

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2467-04

深基坑支护方案灰色物元分析优化模型及其应用

冯玉国^{1,2}, 王渭明¹

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 青岛 266510; 2. 山东正元建设工程有限责任公司, 济南 250101)

摘 要: 针对深基坑支护方案优化中各指标的不相容性和信息不完全性, 提出基于灰色物元分析的深基坑支护方案优化模型。该模型将备择方案、优化指标及其灰特征值作为灰色物元, 通过计算综合关联度进行排序, 得到相对最优的深基坑支护方案。结合工程实例, 采用深基坑支护结构的可靠性、造价、施工难度、工期和环境影响 5 项指标, 将该模型应用于具有 4 个备择方案的深基坑支护方案优化。与模糊优化理论模型进行了对比, 得到了一致的结果。灰色物元分析优化模型同时考虑了方案优化问题中各指标间的不相容性和其数值的灰色性, 概念清晰、方法合理, 结果更加符合实际。

关 键 词: 深基坑支护方案; 优化模型; 灰色物元分析; 关联系数

中图分类号: TU 12, TU 473

文献标识码: A

An optimization model of grey matter element analysis of supporting schemes for deep foundation pit and its application

FENG Yu-guo^{1,2}, WANG Wei-ming¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China;

2. Shandong Zhengyuan Construction Engineering Co., Ltd, Jinan 250101, China)

Abstract: In view of the incompatibility and grayness of indices in optimization of supporting scheme for deep foundation pit, an optimization model based on grey matter element analysis is presented. The model takes the scheme to be selected, optimization indices and its grey characteristic value as grey matter elements, and relative optimum supporting schemes for deep foundation pit is obtained by calculating the comprehensive relational degree. The practical example, with 4 supporting schemes for deep foundation pit, is introduced by using such indices as reliability, cost of construction, difficulty of construction, time limit for a project, and environment influence. Compared it with fuzzy optimization theory model, the result obtained is coincident. Considering both the incompatibility and grayness of indices in scheme optimization, the optimization model of grey matter element analysis is clear in concept and reasonable in method, the result is in accord with the practice.

Key words: supporting scheme for deep foundation pit; optimization model; grey matter element analysis; correlation coefficient

1 引 言

深基坑支护方案优化是根据某一深基坑工程所要达到的目标, 从众多可行方案中选出一个最佳方案^[1], 它是一个多目标的决策问题。由于在可供选择的方案中, 每种方案都有其各自的特点, 如有的造价低, 有的工期短, 有的环境污染小等。凭决策者的经验得出的结论往往不符合客观实际, 有时甚至造成决策失误, 给建设单位和施工单位带来重大经济损失。

根据“最优化原则”求解多目标的决策问题是一

理想的途径。但由于方案的有限性, 现实中“最优化原则”并不存在。另外, 由于人力、物力和财力的限制, 也不可能将所有方案一一进行比较, 因此, 在有限个离散方案中选择一个相对最优的方案即能达到优化的目的。考虑到深基坑支护方案优化的模糊性, 模糊数学方法在深基坑支护方案优化中得到较为广泛的应用^[2-8]。针对深基坑支护方案优化的信息不完全性, 阮永芬^[9]还提出了用灰色系统理论与方法确定深基坑支护方案。但深基坑支护方案各指标除了模糊性和灰色性外, 还具有不相容性。蔡文教授^[10]创立的物元分析理论为研究解决这类矛盾

问题提供了一种工具。该理论以可拓数学为基础,基于事物的功能目标与环境条件之间的可容性和事物系统的相关性,将现实的问题概括为相容性、不相容性问题并进行转化处理,将复杂问题抽象为形象化的模型,是一种解决多目标决策问题的新途径。本文在物元分析的基础上,结合灰色系统理论,建立了一种基于灰色物元分析的简便直观的深基坑支护方案优化模型,并将该模型应用于具有 4 个备选方案的深基坑支护方案优化。

2 灰色物元与灰色物元分析步骤

2.1 灰色物元

以“事物、特征、灰量值”组成的有序三元组来描述事物的基本元称为灰色物元^[11],简称灰元。

由于一个具体方案与其指标相应的灰量值不再是在指定范围内所有白数的全体,而是一个确知数值的数,即灰数白化值,用 $\tilde{\otimes}_{ji}$ ($j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, n$) 表示第 j 个方案第 i 项指标相应的灰数白化值,若以 $\tilde{\otimes}_{jn}$ 表示第 j 个方案 n 维灰元, C_{ji} 表示第 j 个方案第 i 项指标, M_j 表示第 j 个方案,则有:

$$\tilde{\otimes}R_{jn} = \begin{bmatrix} M_j & \\ C_1 & \tilde{\otimes}_{j1} \\ C_2 & \tilde{\otimes}_{j2} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & \tilde{\otimes}_{jn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 灰色物元分析步骤^[11-12]

(1) 构造 m 个方案的 n 维复合物元

为了分析方便,将诸方案的 n 维灰元组合在一起,则称 m 个方案的 n 维复合灰元,记作 $\tilde{\otimes}R_{mn}$, 即有:

$$\tilde{\otimes}R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \tilde{\otimes}_{11} & \tilde{\otimes}_{21} & \cdots & \tilde{\otimes}_{m1} \\ C_2 & \tilde{\otimes}_{12} & \tilde{\otimes}_{22} & \cdots & \tilde{\otimes}_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & \tilde{\otimes}_{1n} & \tilde{\otimes}_{2n} & \cdots & \tilde{\otimes}_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 构造理想方案 n 维物元

相对优化原则是构造 n 维标准灰色物元的依据。这个原则如下:

① 越大越优型

$$\tilde{\otimes}_{0n} = \tilde{\otimes}_{11} \vee \tilde{\otimes}_{12} \vee \cdots \vee \tilde{\otimes}_{1n} \quad (3)$$

式中: $\vee$ 为取大运算符号。

② 越小越优型

$$\tilde{\otimes}_{0n} = \tilde{\otimes}_{11} \wedge \tilde{\otimes}_{12} \wedge \cdots \wedge \tilde{\otimes}_{1n} \quad (4)$$

式中: $\wedge$ 为取小运算符号。

③ 适中型

按经验确定的灰数 $\tilde{\otimes}(u_{ji})$ 。

按相对优化原则,从 $\tilde{\otimes}R_{mn}$ 中选定各项指标相应灰数白化值 $\tilde{\otimes}_{ji}$ 中的最大值、最小值或适中值作为新的 n 维灰元内各项指标相应的灰数白化值,以 $\tilde{\otimes}_{0n}$ 表示,因而称之为理想方案 n 维物元,记为 $\tilde{\otimes}R_{0n}$, 即

$$\tilde{\otimes}R_{0n} = \begin{bmatrix} M_0 & \\ C_1 & \tilde{\otimes}_{01} \\ C_2 & \tilde{\otimes}_{02} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & \tilde{\otimes}_{0n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: M_0 为标准方案。

(3) 数据变换

由于各方案每一项指标的物理意义不同,导致数据量纲和数量级不相同,有必要对原始数据进行处理,使之无量纲化。在此采用均值化处理,即

$$\tilde{\otimes}'_{ji} = \frac{\tilde{\otimes}_{ji}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \tilde{\otimes}_{ji}} \quad (6)$$

(4) 构造关联系数灰色物元

若将经数据变换后的 n 维标准灰色物元记为 $\tilde{\otimes}r_n$, 各方案 n 维灰色物元为 $\tilde{\otimes}r_j$, 则在第 i 项指标 $\tilde{\otimes}r_0$ 与 $\tilde{\otimes}r_j$ 的关联系数复合灰色物元矩阵记为 $\tilde{\otimes}R_{\xi}$, 第 j 个方案第 i 项指标的关联系数灰量值记为 $\tilde{\otimes}(\xi_{ji})$ ($j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, n$), 则有:

$$\tilde{\otimes}R_{\xi} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \tilde{\otimes}(\xi_{11}) & \tilde{\otimes}(\xi_{21}) & \cdots & \tilde{\otimes}(\xi_{m1}) \\ C_2 & \tilde{\otimes}(\xi_{12}) & \tilde{\otimes}(\xi_{22}) & \cdots & \tilde{\otimes}(\xi_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_n & \tilde{\otimes}(\xi_{1n}) & \tilde{\otimes}(\xi_{2n}) & \cdots & \tilde{\otimes}(\xi_{mn}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tilde{\otimes}(\xi_{ji}) = \frac{\Delta \tilde{\otimes}'_{ji\min} + \rho \Delta \tilde{\otimes}'_{ji\max}}{\Delta \tilde{\otimes}'_{ji} + \rho \Delta \tilde{\otimes}'_{ji\max}} \quad (8)$$

式中: $\Delta \tilde{\otimes}'_{ji\max}$ 、 $\Delta \tilde{\otimes}'_{ji\min}$ 分别表示经数据变换后上式内所有灰量值绝对差中的最大值与最小值; $\Delta \tilde{\otimes}'_{ji}$ 表示经数据变换后标准方案与第 j 个方案在 i 项指标时的灰量值绝对差, 即

$$\Delta \tilde{\otimes}'_{ji} = |\tilde{\otimes}'_{ji} - \tilde{\otimes}'_r| \quad (9)$$

由于进行比较各方案指标相应的灰数数列经数据变换后互相相交,故 $\Delta\tilde{\otimes}'_{jimin}=0$; ρ 为分辨系数,一般取0.1~0.5时具有较高的分辨率,通常取0.5。

(5) 计算关联度

关联度是指各方案与理想方案关联性大小的量度,记为 $K_j(j=1, 2, \dots, m)$ 。由于关联系数比较分散,不便于比较,为此给每个指标赋权值 w_i ,将分散的各指标的关联系数 $\tilde{\otimes}(\xi_{ji})$ 集中为一个值——关联度 K_j ,即

$$K_j = \sum_{i=1}^n w_i \tilde{\otimes}(\xi_{ji}) \quad (10)$$

从而建立关联度复合灰元 $\tilde{\otimes}R_K$,即

$$\tilde{\otimes}R_K = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ K_1 & K_2 & \dots & K_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

(6) 优劣排序

按关联度大小,对方案进行优劣排序,从中选定最佳方案。

3 应用实例

某大厦有地下室2层,根据地层和周边环境条件,拟定了4种支护方案,即 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 悬臂钻孔灌注桩、 $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 人工挖孔灌注桩+旋喷桩、土钉锚喷网和 $\phi 800\text{ mm}$ 锚拉钻孔灌注桩。优化支护方案的主要依据是可靠性、造价、工程施工难度、工期、环境影响以及对其他工序的影响等^[13]。其中造价和工期为定量指标,可按定额或实际要求计算;其余为定性指标,可按其相对重要程度用0~1间的数值进行量化,这种量化需由经验丰富的专家才能确定较精确的数值。

因对其他工序的影响不大,可不作考虑。按上述方法,4种支护方案的量化指标见表1。

表1 4种支护方案的量化指标

Table1 Quantitative index for 4 kinds of supporting schemes

方案	可靠性	造价 /万元	施工难度	工期 /d	环境影响
$\phi 1\ 000\text{ mm}$ 悬臂钻孔灌注桩(I)	0.7	210	0.8	45	0.9
$\phi 1\ 200\text{ mm}$ 人工挖孔灌注桩+旋喷桩(II)	0.9	190	1.0	40	1.0
土钉锚喷网	0.8	170	0.9	35	0.8
$\phi 800\text{ mm}$ 锚拉钻孔灌注桩(IV)	1.0	245	0.9	50	0.8

注:混凝土锚喷网支护的工期不包括开挖时间。

3.1 建立复合物元矩阵

由表1得4个方案的5维复合物元矩阵:

$$\tilde{\otimes}R_{4,5} = \begin{bmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ C_1 & 0.7 & 0.9 & 0.8 & 1.0 \\ C_2 & 210 & 190 & 170 & 245 \\ C_3 & 0.8 & 1.0 & 0.9 & 0.9 \\ C_4 & 45 & 40 & 35 & 50 \\ C_5 & 0.9 & 1.0 & 0.8 & 0.8 \end{bmatrix}$$

3.2 确定理想方案的5维物元

按相对优化原则,得理想方案的5维物元矩阵:

$$\tilde{\otimes}R_{05} = \begin{bmatrix} & M_0 \\ C_1 & 1.0 \\ C_2 & 170 \\ C_3 & 0.8 \\ C_4 & 35 \\ C_5 & 0.8 \end{bmatrix}$$

3.3 数据变换

由式(6)进行数据变换得无量纲化复合物元矩阵:

$$\tilde{\otimes}R_{4,5} = \begin{bmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ C_1 & 0.823\ 5 & 1.058\ 8 & 0.941\ 2 & 1.176\ 5 \\ C_2 & 1.030\ 7 & 0.932\ 5 & 0.834\ 4 & 1.202\ 5 \\ C_3 & 0.888\ 9 & 1.111\ 1 & 1 & 1 \\ C_4 & 1.058\ 8 & 0.941\ 2 & 0.823\ 5 & 1.176\ 5 \\ C_5 & 1.028\ 6 & 1.142\ 9 & 0.914\ 3 & 0.914\ 3 \end{bmatrix}$$

理想方案物元矩阵为

$$\tilde{\otimes}R_{05} = \begin{bmatrix} & M_0 \\ C_1 & 1.176\ 5 \\ C_2 & 0.834\ 4 \\ C_3 & 0.889\ 9 \\ C_4 & 0.823\ 5 \\ C_5 & 0.914\ 3 \end{bmatrix}$$

3.4 构造关联系数灰色物元

由式(8)计算关联系数,得关联系数灰色物元矩阵:

$$\tilde{\otimes}R_{4,5} = \begin{bmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ C_1 & 0.353 & 0.117\ 7 & 0.235\ 3 & 0 \\ C_2 & 0.196\ 3 & 0.098\ 1 & 0 & 0.368\ 1 \\ C_3 & 0 & 0.222\ 2 & 0.111\ 1 & 0.111\ 1 \\ C_4 & 0.235\ 3 & 0.117\ 7 & 0 & 0.353\ 0 \\ C_5 & 0.114\ 3 & 0.228\ 6 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.5 建立关联度复合灰元 $\tilde{\otimes}R_K$

通过专家咨询,得各指标的权重向量 $w=[0.30, 0.20, 0.20, 0.20, 0.10]$,由式(10)计算关联度,

得复合灰元矩阵:

$$\tilde{\otimes} R_k = [K_j \quad 0.549 \quad 1 \quad 0.570 \quad 6 \quad 0.756 \quad 4 \quad 0.659 \quad 9]$$

3.6 综合排序

由关联度复合灰元矩阵可知, 4 个支护方案的优劣顺序依次是: 土钉锚喷网 > $\Phi 800$ mm 锚拉钻孔灌注桩 > $\Phi 1\ 200$ mm 人工挖孔灌注桩+旋喷桩 > $\Phi 1\ 000$ mm 悬臂钻孔灌注桩 (> 表示优先于), 土钉锚喷网支护方案是相对最优的方案, 这与用模糊优化理论模型得到的结果^[2]一致, 也与当地的地层条件相符。

4 结 论

(1) 用物元分析进行方案优化时, 其中特征的量值有可能是信息不完全的灰值。物元分析理论与灰色系统理论相结合建立的灰色物元分析能够同时处理多方案优化问题中方案之间指标的不相容性及其数值的灰色性, 结果更加符合实际。

(2) 实例分析表明, 灰色物元分析模型概念清晰、方法合理, 完全能够在深基坑支护方案优化中应用。

参 考 文 献

- [1] 冯玉国. 深基坑支护方案综合评价模糊优化理论模型及其应用[J]. 岩土工程技术, 2001, (1): 38—40.
FENG Yu-guo. A fuzzy optimal theory model of comprehensive evaluating bracing deep foundation pit program[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2001, (1): 38—40.
- [2] 阮永芬, 兰世强. 深基坑支护的多目标多层次系统多维模糊决策[J]. 昆明理工大学学报, 2001, 26(5): 43—49, 55.
RUAN Yong-fen, LAN Shi-qiang. The pattern of multi-decision making for multistage and multi-objective system on deep foundation pit[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2001, 26(5): 43—49, 55.
- [3] 程楠, 祝彦知. 深基坑支护体系的模糊积分多元决策研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(8): 121—126.
CHENG Nan, ZHU Yan-zhi. Decision study of multiple-stage fuzzy integral on deep foundation bracing system[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2002, 22(8): 121—126.
- [4] 王广月. 深基坑支护决策的信息熵模糊层次分析模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 737—739.
WANG Guang-yue. Information entropy fuzzy analytic hierarchy process model for retaining decision making of deep foundation pits[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(5): 737—739.
- [5] 张尚根, 陈灿寿, 夏炎. 深基坑支护方案的模糊优选模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2046—2048.
ZHANG Shang-gen, CHEN Can-shou, XIA Yan. Fuzzy optimization model of support scheme for deep foundation pit and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 23(12): 2046—2048.
- [6] 张海涛, 何亚伯, 田水. 深基坑支护方案多目标模糊优选决策研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(3): 49—56.
ZHANG Hai-tao, HE Ya-bo, TIAN Shui. Multiobjective fuzzy optimum seeking decision research on bracing schemes for deep foundation pits[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2004, 37(3): 49—56.
- [7] 肖武权, 冷伍明. 深基坑支护结构设计的优化方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1201—1211.
XIAO Wu-quan, LENG Wu-ming. Optimization methods of retaining structure in deep foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1201—1211.
- [8] 曹文贵, 张永杰, 赵明华. 基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 66—71.
CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie, ZHAO Ming-hua. Study on interval relative fuzzy optimization method to determining support schemes for foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(1): 66—71.
- [9] 阮永芬, 叶燎原. 用灰色系统理论与方法确定深基坑支护方案[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1203—1206.
RUAN Yong-fen, YE Liao-yuan. Determination of deep foundation pit supporting scheme by using the gray system theory and method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1203—1206.
- [10] 蔡文. 物元分析[M]. 广州: 广东高等教育出版, 1987.
- [11] 肖芳淳. 灰色物元分析的研究[J]. 强度与环境, 1997, (1): 59—64.
XIAO Fang-chun. Study for grey matter-element analysis[J]. *Structure & Environment Engineering*, 1997, (1): 59—64.
- [12] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [13] 黄运飞. 深基坑工程实用技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.