

文章编号: 1000-7598-(2007)06-1201-05

深基坑支护结构设计的优化方法

肖武权, 冷伍明

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 对深基坑支护方案和所选支护类型细部结构的设计计算两个方面的优化进行了探讨。运用多目标决策模糊集理论和层次分析法来优选具有多种属性和模糊特性的深基坑支护方案。通过确定决策变量、目标函数、约束条件(如强度、尺寸、位移等)和优化算法等来优选所选定的支护类型细部结构, 达到成本最低的目的。利用软件 Matlab 6.5 比较容易求解这样一个非线性有约束的多元函数的最小值。工程实例研究表明: 在优化深基坑支护方案和支护类型的细部结构方面有很好的效果。

关 键 词: 深基坑; 支护方案; 细部结构; 优化设计

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Optimization methods of retaining structure in deep foundation pit

XIAO Wu-quan, LENG Wu-ming

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The optimization methods including schemes of the supporting system and the detailed calculation and design of the selected program for deep foundation pit, are studied. Using multi-objective decision making fuzzy set analysis and analytical hierarchy process, the optimized project of the retaining system that is of the multiple attribute and fuzzy property is selected. Through the selection of decision variables, objective function, constraint condition (i.e. strength, size, displacement etc.) and optimization algorithm, the detailed structure of the selected program can be optimized in order to minimize the cost of construction. By the software Matlab 6.5, it is easy to solve this minimized value of nonlinear constraint minimization value. A practical example study shows that there is better effect on both selecting the retaining program and deciding the detailed structure.

Key words: deep foundation pit; scheme of retaining system; detailed structure; optimized design

1 引 言

一个优化的深基坑支护结构设计既要保证支护结构施工过程和周围环境安全, 又要在满足安全前提下节约造价、缩短工期和方便施工。深基坑支护结构优化可分二级设计的优化, 即设计方案优化和在方案确定后结构细部的设计计算优化, 通过二者优化的结合, 可减少优化设计计算工作量, 并能使最终深基坑支护设计达到最优优化。

2 支护结构方案的优化

支护结构的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。由于深基坑工程是一个相当复杂的系统工程, 其支护结构的优选受许多确定和不确定因素, 亦即模糊因素的制约, 很难用费用最低的单目标优化准则做出最佳决策^[1]。深基坑支护结构设计方案包括可靠性、造价、施工难度、工期、环境影响等诸多属性, 这些属性中有些是模糊的。运用多目标决策模糊集理论, 能够较好地用于这样一个具有多种属性和模糊特性的深基坑支护方案的优选。

2.1 方案优选步骤

(1) 建立用于深基坑支护结构方案评价的目标(指标)特征值矩阵。

设有 n 个可供选择的支护方案, 每一个方案用 m 个指标来评价(如可靠性、造价、工期...), 则目标特征值矩阵(决策矩阵)为

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} = x_{ij} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 j 个支护方案第 i 个指标值。

式 (1) 指标值分量化 (如造价) 和定性指标 (如可靠度), 前者可直接用数字来表示, 后者采用直接评分, 用数值 2, 1.5, 1, 0.5, 0 分别表示最高、较高、中、较低和最低。

(2) 指标值归一化处理。

为了比较和计算, 须把式 (1) 各目标值进行归一化处理, 得指标 (目标) 优属度矩阵:

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (2)$$

式中: r_{ij} ($i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$) 为方案 j 中指标 i 的相对优属度, 其计算分效益型和成本型指标, 分别用 r_{1ij} 和 r_{2ij} 表示。

① 效益型指标, 即越大越优指标, 如可靠性, 按下式求 r_{1ij} :

$$r_{1ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

② 成本型指标, 即越小越优指标, 如造价, 按下式求 r_{2ij} :

$$r_{2ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (4)$$

(3) 多目标模糊综合评判确定最优方案

根据支护方案对优的隶属度 u_j 大小来确定最优方案。 u_j 的多目标模糊综合评判计算公式为

$$u_j = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m (q_i |r_{ij} - 1|)^p}{\sum_{i=1}^m (q_i r_{ij})^p} \right]^{2/p}} \quad (5)$$

式中: p 为距离参数, p 取 1 或 2, 分别代表海明距离和欧式距离; q_i 为目标 (指标) i 的权重, 满足 $\sum_{i=1}^m q_i = 1$ 。

q_i 的确定方法分主观赋权法和客观赋权法^[2], 在诸多方法中, 层次分析法是主观赋权法中的一种^[3], 该方法能反映决策者的意向、工程经验和专家判断等。用层次分析法确定权重的主要计算步骤

如下。

2.2 层次分析法计算权重 q_i 的步骤

(1) 建立层次结构模型

根据实际工程特点, 按安全可行、经济合理、保护环境、施工便捷 4 个基本准则^[4], 建立评价基坑支护方案的层次结构模型, 如图 1。

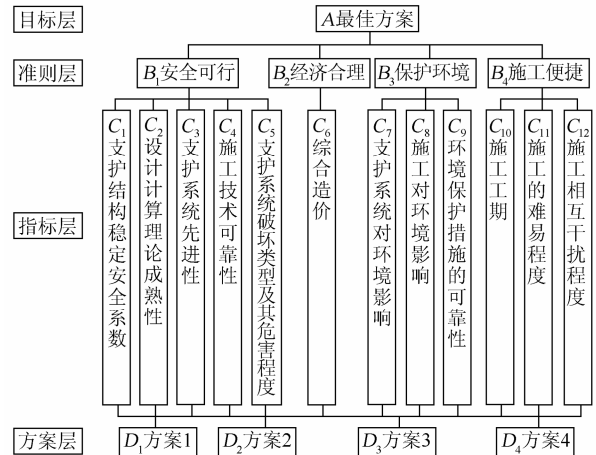


图 1 深基坑支护方案层次模型

Fig.1 Hierarchy model of retaining schemes of deep foundation pit

(2) 构造判断矩阵

判断矩阵元素值反映了人们对各因素相对重要性的认识, 一般采用 1~9 及其标度方法。判断矩阵 $A-B$ (相对于最佳方案 A , 准则层中的安全可行 B_1 、经济合理 B_2 、保护环境 B_3 和施工便捷 B_4 的相对重要性比较) 如表 1 所示, 表中 CI , CR , RI 分别为一致性指标、一致性比率、平均随机一致性指标。

表 1 $A-B$ 判断矩阵及一致性检验

Table 1 $A-B$ Judgment matrix and consistency verification

A	B_1	B_2	B_3	B_4	Q_{Bk} ($k=1, \dots, 4$)
B_1	1	1	2	3	0.351
B_2	1	1	2	3	0.351
B_3	1/2	1/2	1	2	0.189
B_4	1/3	1/3	1/2	1	0.109

注: $\lambda_{\max} = 4.012$; $CI = 0.004$; $RI = 0.9$; $CR = 0.0044 < 0.1$ 。

其他层次中的因素相对上一层某个因素的判断矩阵可按上述方法依次求得。

(3) 层次单排序及一致性检验

运用方根法计算同一层次各因素相对于上一层某元素相对重要性的排序权重^[5], 同时求出判断矩阵的特征向量 $\lambda_{\max}$ 解, 这一过程称层次单排序, 按式 (6) 计算一致性指标 CI 和一致性比率 CR 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式中: N 为判断矩阵阶数; RI 为平均随机一致性指标, 可直接查得^[3]。

当 $CR < 0.1$ 时, 可认为层次单排序结果具满意一致性, 否则需调整判断矩阵元素取值。判断矩阵 $A \sim B$ 的 $\lambda_{\max}$, W , CI , CR 值如表 1。其他各层次中因素相对上一层次某个因素的判断矩阵和相对权重 $[Q_j]$ 及一致性检验均按上述步骤和方法进行, 层次单排序计算结果见表 2。

表 2 层次单排序及方案总排序

Table 2 Single ordering weights and general ordering weights

B	指 标											
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
$B_1=0.351$	0.391	0.198	0.215	0.12	0.076	0	0	0	0	0	0	0
$B_2=0.351$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$B_3=0.189$	0	0	0	0	0	0	0.74	0.167	0.094	0	0	0
$B_4=0.109$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.74	0.167	0.094
指标总权重 Q_i	0.137	0.069	0.075	0.042	0.027	0.351	0.14	0.032	0.018	0.081	0.018	0.01

3 支护结构细部优化

在支护方案优选后, 需更进一步对所选方案的细部结构进行优化, 在满足支护功能前提下使支护结构工程造价最低。

完成一个实际问题的优化设计, 大致包括 4 部分内容: 决策(设计)变量、目标函数、约束条件和优化算法。对水泥土搅拌桩加一排锚杆组成的水泥土墙支护结构来说, 决策变量、目标函数、约束条件和优化算法的确定如下。

3.1 决定变量的确定

决策变量 $X = \{x_1, x_2, x_3\}$, x_1, x_2, x_3 分别代表锚杆距基坑底面距离、水泥土墙宽度和锚杆长度。其中 x_1 为一级决策变量, 而桩长、锚杆钢筋截面积为中间变量, 不作为决策变量。

3.2 目标函数的确定

以整个支护结构的主要材料总造价最低建立目标函数 F :

$$F = f(x_1, x_2, x_3) = C_f L + C_m x_3 \rightarrow \min \quad (8)$$

式中: C_f , C_m 为搅拌桩单价(元/m)和锚杆单价(元/m); L 为搅拌桩总长度(m), $L = x_2 L_1 L_2 n'$; L_1 为基坑周长(m); L_2 为单根桩桩长(m), 可表示为决策变量 x_1 的函数; n' 为每 m^2 搅拌桩桩数。

3.3 约束条件

(1) 强度约束^[6]:

水泥土墙墙体强度约束, 包括:

(4) 层次总排序及一致性检验

计算指标层中的各指标因素相对于最高层的相对重要性权重, 即指标因素总权重, 该过程称层次总排序, 如表 2 所示。

$$Q = (Q_1 \quad Q_2 \quad \dots \quad Q_n) \quad (n=12) \quad (7)$$

由表 2 得深基坑支护方案评价指标体系的指标因素总权重向量:

$$Q = (0.137 \quad 0.069 \quad 0.075 \quad 0.042 \quad 0.027 \quad 0.351 \quad 0.14 \quad 0.032 \quad 0.018 \quad 0.081 \quad 0.018 \quad 0.01)$$

$$1.25\gamma_0\gamma_{cs}z + \frac{M}{W} \leq f_{cs} \quad (9)$$

$$\frac{M}{W} - \gamma_{cs}z \leq 0.06f_{cs} \quad (10)$$

式中: γ_0 为基坑重要性系数; γ_{cs} 为水泥土墙平均重度; z 为墙顶至计算截面的深度; f_{cs} 为水泥土开挖龄期抗压强度设计值; M 为水泥土墙截面弯矩设计值; W 为水泥土墙截面模量。

锚杆钢筋强度约束:

$$A_s \geq \frac{T_d}{f_y \cos \theta} \quad (11)$$

式中: A_s 为锚杆钢筋截面积; T_d 为锚杆水平拉力设计值; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; θ 为锚杆与水平面的夹角。

(2) 尺寸约束

$$\left. \begin{aligned} a_1 &\leq x_1 \leq b_1 \\ a_2 &\leq x_2 \leq b_2 \\ a_3 &\leq x_3 \leq b_3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(3) 位移约束:

$$\delta \leq [\delta] \quad (13)$$

式中: δ 为计算墙顶位移; $[\delta]$ 为允许位移。

3.4 优化算法

水泥土墙加锚杆支护结构的优化在数学上属于一类具有不等式约束的非线性规划问题, 可采用动态规划法编程进行计算, 本次直接利用软件 Matlab6.5 优化工具箱进行计算。

4 工程实例

广州市广园东铁路职工住宅基坑深为 6.5 m, 平面上为 79.5 m×35.7 m 的矩形, 安全等级为 2 级, 主要土层类型和设计计算参数如表 3。

表 3 土层类型及主要计算参数
Table 3 Soils types and main calculation parameters

土层	土层名	厚度 /m	天然重度 /kN·m ⁻³	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(^o)
1	杂填土	1.2	18.5	10	10
2	淤泥质土	3	17.6	12	5
3	粉质黏土	2.9	19	28	15
4	粉土	3.3	20	32	16
5	粉质黏土	5	19	28	15

4.1 支护方案的优选

根据场地地质条件、周边建筑物特点和环境要求, 经专家讨论, 可行的基坑支护方案有下列 4 种: 水泥土搅拌桩墙(d₁)、水泥土搅拌桩加一排锚杆(d₂)、悬臂桩(d₃)、单支点排桩(d₄), 后 2 种方案加搅拌桩止水帷幕。按有关规范^[6, 7]计算和由专家组成员确定图 1 中 C₁~C₁₂ 共 12 个指标值, 4 种方案各指标值如表 4 所示。

表 4 各支护方案指标值
Table 4 Quantified indices of different projects

指标	方案			
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
C ₁	1.1	1.4	1.7	1.9
C ₂	0.9	0.9	1	1
C ₃	0.8	1	0.7	0.7
C ₄	0.7	0.8	1	1
C ₅	1	0.9	0.8	0.7
C ₆	153	143	187	196
C ₇	1.1	0.5	0.6	0.2
C ₈	0.9	1	0.8	0.9
C ₉	0.5	0.5	1	1
C ₁₀	30	35	50	60
C ₁₁	0.5	0.5	1	1
C ₁₂	0.6	1	0.6	1

按式 (2)~(4), 归一化后优属度矩阵 **R** 如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.375 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0.333 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.333 & 1 & 1 \\ 0 & 0.333 & 0.667 & 1 \\ 0.81 & 1 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0.667 & 0.556 & 1 \\ 0.5 & 0 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0.833 & 0.333 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据表 2 所得 Q_i 值按式 (5) 计算各支护方案对优的隶属度 u_j 大小分别为 (计算中 $p=2$): $u_1=0.711$, $u_2=0.886$, $u_3=0.161$, $u_4=0.253$ 。

很明显, 4 种方案中最优为方案 2, 即水泥土搅拌桩加一排锚杆, 该方案也为实际采用。

4.2 支护结构的细部优化

该基坑有关参数如下: $L_1=230.4$ m, $n'=6.25$, $C_f=45$ 元/m, $C_m=90$ 元/m, $\gamma_0=1.0$, $\gamma_{cs}=20$ kN/m³, $f_{cs}=700$ kPa。

尺寸约束: $2.5 \leq x_1 \leq 4.5$ m; $2.5 \leq x_2 \leq 5$ m; $12 \leq x_3 \leq 25$ m。

位移约束: 安全等级为 2 级的水泥土墙墙顶其容许变形为 $0.01 \times$ 基坑深度^[7]。因此, $[\delta]=0.01 \times 6.5$ m = 0.065 m = 6.5 cm。

其他约束可表示为决策变量的函数, 直接用软件 Matlab6.5 优化软件包中求非线性规划由约束多元函数最小值, 求得最优决策变量值如下: $x_1=4$ m, $x_2=2.9$ m, $x_3=15$ m。

最优值也即满足约束的最小造价, $F=143.5$ 万元。

如上所述, 在诸多决策变量中, 锚杆位置 x_1 是一级变量, x_1 取值越小, 造价越低, 但墙顶位移越大, 不能满足变形要求, 如表 5 所示。

表 5 锚杆位置与造价、位移关系
Table 5 Relation between the position of anchor and cost as well as displacement

参数	x_1 / m			
	4.5	4	3.5	3
F / 万元	145.7	143.5	135.5	122.1
δ / cm	3.2	5.8	9.4	15.9

实际工程的设计按照最优化决策变量进行, 即锚杆位置距基坑底 4 m 处, 水泥土墙宽度为 2.9 m 的格栅形式, 锚杆长度为 15 m, 现场监测墙顶实际水平位移值为 4.2 cm。

5 结 论

(1) 深基坑支护设计的优化包括支护方案的优选和支护结构细部的优化。

(2) 深基坑支护方案具有多属性和模糊性特征, 因此, 可用多目标决策模糊集理论和层次分析法来优选深基坑支护方案。

(3) 通过确定目标函数、决策变量、约束条件和优化算法来优化已选定的支护方案的细部构造。