

地铁深基坑支护方案的模糊综合分析与评价

徐鹏松, 贺可强*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 由于地铁深基坑支护方案的选择是一种受多因素共同作用影响的复杂项目, 需对支护方案进行探讨分析与评价, 研究和确定最优支护方案, 以期提高支护施工效益并减少支护不当造成的安全风险。依层次分析法构建结构模型, 通过综合考虑安全可行、经济成本、环境影响、施工方案 4 个方面, 分析 13 个影响因素, 并利用信息熵综合优化权重, 再与模糊综合评价相结合, 对支护方案进行综合评价。结合青岛地铁深基坑工程实例, 对提出的 3 种备选方案进行打分、计算处理, 并通过对比各因素之间重要程度及总综合评价值, 进而得出适合本工程的最优支护方案。研究表明, 3 种支护方案的总综合评价值 $W'_3=3.1433 < W'_1=3.1486 < W'_2=3.3140$, 可知方案 2(围护桩+内支撑支护)为最佳支护方案, 并通过模拟验算其满足施工要求, 且支护效果较好, 该评价方法较为准确可行, 操作简单, 且适用于各种基坑的支护方案选择, 可为地铁深基坑支护方案评选提供参考。

关键词: 深基坑工程; 支护方案评价; 模糊综合评价; 组合赋权

中图分类号: TU921

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)04-0045-08

The fuzzy comprehensive analysis and evaluation of subway deep foundation pit supporting scheme

XU Pengsong, HE Keqiang*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: As the selection of the support scheme for subway deep foundation pit is a complex project affected by multiple factors, it is necessary to discuss, analyze and evaluate the support scheme, study and determine the optimal support scheme, so as to increase the efficiency of support construction and reduce the safety risk caused by improper support. In this study a structure model is constructed according to analytic hierarchy process, and 13 influencing factors are analyzed from the four aspects of safety and feasibility, economic cost, environmental impact and construction scheme. The weights of the 13 factors are optimized by information entropy, and then combined with fuzzy comprehensive evaluation, the comprehensive evaluation of the support scheme is carried out. Taking Qingdao Metro deep foundation pit engineering as the example, the three alternative schemes are scored and calculated, and the most suitable supporting scheme for this project is obtained by comparing the impor-

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020KE004)

作者简介: 徐鹏松(1998—), 男, 山东潍坊人。硕士, 研究方向为边坡稳定性评价与预测。E-mail: xupengsong163@163.com。

* **通信作者:** 贺可强(1960—), 男, 山东烟台人。博士, 教授, 主要从事地质灾害预测、评价与防治方面的研究。

E-mail: keqianghe@sina.com。

tance degree and total comprehensive evaluation value of each factor. The research results show that the total comprehensive evaluation value of the three support schemes is $W'_3 = 3.1433 < W'_1 = 3.1486 < W'_2 = 3.3140$. We can see that scheme 2 (envelope pile + internal support) is the best support scheme, because through calculation and simulation we find that it meets the construction requirements and the support effect is good. This evaluation method is more accurate and feasible, easy to operate, suitable for the selection of various foundation pit support schemes, and can provide a reference for the selection of deep foundation pit support schemes.

Key words: deep foundation pit engineering; support scheme evaluation; fuzzy comprehensive evaluation; combinatorial weighting

近年来,城市发展突飞猛进,建筑物亦愈建愈高,为了安全的考虑,把重心转移向地下。随着基础、地下室、地下构筑物、地下交通等不断地出现,向地下发展也越来越深,对于支护结构的要求也越来越严格^[1]。而在深基坑支护方案的选择中,需要考虑各种因素共同作用的影响,使其满足支护要求。

传统的评判深基坑支护方案是定性评价,主要是加权平均法、专家问卷调查法^[2]。因为传统方法中包含较多的主观因素、较大的误差,所以不能完全真实地反映支护方案的好坏,许多学者为此进行探索研究。朱琦等^[3]采用层次分析法和模糊综合评价法2种方法组合进行基坑支护方案选择,建立多层次指标评价体系,通过总综合评价值选出适合该工程的支护形式,但其判断矩阵与各指标权重主观强度很高,对总综合评价值影响较大,从而导致评价方案的不可靠。龚颖超等^[4]通过层次分析法与控制区间及记忆模型结合,应用并联响应模型建立地铁深基坑施工安全风险评价模型,其可以处理评价因素间的相关性问题,不管是层次分析法还是控制区间与记忆模型,其计算数据依然是通过专家打分。王莉等^[5]引入一种新的标度——三标度法(0,1,2)来改进层次分析法中的评价矩阵,使其易于区分两两因素指标之间的重要程度,且无需对判断矩阵再进行一致性检验,并证明该评价方法的准确性。高明等^[6]舍弃常权重而使用变权理论中惩罚型变权向量对评价指标权重进行修正,通过对三峡库区白水河滑坡进行模糊综合评价,其评价结果与滑坡实际情况相符,通过对权重的修正,虽保证各指标在评价中的均衡性,但还是存在一定的主观性。针对层次分析法中指标权重存在的主观性,江婷婷等^[7]通过博弈论离差极小化原理对评价因素指标权重进行组合赋权,使用2范数数值分析方法,结合模糊综合评价法进行实例验证,但该原理可使得每个指标元素都很小,使得组合权重发生很大的变化。吴波等^[8]在运用层次分析法确定因素指标权重的基础上,结合灰色关联理论对评价层之间进行关联度分析,实例显示该方法能有效降低主观因素影响,而其参考数列的确定非常重要,需要找到某种因素以反映评价指标的行为特征。为合理地解释各指标因素对评价指标的影响,蒋英礼等^[9]采用集对分析法改进基坑支护方案综合评价方法,并对改进前后方法计算结果进行对比,实例显示改进后更符合工程实际,而该方法是在客观事物中选取2个事物,并从同、异、反3个方面研究它们的联系度。

以上学者都是应用层次分析法与模糊综合评价法对目标层进行综合评价,为了消除该方法中主观因素影响,而对其进行不同方法的改进,使其在一定程度上消除主观因素对指标权重的影响。现综合考虑安全可行、经济成本、环境影响、施工方案对地铁深基坑支护方案的影响,使用层次分析法依据专家打分并通过对比各指标因素重要程度确定评价指标权重,再用计算得到的信息熵及权重对指标权重进行组合优化,最后运用模糊综合评价法得出各支护方案的综合评价值,最终确定适合本工程的支护方案,并以青岛市某地铁深基坑为例验证本评价方法的可靠性。

1 综合评价方法

1.1 层次分析法

层次分析法是一种基于层次权重进行决策分析的方法^[10],是将与决策分析总是相关的因素分解成为目标、准则、方案等层次,再进行定性分析与定量分析相结合,并作出多因素决策方法^[11]。使用1—9比率

标度法构造其判断矩阵,再对计算结果进行一致性检验,该方法具体步骤如下:

1) 建立地铁深基坑支护方案选择的评价层次结构模型。

2) 根据层次结构模型构造判断矩阵 A ,其中 A_{ij} 元素为第 i 因素与第 j 因素相比的重要性, A_{ij} 的取值见表 1。

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

表 1 标度尺^[12]

A_{ij} 取值	1	3	5	7	9	2,4,6,8	倒数
定义	同样重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要	重要程度处于相应 2 个数之间	因素 j 与因素 i 相比重要程度 $A_{ji} = 1/A_{ij}$

3) 由判断矩阵中的每一行累计乘积的 n 次根可得权重向量 $\bar{\omega}_i$,再对权重向量进行归一化处理后得到地铁深基坑支护方案评价指标的层次分析权重值 ω_i 。

$$\bar{\omega}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n A_{ij}} \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i} \quad (3)$$

4) 对判断矩阵进行一致性检验。

$$R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (4)$$

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{A\omega_i}{n\omega_i} \quad (6)$$

式中: R_C 为一致性检验指标(CR),当 $R_C < 0.1$ 时,表示专家打分有效,表示具有满意的一致性,反之,则表示无效; I_R 为平均一致性指标(RI),可通过查表 2 确定; I_C 为一致性指标(CI), $I_C = 0$,说明有着完全一致性, I_C 接近 0,说明一致性较为满意, $I_C > 0$ 则说明具有明显的不一致性; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值。

表 2 RI 取值^[13]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54

1.2 信息熵

熵是事物的混乱程度^[14],信息就是为了消除人们对事物了解的不确定性。为了消除层次分析法中的主观因素对最终评价的影响,可以通过信息熵来对事物进行模糊评价^[15-16]。通过该法来调整评价指标的综合分析权重,从而使得指标包含的有效信息更多,提升评价的准确性,为指标综合评价提供更准确的依据。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (7)$$

利用式(7)对原始指标数据 X_{ij} 进行标准化处理,式中 $\max(X_i)$ 与 $\min(X_i)$ 分别为第 i 项指标的最大值与最小值^[17], X'_{ij} 为标准化处理后的数据。为求得各指标信息熵,进而算出各评价指标权重,需对所

得到的各指标数据进行归一化,过程涉及到的公式如式(8)~(10)所示:

$$N_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (8)$$

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n N_{ij} \ln N_{ij} \quad (9)$$

$$S_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^i (1 - H_i)} \quad (10)$$

式中: N_{ij} 为归一化处理后的数据; H_i 为各指标的信息熵; S_i 为各指标的信息熵权重。

1.3 层次分析法与信息熵计算组合权重

利用式(11)将层次分析法权重 ω_i 与信息熵权重 S_i 进行组合,得到地铁深基坑支护方案评价最终组合权重 F_i :

$$F_i = \omega_i S_i / \sum \omega_i S_i \quad (11)$$

1.4 模糊综合评价法

模糊综合评价法是根据模糊数学中的隶属度理论把定性关系转化为定量关系^[18-19],是一种在实际中可以对多种因素作用的复杂评价问题做出综合评价的方法。它能出色地解决复杂的模糊问题,适合各种模棱两可的受主观因素影响的问题的解决^[20],具有结果清晰明确,过程层次性、系统性强的特点,具体步骤如下:

1) 对于多层次指标评价对象,一级评价指标因素集为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 二级评价指标因素集为 $U_i = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$ 。评语集 V 是对评价指标集 U 的评判结果的集合, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 并赋予对应的等级矩阵 $V = [1, 2, \dots, n]$ 。

2) 对评价指标因素集做多因素综合评判,总评判矩阵为 R , 因素集 U 的权重集为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。为了计算结果简明,评估矩阵 E 与等级矩阵 V 不能直接相乘,需要对评估矩阵进行归一化处理得到新评估矩阵 E' , 其与等级矩阵 V 计算得到备选方案的总综合评价值 W' 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$E = F \circ R \quad (13)$$

式中: \circ 为模糊合成算子。

$$W' = E' V^T \quad (14)$$

2 层次分析法与信息熵在地铁深基坑支护方案评价中的应用

2.1 案例分析

以青岛市某地铁站深基坑为例,该车站位于荟城路与正阳中路交叉路口,沿正阳中路东西向敷设,总长 223 m,标准段宽 20.5 m,埋深约 20.1 m。基坑所在位置较为平坦,地面建筑物以高层住宅为主。采用明挖顺作法进行基坑施工,存在着较大的风险,在施工过程中必须保证基坑的稳定。因此使用本文的评价方法对该地铁深基坑支护方案进行评价,进行施工前模拟分析与研究,为实际工程作业提供参考。

2.2 确定评价指标体系

通过调查研究基坑开挖后的应力场与渗流场的改变以及支护结构的必要功能,综合考虑多方面影响因素,确定该基坑支护方案一级评价指标为安全可行 A_1 、经济成本 A_2 、环境影响 A_3 、施工方案 A_4 。结合工程实况,方案 1 为地下连续墙支护;方案 2 为围护桩+内支撑;方案 3 为桩锚结构。层次结构如图 1 所示。

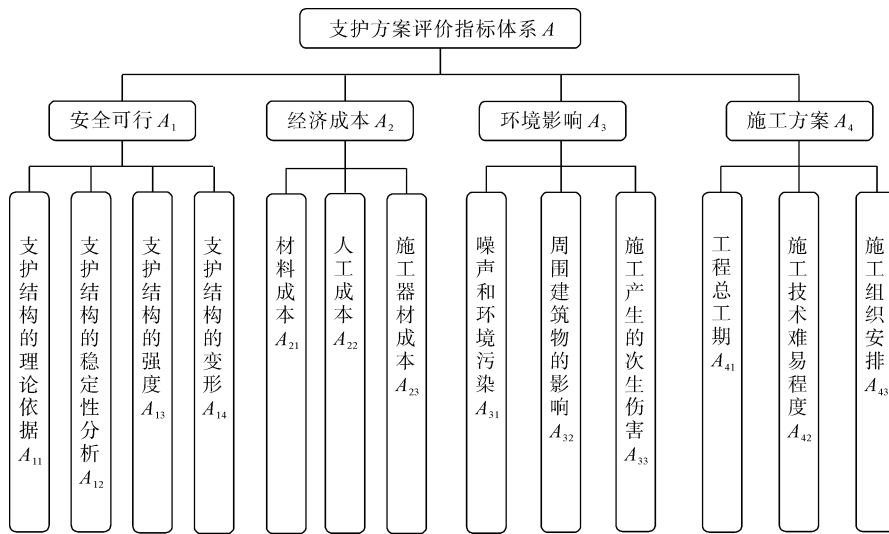


图 1 地铁深基坑支护方案评价递阶层次结构模型

2.3 评价指标权重计算

2.3.1 层次分析法评价指标权重计算

利用层次分析法确定地铁深基坑支护方案评价指标权重,对专家打分使用平均值计算法计算各专家评价权重意见值,构造评价指标的判断矩阵,由式(1)~(6)计算各指标的分权重及总权重,计算结果见表 3—8。

表 3 一级评价指标判断矩阵及权重

A	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	ω _i
A ₁	1.00	3.00	2.00	3.00	0.4483
A ₂	0.33	1.00	0.33	2.00	0.1487
A ₃	0.50	3.00	1.00	2.00	0.2864
A ₄	0.33	0.50	0.50	1.00	0.1166

注:λ_{max}=4.1352, I_C=0.0451, I_R=0.9, R_C=0.0501<0.1。

表 4 安全可行评价指标判断矩阵及权重

A ₁	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	ω _i
A ₁₁	1.00	0.50	0.33	0.33	0.1084
A ₁₂	2.00	1.00	0.50	0.50	0.1888
A ₁₃	3.00	2.00	1.00	1.00	0.3514
A ₁₄	3.00	2.00	1.00	1.00	0.3514

注:λ_{max}=4.0050, I_C=0.0017, I_R=0.9, R_C=0.0018<0.1。

表 5 经济成本评价指标判断矩阵及权重

A ₂	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	ω _i
A ₂₁	1.00	3.00	2.00	0.5399
A ₂₂	0.33	1.00	0.50	0.1630
A ₂₃	0.50	2.00	1.00	0.2971

注:λ_{max}=3.0055, I_C=0.0018, I_R=0.58, R_C=0.0032<0.1。

表 6 环境影响评价指标判断矩阵及权重

A ₃	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	ω _i
A ₃₁	1.00	0.50	0.33	0.1630
A ₃₂	2.00	1.00	0.50	0.2971
A ₃₃	3.00	2.00	1.00	0.5399

注:λ_{max}=3.0055, I_C=0.0018, I_R=0.58, R_C=0.0032<0.1。

表 7 施工方案评价指标判断矩阵及权重

A ₄	A ₄₁	A ₄₂	A ₄₃	ω _i
A ₄₁	1.00	0.33	0.50	0.1630
A ₄₂	3.00	1.00	2.00	0.5399
A ₄₃	2.00	0.50	1.00	0.2971

注:λ_{max}=3.0055, I_C=0.0018, I_R=0.58, R_C=0.0032<0.1。

2.3.2 信息熵法确定评价指标权重

利用信息熵法确定地铁基坑支护方案评价指标权重,收集整理有关数据,由式(7)—(10)计算各指标信息熵及权重,结果见表9。

表8 层次分析法评价指标总权重计算结果

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标总权重
A_1	0.4483	A_{11}	0.0487
		A_{12}	0.0846
		A_{13}	0.1575
		A_{14}	0.1575
A_2	0.1487	A_{21}	0.0803
		A_{22}	0.0242
		A_{23}	0.0442
A_3	0.2864	A_{31}	0.0467
		A_{32}	0.0851
		A_{33}	0.1546
A_4	0.1166	A_{41}	0.0190
		A_{42}	0.0630
		A_{43}	0.0346

表9 信息熵法评价指标权重计算结果

一级指标	二级指标	信息熵	二级指标总权重
A_1	A_{11}	0.3610	0.2859
	A_{12}	0.4858	0.2301
	A_{13}	0.4591	0.2420
	A_{14}	0.4591	0.2420
A_2	A_{21}	0.5794	0.2891
	A_{22}	0.4555	0.3741
	A_{23}	0.5100	0.3368
A_3	A_{31}	0.4555	0.3741
	A_{32}	0.5100	0.3368
	A_{33}	0.5794	0.2891
A_4	A_{41}	0.4555	0.3741
	A_{42}	0.5794	0.2891
	A_{43}	0.5100	0.3368

2.3.3 层次分析法与信息熵法确定组合权重

由式(11)求得地铁基坑支护方案评价指标的最终组合权重,见表10。

表10 组合权重计算结果

一级指标	二级指标	层次法权重	信息熵法权重	组合权重
A_1	A_{11}	0.0487	0.2859	0.1268
	A_{12}	0.0846	0.2301	0.1776
	A_{13}	0.1575	0.2420	0.3478
	A_{14}	0.1575	0.2420	0.3478
A_2	A_{21}	0.0803	0.2891	0.4922
	A_{22}	0.0242	0.3741	0.1923
	A_{23}	0.0442	0.3368	0.3155
A_3	A_{31}	0.0467	0.3741	0.1923
	A_{32}	0.0851	0.3368	0.3155
	A_{33}	0.1546	0.2891	0.4922
A_4	A_{41}	0.0190	0.3741	0.1923
	A_{42}	0.0630	0.2891	0.4922
	A_{43}	0.0346	0.3368	0.3155

2.4 地铁深基坑模糊综合分析与评价

由图1可知,评价指标因素集为 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$, $A_1 = \{A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}\}$, $A_2 = \{A_{21}, A_{22}, A_{23}\}$, $A_3 = \{A_{31}, A_{32}, A_{33}\}$, $A_4 = \{A_{41}, A_{42}, A_{43}\}$ 。将评价结果分为5个等级,用评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 表示{非常安全,安全,较安全,较不安全,不安全},并赋予相应的等级矩阵 $V = [1, 2, 3, 4, 5]$ 。结

合工程施工现场实际情况,邀请相关专家对各种基坑支护结构特点与其适用范围参考13个评价指标因素对3个备选支护方案进行打分,并对其进行平均值的计算与归一化处理,见表11—13。

表11 地下连续墙支护数据统计

评价结果	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{41}	A_{42}	A_{43}
非常安全	0.15	0.50	0.60	0.50	0.05	0.15	0.15	0.45	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
安全	0.50	0.25	0.30	0.20	0.25	0.30	0.25	0.05	0.25	0.15	0.00	0.10	0.25
较安全	0.25	0.25	0.10	0.10	0.45	0.20	0.25	0.25	0.45	0.35	0.65	0.35	0.25
较不安全	0.10	0.00	0.00	0.10	0.10	0.20	0.25	0.15	0.10	0.25	0.25	0.30	0.25
不安全	0.00	0.00	0.00	0.10	0.15	0.15	0.10	0.10	0.00	0.25	0.10	0.25	0.25

表12 围护桩+内支撑支护数据统计

评价结果	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{41}	A_{42}	A_{43}
非常安全	0.25	0.65	0.60	0.25	0.05	0.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
安全	0.50	0.25	0.25	0.35	0.45	0.35	0.15	0.40	0.50	0.20	0.25	0.20	0.25
较安全	0.25	0.10	0.15	0.25	0.25	0.40	0.45	0.50	0.25	0.60	0.50	0.40	0.25
较不安全	0.00	0.00	0.00	0.10	0.25	0.00	0.25	0.10	0.00	0.10	0.10	0.20	0.25
不安全	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.10	0.15	0.20	0.25

表13 桩锚结构支护数据统计

评价结果	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{41}	A_{42}	A_{43}
非常安全	0.25	0.50	0.60	0.45	0.10	0.25	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
安全	0.40	0.30	0.25	0.20	0.25	0.30	0.15	0.25	0.45	0.15	0.20	0.25	0.25
较安全	0.35	0.20	0.10	0.15	0.15	0.25	0.35	0.25	0.30	0.50	0.40	0.40	0.25
较不安全	0.00	0.00	0.05	0.10	0.25	0.20	0.25	0.25	0.05	0.25	0.20	0.20	0.30
不安全	0.00	0.00	0.00	0.10	0.25	0.00	0.25	0.25	0.00	0.10	0.20	0.15	0.20

现对方案1各因素进行评价,根据评价数据统计建立评估矩阵,结合评价指标组合综合权重进行计算可得到方案1的总综合评价价值。由式(12)—(14)计算可得方案1的总综合评价价值 $W'_1=3.1486$ 。按照相同的步骤,可求得方案2、方案3的总综合评价价值分别为 $W'_2=3.3140$ 、 $W'_3=3.1433$ 。因 $W'_3 < W'_1 < W'_2$,故方案2为本地地铁深基坑工程最佳支护方案。通过模拟验算得到方案2满足施工要求,符合现场工程实际情况,且支护效果相对较好。

3 结论

1) 通过调查研究基坑开挖后的应力场与渗流场的改变以及支护结构的必要功能,综合考虑多方面影响因素,筛选出适合该方案的最佳评价指标,分为安全可行、经济成本、环境影响、施工方案4个大项,共包含13个因素。

2) 采用层次分析法与信息熵组合赋权建立模糊综合评价模型,该模型不仅可以避免专家打分造成的人为主观因素对权重的影响,也可以避免所得数据因混乱程度过大而带来的权重偏差,使最终得到的评价指标组合权重更加客观合理,为地铁深基坑支护方案的评选提供了有效评价方法。

3) 通过3种支护方案的总综合评价价值 $W'_3=3.1433 < W'_1=3.1486 < W'_2=3.3140$,可知方案2(围护桩+内支撑支护)为最佳支护方案,并通过模拟验算得出其满足施工要求,且支护效果较好;在满足基坑安全的情况下,降低因施工造成的安全风险,可有效缩减工期与支护工程造价。

参考文献(References):

- [1] 闫满静. 探讨市政工程中深基坑支护技术及其施工安全管理[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(1): 146-149.
YAN Manjing. Discussion on the support technology and construction safety management of the deep foundation pit support in municipal engineering[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full-Text Version) Engineering Technology, 2022(1): 146-149.
- [2] 冀彦卓, 田亚光, 李庆文. 模糊层次分析法在深基坑支护方案评价中的应用[J]. 科技创新导报, 2014, 11(12): 103-105.
JI Yanzhuo, TIAN Yaguang, LI Qingwen. Application of fuzzy AHP approach to evaluating the bracing deep foundation pit program[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2014, 11(12): 103-105.
- [3] 朱琦, 李帅, 魏东旭, 等. 基坑支护结构的综合选型及受力与变形特性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(32): 13369-13378.
ZHU Qi, LI Shuai, WEI Dongxu, et al. Comprehensive selection of foundation pit supporting structure and behavior of stress and deformation[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(32):13369-13378.
- [4] 龚颖超, 路婉妮, 陶红雨. 基于 CIM-AHP 模型地铁深基坑施工风险研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(10):1422-1427.
GONG Yingchao, LU Wannan, TAO Hongyu. Research on construction risk of subway deep foundation pit based on CIM-AHP model[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(10):1422-1427.
- [5] 王莉, 马銜青, 王涛, 等. 基于 IAHP-熵权法和模糊综合评价法的市政有限空间气体安全风险评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3):1319-1325.
WANG Li, MA Xianqing, WANG Tao, et al. Gas safety risk assessment in municipal limited space based on IAHP-entropy weight method and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3):1319-1325.
- [6] 高明, 贺可强, 刘洪华, 等. 基于变权重的水库滑坡稳定性模糊综合评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3885-3891.
GAO Ming, HE Keqiang, LIU Honghua, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of reservoir landslide stability based on variable weight[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10):3885-3891.
- [7] 江婷婷, 姚传勤, 童张俊. 基于博弈论组合赋权的地铁盾构施工安全管理模糊综合评价[J]. 华北科技学院学报, 2021, 18(4):86-92.
JIANG Tingting, YAO Chuanqin, TONG Zhangjun. Fuzzy evaluation of metro shield construction safety management based on combination weighting of game theory[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2021, 18(4):86-92.
- [8] 吴波, 吴昱芳, 黄惟, 等. 基于模糊综合判定法地铁深基坑施工安全风险评估[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(2):179-187.
WU Bo, WU Yufang, HUANG Wei, et al. Safety risk assessment of subway deep foundation pit construction based on fuzzy comprehensive decision method[J]. Mathematics in Practice and Cognition, 2020, 50(2):179-187.
- [9] 蒋英礼, 邓子胜, 王冬英. 基于集对分析方法的深基坑支护方案优选研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1):131-137.
JIANG Yingli, DENG Zisheng, WANG Dongying. Research on supporting scheme optimization for deep foundation pit based on set pair analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1):131-137.
- [10] 董梦园. 基于层次分析法的深圳能源融资问题研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
DONG Mengyuan. Research on financing problems of Shenzhen Energy Group Co., Ltd based on analytic hierarchy process[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022.
- [11] 帅骏芳, 白蓉, 马海彬. 深基坑支护方案的模糊综合评价[J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(1):33-38.
SHUAI Junfang, BAI Rong, MA Haibin. Fuzzy comprehensive evaluation applied to bracing system for deep foundation pit[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2023, 20(1): 33-38.
- [12] 曹智恒. 高铁调度指挥系统安全性综合分析与评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
CAO Zhiheng. Comprehensive analysis and evaluation of safety of high-speed railway dispatching command system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [13] 张婧. 层次分析法在气象服务效益定量评估中的应用[J]. 科技与创新, 2014(16):151-152.
ZHANG Jing. Application of AHP in the quantitative assessment of meteorological services in benefit[J]. Science and Technology Innovation, 2014(16):151-152.
- [14] 刘凌波, 彭正洪, 吴昊. 熵模型及其在城市研究中的应用[J]. 城市规划, 2021, 45(12):27-39.
LIU Lingbo, PENG Zhenghong, WU Hao. Entropy models and their applications in urban studies[J]. City Planning Review, 2021, 45(12):27-39.
- [15] 黄开放. 基于 MM/PBSA 和相互作用熵理论优化结合自由能计算及其应用[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.
HUANG Kaifang. Optimized and applied the binding free energy calculator based on MM/PBSA combined with interaction entropy method[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2021.

(下转第 71 页)