

模糊一致矩阵理论在地铁深基坑支护方案 优选中的应用

戴佑斌^{1,2}, 张尚根¹, 周早生¹, 卢红标¹, 周晓东¹

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 炮兵学院南京分院, 江苏 南京 211132)

摘 要: 根据地铁深基坑支护工程的特点, 建立了支护方案评价的指标体系, 并将模糊数学理论与层次分析法结合起来, 构造出地铁深基坑支护方案优选的模糊一致矩阵数学模型。该模型概念清晰、理论严密、计算简便、适用范围广且评价结果客观可靠。实例分析表明, 用该方法进行深基坑支护方案优选是可行的、有效的。与其它方法相比, 该方法可灵活处理各种复杂的决策问题, 易于编制计算机程序。

关键词: 深基坑; 支护; 模糊一致矩阵; 优选

中图分类号: U 231.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)10-1162-04

作者简介: 戴佑斌(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事深基坑支护方面的研究教学工作。

Application of fuzzy consistent matrix theory to optimization of bracing projects for deep foundation pit of metro

DAI You-bin^{1,2}, ZHANG Shang-gen¹, ZHOU Zao-sheng¹, LU Hong-biao¹, ZHOU Xiao-dong¹

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech, Nanjing 210007, China; 2. Artillery Academy Nanjing Branch,

Nanjing 211132, China)

Abstract: According to characteristics of bracing engineering for deep excavation of metro, using the theory of fuzzy mathematic and AHP (analytic hierarchy process), a fuzzy consistent matrix mathematic model was established to optimize bracing projects for deep excavation of metro. The model was based on clear concept and rigorous theories, and could be applied extensively to obtain objective and dependable result. A case study showed that the method was reasonable and effective to optimize bracing projects for deep excavation of metro. Compared with other methods, the present method could be used to handle all kinds of complicated decision problems, and was apt to establish the computer procedure.

Key words: deep foundation pit; bracing; fuzzy consistent matrix; optimization

0 前 言

基坑工程是一个古老又有时代特点的岩土工程课题, 它是一项综合性很强的系统工程。随着城市建设步伐的不断加快, 大量高层、超高层建筑以及地下工程的不断涌现, 对基坑工程的要求越来越高。深基坑支护体系的优劣将影响到整个工程的成败。在实际工程中, 往往同时有几个支护方案可供选择, 这时就有必要对它们进行评价, 从中选出较满意的方案。由于深基坑支护的特殊性和复杂性, 其方案的确定应综合考虑基坑的特点、工程地质条件、水文地质条件、周围环境、施工条件及工程经济等因素, 这些因素有确定性的, 也有模糊的, 即决策受众多模糊性因素的影响。目前对于深基坑支护方案的决策还没有一个明确的体系, 绝大多数情况下依靠少数专家或决策者的经

验来确定, 其结果是不同的专家或决策者会得出不同的结论。为了解决这类复杂问题, 需要多种方法相互补充才能得出比较理想的结果。一个合适的深基坑支护方案的确定, 必须正确地综合分析其众多的影响因素, 采用合理的评判方法, 从而确定出合理可靠的设计方案。正是基于这一考虑, 本文根据地铁基坑工程自身的特点, 构造了影响地铁深基坑支护的指标体系并建立了地铁深基坑支护方案优选的模糊一致矩阵数学模型, 通过实例分析表明, 用该方法进行深基坑支护方案的优选是合理的、有效的。

1 数学模型的建立

在模糊一致矩阵法^[1, 2]中, 可针对每一目标 U_k ,

通过两两比较的方法建立方案论域上的模糊优先关系矩阵 $B_k=(b_{ij}^k)_{m \times m}$ ($k=1, 2, \cdots, n$)。其中 b_{ij}^k 表示在目标 U_k 下, 方案 A_i 优于方案 A_j 的程度。然后, 决策者对各个方案进行优劣比较即可, 模糊一致矩阵法的优点是决策者的思维进行量化, 即由定性向定量转化。设模糊优先关系矩阵 B 是方案论域 $A=\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$ 上的一个 m 值矩阵 $B=(b_{ij})_{m \times m}$ 。其中, 当 $b_{ij}=1$ 时, 表示 A_i 优于 A_j ; 当 $b_{ij}=0.5$ 时, 表示 A_i 同于 A_j ; 当 $b_{ij}=0$ 时, 表示 A_i 劣于 A_j 。

1.1 建立模糊优先关系矩阵

设一目标决策问题有 n 个目标 U_k , 其相应的权重为 ω_k ($k=1, 2, \cdots, n$), 并设拟定了 m 个方案 A_i ($i=1, 2, \cdots, m$), 方案 A_i 在目标 U_k 下按模糊优先关系矩阵取值为 b_{ik} ($i=1, 2, \cdots, m; k=1, 2, \cdots, n$) 其中 ($b_{ik}=1, 0.5, 0$), 于是得到模糊优先关系矩阵为

$$B_k = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mm} \end{bmatrix}_{m \times m}, (k=1,2,\cdots,n)。$$

1.2 将模糊优先关系矩阵转换为模糊一致矩阵

具体步骤如下

(1) 对模糊优先关系矩阵 $B_k=(b_{ij}^k)_{m \times m}$ 按行求和,

即 $r_i = \sum_{j=1}^m b_{ij}^k, (i=1, 2, \cdots, m)。$

(2) 确定 F_k 中的元素 $f_{ij}^k, f_{ij}^k = \frac{r_i - r_j}{2m} + 0.5。$

f_{ij}^k 反映了在目标 U_k 下, 方案 A_i 与方案 A_j 的相对优越性程度。 $f_{ij}^k=0.5$ 表示方案 A_i 与 A_j 等优; $0 \leq f_{ij}^k \leq 0.5$ 表示方案 A_j 优于 A_i , 且 f_{ij}^k 越大, A_j 越优于 A_i ; $0.5 \leq f_{ij}^k \leq 1$ 表示方案 A_i 优于 A_j , 且 f_{ij}^k 越大, A_i 越优于 A_j 。

1.3 计算优度值

根据模糊一致矩阵 $F_k=(f_{ij}^k)_{m \times m}$, 运用方根法计算方案 A_i 在目标 U_k 下的优度值 S_i^k

$$S_i^k = \frac{\bar{S}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{S}_i},$$

$$\bar{S}_i = (\prod_{j=1}^m f_{ij}^k)^{\frac{1}{m}}, (j=1, 2, \cdots, m)。$$

将 S_i^k ($i=1, 2, \cdots, m$) 从大到小排列就得到了各方案在目标 U_k 下的单目标优劣次序, 然后在此基础上, 计算各方案的整体优度值 T_i 即多目标总排序。

$$T_i = \sum_{k=1}^n \omega_k S_i^k,$$

按 T_i 的大小对各方案进行比较, 就得到最优方案。

2 实例分析^[3]

2.1 工程地质概况

广州地铁二号线磨碟砂车站基坑, 全长 201.5 m, 深约 10.5 m, 宽度各个方向不等, 最宽处有近 40 m, 基坑大致东西走向。由于淤泥质土层及淤泥质砂层平均厚度达到了 7.8 m, 是该基坑土层开挖的主要对象, 场地工程地质情况为:

(1) 人工填土, 本层厚度 1.5~6.2 m, 平均厚度 4.44 m。

(2) 海陆交互相沉积层: ①淤泥质土层, 该层分布广泛, 厚度 0.9~5.5 m, 平均厚度 2.74 m; ②海陆交互沉积砂层, 厚度 2.0~7.2 m, 平均厚度 5.15 m。

(3) 海相冲积砂层, 厚度 0.5~9.45 m, 平均厚度 4.05 m。

2.2 确定评价指标体系及拟采用的支护方案

对于地铁车站深基坑工程, 由于它在规模大小、场地限制、工程造价以及对环境的影响等诸多方面与一般的建筑深基坑有所不同。因此, 地铁基坑围护结构类型方案的选择, 对各种影响因素考虑的侧重点也不同。由于影响支护方案的因素较多, 评价因素应选择影响支护方案较大的因素, 略去次要的、影响小的因素, 而且选择的指标因素应具有普遍性, 避免单一的支护方案评价因素带来的局限性。根据地铁深基坑自身的特点, 通过查阅相关资料并征求专家意见, 确定地铁深基坑支护方案评价的指标 (因素) 集为: $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}=\{\text{适用范围、质量可靠性、安全性、总造价、施工进度、对周围环境的影响}\}$ 。按照广州地铁及广州地区的经验, 并考虑所处的工程地质条件, 该地铁深基坑工程拟采取如下几种支护形式: 方案一(p_1): 人工挖孔桩; 方案二(p_2): 钻孔灌注桩+钢支撑; 方案三(p_3): 地下连续墙; 方案四(p_4): LXX 工法。

根据调查所得数据及相关资料得出各个指标因素的逻辑评语集见表 1。

表 1 各支护方案的逻辑评语

Table 1 Logic judgments of different bracing projects

支护方案影响因素	人工挖孔桩(p_1)	钻孔灌注桩+钢支撑(p_2)	地下连续墙(p_3)	LXX 工法(p_4)
适用范围 U_1	好	很好	较好	好
质量可靠性 U_2	很好	很好	好	很好
安全性 U_3	差	一般	较好	较好
总造价 U_4	一般	较差	差	好
施工进度 U_5	好	一般	一般	很好
对环境的影响 U_6	好	较差	较好	较好

2.3 建立模糊优先关系矩阵

根据以上分析,该地铁深基坑工程拟采取 4 种支护方案 $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ 在 6 个目标 $u_k (k=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 下进行多目标决策方案优选,因此有 6 个模糊优先关系矩阵 $B_k = (b_{ij}^k)_{4 \times 4} (k=1, 2, 3, 4, 5, 6)$,通过比较可以得到如下优先关系矩阵:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 1.0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1.0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 \\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix}, B_6 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

2.4 将模糊优先关系矩阵改造成模糊一致矩阵

利用上述算法将模糊优先关系矩阵 B_k 改造成模糊一致矩阵 F_k

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.75 & 0.75 & 0.5 \\ 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0.75 & 0.75 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 \\ 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.375 & 0.188 & 0.188 \\ 0.625 & 0.5 & 0.312 & 0.312 \\ 0.812 & 0.688 & 0.5 & 0.5 \\ 0.812 & 0.688 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$F_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.625 & 0.75 & 0.375 \\ 0.375 & 0.5 & 0.625 & 0.25 \\ 0.25 & 0.375 & 0.5 & 0.125 \\ 0.625 & 0.75 & 0.875 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$F_5 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.688 & 0.688 & 0.375 \\ 0.312 & 0.5 & 0.5 & 0.188 \\ 0.312 & 0.5 & 0.5 & 0.188 \\ 0.625 & 0.812 & 0.812 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$F_6 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.875 & 0.688 & 0.688 \\ 0.125 & 0.5 & 0.312 & 0.312 \\ 0.312 & 0.688 & 0.5 & 0.5 \\ 0.312 & 0.688 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

2.5 单目标排序

利用方根法计算各方案在目标 u_k 下的优度值。所得结果如表 2。

表 2 各方案在目标 U_k 下的优度值

优度值方案	S_i^1	S_i^2	S_i^3	S_i^4	S_i^5	S_i^6
p_1	0.317	0.283	0.148	0.286	0.546	0.352
p_2	0.183	0.283	0.217	0.217	0.348	0.146
p_3	0.183	0.152	0.317	0.145	0.348	0.251
p_4	0.317	0.283	0.317	0.353	0.674	0.251

2.6 各因素权重的确定及多目标总排序

对于各指标权重的确定,可应用 Satty 提出来的 AHP 法^[4],按照各指标对支护方案的重要程度,进行两两比较判断,构造判断矩阵。相容性检验按下式进行

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - N}{RI(N-1)},$$

式中 CR 为判断矩阵的随机一致性比率; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; N 为判断指标个数; RI 为判断矩阵的平均一致性指标,对于 5~11 阶判断矩阵,其 RI 值列于表 3。

表 3 平均一致性指标 RI 取值表

N	5	6	7	8	9	10	11
RI	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当 $CR < 0.10$ 时,即认为判断矩阵具有较好的一致性,说明权重分配是合理的;否则,就需要调整判断矩阵,直到满足 $CR < 0.10$ 为止。根据各因素对设计方案影响的重要程度,建立各因素之间的两两比较判断矩阵 R (略),对 R 归一化并通过一致性检验后得到其权重: $\omega = (0.14, 0.14, 0.12, 0.3, 0.24, 0.06)^T$ 然后利用

$$T_i = \sum_{k=1}^n \omega_k S_i^k \text{ 计算出总体优度值为 } T_1=0.277, T_2=0.209, T_3=0.187, T_4=0.328.$$

由此可知: $T_4 > T_1 > T_2 > T_3$, 即方案四(LXK 工法)最优,该方案即为实际选用的方案。

3 结 语

(1) 基坑支护方案的优选是基坑工程设计中的一项重要工作,受较多因素的影响,而这些因素大多具有模糊性、相对性,无法对其进行直接量化,利用模糊数学的一些理论及方法能很快得出较理想、客观的

结果。

(2) 运用模糊数学方法时, 评价指标因素集的确对最终结果的影响也很大, 因此, 必须根据具体工程的实际情况及特点, 有重点地选择一些对方案影响较大的因素, 略去那些不太重要的因素。

(3) 实例分析表明: 本文所建立的地铁深基坑支护方案优选模糊一致矩阵模型, 具有概念清晰、理论严密、计算简便、适用范围广且评价结果客观可靠等优点, 与其它方法相比, 该方法可灵活处理各种复杂的决策问题, 易于编制程序, 同时避免了其它方法评价结果趋于均化而使分辨率不高的缺点, 利于在工程上推广。

参考文献:

- [1] 张 跃, 邹寿平, 宿 芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [2] 杨伦标. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995.
- [3] 万 文. 地铁基坑支护方案的模糊评价[J]. 探矿工程, 2003(1):57 - 86.
- [4] 许权柏. 层次分析原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.
- [5] 高大钊. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] Hwang C L, YoonK. Multi-Attribute Ecision-Making:a State of the Art Survey[M]. Berlin:Springer, 1981.
- [7] Kirwood C W, Sarin R K. Randing with partial information:a method and an application[J]. Operations Research, 1985, 33(3):33 - 48.
- [8] Kiyotada Hayashi. Multi-criteria aid for agricultural decisions using preference relations: methodology and application[J]. Agricultural Systems, 1998, 58(4):483 - 503.