077, 0.067)$, 则正理想解距离 d_i^+ 和负理想解 d_i^- 为:

$$d_i^+ = \begin{bmatrix} 0.200 \\ 0.058 \\ 0.204 \end{bmatrix}; \quad d_i^- = \begin{bmatrix} 0.184 \\ 0.209 \\ 0.070 \end{bmatrix}$$

得出相对贴近度 C_i 为:

$$C_i = \begin{bmatrix} 0.479 \\ 0.783 \\ 0.255 \end{bmatrix}$$

表 4 砌体结构抗震加固优选方案评价指标权重

Tab. 4 Weight of the evaluation indexes of the optimal scheme of the seismic reinforcement of the masonry structure

目标层	准则层	指标层	G1 法		COWA 法		组合赋权法	
			准则层	指标层	准则层	指标层	准则层	指标层
砌体 结构 抗震 加固 优选 方案	效费比 A_1	裂缝修复费用 B_{11}		0.150		0.118		0.134
		直接加固费用 B_{12}	0.300	0.150	0.237	0.119	0.269	0.135
	工期 A_2	施工工期 B_{21}	0.178	0.178	0.195	0.195	0.186	0.186
	施工技术 A_3	加固技术可行性 B_{31}		0.049		0.075		0.062
		施工工艺复杂性 B_{32}	0.149	0.031	0.209	0.069	0.179	0.050
		加固技术成熟性 B_{33}		0.069		0.065		0.067
	效果 A_4	满足安全性要求 B_{41}		0.088		0.069		0.078
		满足适用性要求 B_{42}	0.249	0.073	0.196	0.061	0.222	0.067
		满足耐久性要求 B_{43}		0.088		0.066		0.077
	整体效应 A_5	加固后对结构整体的影响 B_{51}		0.038		0.059		0.049
		加固后对建筑物原貌的影响 B_{52}	0.124	0.054	0.163	0.053	0.144	0.053
		加固墙体与原构件协调工作能力 B_{53}		0.032		0.051		0.042

表 5 砌体结构抗震加固方案的指标赋值和权重系数

Tab. 5 Index assignment and weight coefficients of reinforcement scheme of the masonry structure

加固方案	效费比 A_1	工期 A_2	施工技术 A_3	效果 A_4	整体效应 A_5
方案 I	0.06	0.95	0.95	0.50	0.95
方案 II	0.24	0.65	0.80	0.95	0.65
方案 III	0.05	0.50	0.80	0.95	0.80
权重系数	0.262	0.186	0.179	0.222	0.144

通过数据计算得出相对贴近度 C_i ，经对比分析，背景工程的加固方案排名为：方案 II 优于方案 I 优于方案 III，即板墙加固方案是最优方案。

6 结论

为解决砌体结构加固方案选择的问题，本文提出了基于组合赋权法与 TOPSIS 法的砌体结构加固方案优选方法，通过实例研究，得出以下主要结论：

(1) 本文引入定量指标，即加固效费比，综合多种因素，构建加固效费比模型。效费比值为定量指标与定性指标相结合，能使评价体系更加全面，使决策结果更加贴合实际。

(2) 采用 G1 法与 COWA 法组合的方式进行指标赋权，能有效避免决策者在某一指标上的主观偏好和客观偏差，使决策结果更加科学准确。

(3) 使用组合赋权法和 TOPSIS 法对砌体结构抗震加固方案进行优选，通过分析相对贴近度 C_i 发现，板墙加固方案最优，水泥砂浆面层加固方案次之，而高延性砼面层加固方案最差。

(4) 本文所构建的基于组合赋权法与 TOPSIS 法的砌体加固方案优选方法，可量化分析并遴选出砌体结构加固改造的最佳方案，更具实践性。

由于本工程无震损情况，故本文模型仅考虑了结构加固费用，无法考虑结构震损修复费用。后续研究可深入探索震损修复技术，进一步完善本文模型，对结构震损修复费用和加固费用进行综合评估，增强本文模型的科学性。

参考文献：

邓明科,张伟,李宁. 2020. 高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),47(9):85-93.

Deng M K, Zhang W, Li N. 2020. Research on seismic performance of high ductivity concrete reinforced masonry block walls[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 47(9):85-93. (in Chinese)

符浩彬. 2022. 基于 Vague 集与信息公理的构造柱抗震加固方案优选研究[J]. 南阳理工学院学报,14(6):65-70.

Fu H B. 2022. Research on optimization of seismic reinforcement scheme

- for structural columns based on Vague set and information axioms [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 14 (6): 65 – 70. (in Chinese)
- 黄文静. 2022. 地铁隧道盾构法施工安全风险管理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- Huang W J. 2022. Research on safety risk management of subway tunnel construction with shield method [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology. (in Chinese)
- 李昶. 2019. 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.
- Li C. 2019. Investigation and analysis of existing masonry buildings and research on reinforcement and renovation strategies [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University. (in Chinese)
- 李慧民, 熊雄, 董美美, 等. 2020. 基于灰色关联改进 TOPSIS 法的既有建筑抗震加固方案优选[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 34(12): 264 – 270.
- Li H M, Xiong X, Dong M M, *et al.* 2020. Optimization of seismic reinforcement scheme for existing buildings based on grey correlation improved TOPSIS method [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 34(12): 264 – 270. (in Chinese)
- 李勤, 盛金喜, 田飞. 2016. 基于改进理想点法的建筑结构加固方案优选[J]. 工业建筑, 46(8): 155 – 157.
- Li Q, Sheng J X, Tian F. 2016. Optimization of building structure reinforcement scheme based on improved ideal point method [J]. Journal of Industrial Architecture, 46(8): 155 – 157. (in Chinese)
- 李忠富, 李州扬, 戴利人, 等. 2021. 基于 COWA – 模糊集对的 BIM 绿建运维管理综合效益分析[J]. 施工技术(中英文), 50(13): 134 – 138.
- Li Z F, Li Z Y, Dai L R, *et al.* 2021. Comprehensive benefit analysis of BIM green construction operation and maintenance management based on COWA – fuzzy set pairs [J]. Construction Technology (Chinese and English), 50(13): 134 – 138. (in Chinese)
- 陆新征, 程庆乐, 孙楚津, 等. 2019. 基于动力弹塑性时程分析和实测地面运动的地震破坏力速报系统[J]. 自然灾害学报, 28(3): 35 – 43.
- Lu X Z, Cheng Q L, Sun C J, *et al.* 2019. Rapid earthquake destructive power reporting system based on dynamic elastoplastic time-history analysis and measured ground motion [J]. Journal of Natural Disasters, 28(3): 35 – 43. (in Chinese)
- 四川省建设工程造价管理总站. 2015. 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.
- Sichuan Provincial Construction Cost Management Station. 2015. Valuation quota of bill of quantities of construction projects in Sichuan Province: Building maintenance and reinforcement project [M]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- 王坚. 2022. 既有砌体结构加固方法分析[J]. 工程技术研究, 7(10): 155 – 157.
- Wang J. 2022. Analysis of reinforcement methods for existing masonry structures [J]. Engineering and Technological Research, 7(10): 155 – 157. (in Chinese)
- 王晶. 2016. 混凝土框架结构构件加固优化设计及可靠度分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学.
- Wang J. 2016. Optimization design and reliability analysis of concrete frame structure members [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. (in Chinese)
- 王亭, 姜忻良, 李茂盛. 2012. 历史风貌建筑砖砌体加固试验及模拟计算分析[J]. 工程力学, 29(S1): 92 – 96.
- Wang T, Jiang X L, Li M G. 2012. Test and simulation analysis of brick masonry reinforcement for buildings with historical features [J]. Engineering Mechanics, 29(S1): 92 – 96. (in Chinese)
- 王永, 李义广, 冯晓爽, 等. 2020. 基于组合赋权 – TOPSIS 方法在砌体结构加固方案中的应用[J]. 河北农业大学学报, 43(2): 147 – 151.
- Wang Y, Li Y G, Feng X S, *et al.* 2020. Application of combination-based empowerment – TOPSIS method in masonry structure reinforcement scheme [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 43(2): 147 – 151. (in Chinese)
- 吴繁超, 施微丹, 何佰昭, 等. 2023. 福建省既有石砌体房屋整毛石墙体抗震加固研究综述[J]. 地震研究, 46(4): 551 – 561.
- Wu F C, Shi W D, He B Z, *et al.* 2023. Review of research on seismic behaviour and retrofitting of stone masonry walls of existing buildings in Fujian Province [J]. Journal of Seismological Research, 45(1): 17 – 25. (in Chinese)
- 吴乐乐, 唐曹明, 黄世敏, 等. 2023. 钢筋网水泥砂浆面层加固低强度砖砌体结构的地震易损性分析[J]. 建筑科学, 39(5): 54 – 65.
- Wu L L, Tang C M, Huang S M, *et al.* 2023. Seismic vulnerability analysis of low strength brick masonry structures reinforced by reinforced mesh cement mortar surface layer [J]. Building Science, 39(5): 54 – 65. (in Chinese)
- 吴小宾, 陈鹏, 高峰. 2022. 基于加固效费比的砌体结构抗震加固方案优选方法研究[J]. 工程力学, 39(5): 167 – 176.
- Wu X B, Chen P, Gao F. 2022. Research on optimal method of seismic reinforcement scheme for masonry structures based on reinforcement efficiency/cost ratio [J]. Journal of Engineering Mechanics, 39(5): 167 – 176. (in Chinese)
- 徐天航, 郭子雄, 柴振岭, 等. 2016. 钢筋网片改性砂浆加固石砌体墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 37(12): 120 – 125.
- Xu T H, Guo Z X, Chai Z L, *et al.* 2016. Experimental study on seismic performance of stone masonry walls reinforced by modified mortar with steel mesh sheet [J]. Journal of Building Structures, 37(12): 120 – 125. (in Chinese)
- 杨笛, 洪文霞, 尹泽宇, 等. 2022. 基于组合赋权与 TOPSIS 的老旧小区智慧改造模式的选择[J]. 常州工学院学报, 35(6): 37 – 42.
- Yang D, Hong W X, Yin Z Y, *et al.* 2022. Selection of smart transformation model of old residential areas based on combination empowerment

- ment and TOPSIS[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 35(6):37–42. (in Chinese)
- 杨新华,徐良明,陈金锋,等. 2019. 基于 AHP 对砌体宿舍楼抗震加固改造方案的决策[J]. 舰船电子工程,39(12):141–144,153.
- Yang X H, Xu L M, Chen J F, *et al.* 2019. Decision making of seismic reinforcement scheme for masonry dormitory building based on AHP [J]. Naval Electronic Engineering, 39(12):141–144, 153. (in Chinese)
- 张桂欣,孙柏涛. 2018. 基于模糊层次分析的建筑物单体震害预测方法研究[J]. 工程力学,35(12):185–193.
- Zhang G X, Sun B T. 2018. Seismic damage prediction for a single building based on a fuzzy analytical hierarchy approach[J]. Engineering Mechanics, 35(12):185–193. (in Chinese)
- GB 50023—2009, 建筑抗震鉴定标准[S].
- GB 50023—2009, Standard for seismic appraisal of buildings[S]. (in Chinese)

Optimization of Masonry Structure Reinforcement Scheme Based on the Combination Weighting and TOPSIS Methods

WU Pingchuan^{1,2}, YANG Zhuang¹, QI Hu³, YUAN Shimao¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

(2. Hebei Technology Innovation Center for Prefabricated Structure, Handan 056000, Hebei, China)

(3. State Quality (Beijing) Construction Engineering Testing & Appraisal Center, Beijing 100835, China)

Abstract

The optimization method of the masonry reinforcement scheme is of great significance to the selection scheme of practical engineering. To this end, an optimization method for masonry reinforcement scheme based on combination weighting and TOPSIS methods is established. The reinforcement efficiency and the cost ratio model are introduced, and an optimization system is established, involving the quantitative indexes (efficiency and cost ratio) and the qualitative indexes (construction period, construction technology, outcome, overall effect). A case study of a teaching building is conducted by using the subjective and objective combination weighting method. And the best scheme of the structure is obtained: the slab wall reinforcement scheme. The results show that the proposed optimization method is practical and effective, and suitable for common masonry's reinforcement and reconstruction. According to the basic information of the structure, the proposed optimization method is able to scientifically and conveniently give a reinforcement scheme, which provides technical support for the reinforcement design and implementation of the masonry structure.

Keywords: masonry structure; reinforcement efficiency cost ratio; combinatorial empowerment; TOPSIS method; scheme optimization