基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法研究

曹文贵，张永杰，赵明华
（湖南大学岩土工程研究所，湖南 长沙 410082）

摘 要：首先，在深入研究基坑支护方案确定之影响因素基础上，确定出其主要影响因素及评价指标，并根据影响因素与评价指标的层次性和模糊性特点建立出基坑支护方案确定的综合优化评价模型；其次，针对评价指标取值不确定性特点提出采用区间数表示其属性值的方法，并通过探讨有关区间属性值与区间数权向量确定方法及区间关联分析方法等问题，从而建立出基坑支护方案的区间关联度分析方法；然后，引进相对优势度分析方法，建立出基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法；最后，通过工程实例计算，并与其它分析方法进行对比分析，表明了该方法的可行性与合理性。

关键词：基坑支护；综合优化评价模型；区间关联度；相对优势度分析；模糊优化
中图分类号：TU43 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0066－06

作者简介：曹文贵(1963－)，男，湖南南县人，教授，博士生导师，从事岩土工程教学与研究工作。E-mail: cwglyp@public.cs.hn.cn。

Study on interval relative fuzzy optimization method to determinine support schemes for foundation pits

CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie, ZHAO Ming-hua
(Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: First, the main factors and evaluating indices were decided based on the deep researches on factors to determine support schemes for foundation pit, and a comprehensive optimization evaluation model was established according to their hierarchy and fuzziness. Secondly, an approach to represent the attribute value of evaluating indices by adopting interval numbers were suggested according to the uncertainty feature, and by studying such questions as the determining method of interval attribute values and interval weight vectors, as well as interval relative analytic method and so on, the calculating method of interval relative degree for support schemes of pit foundations was developed. Then, the analytic method of degree of relative superiority was introduced to set up the interval relative fuzzy optimization method to determinine support schemes for foundation pits. Finally, the feasibility and rationality of the proposed method was shown by the practical engineering calculation and comparative analysis with other methods.

Key words: foundation pit support; comprehensive optimization evaluation model; interval relative degree; analysis of degree of relative superiority; fuzzy optimization

0 引 言

由于基坑支护方案确定的影响因素广泛，而且具有层次性和模糊性，因而，其评价指标的取值具有不确定或区间性，所以，如何针对基坑工程支护方案确定所具有的这些特点选择最优支护方案成为基坑工程支护方案顺利实施的关键。为此，阮永芬[1]采用灰色系统理论确定最优支护方案，建立了基坑支护体系分层递阶结构图，但其未考虑各因素因权重不同而对方案选择产生的影响；廖躲武[2]基于不完全信息下的MADM 法对基坑支护方案选择进行多属性决策分析，虽采用权重突出不利因素的影响，却不能反映具体的影响程度，且未给出区间数决策矩阵与权重确定方法；王广月[3-4]分别将信息熵与模糊物元理论及层次分析法相结合对基坑支护方案进行选择，但所考虑因素不够全面，且不能体现其层次性及取值不确定性；张尚根[5]和徐杨青[6]采用模糊优化决策模型提出了基坑支护方案的优化确定方法，但文献[5]考虑因素过于单一，缺乏统一的评价指标体系，而文献[6]在评价过程

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50578060）；湖南省自然科学基金资助项目（03JJY5024）
收稿日期：2007－03－22

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中未能体现评价指标所具有的层次性，且它们均未反映指标值及权重确定时所具有的不确定性；戴佑斌[7]则采用模糊一致矩阵理论对地铁深基坑支护方案进行优选，其同样具有文献[5，6]所存在的问题。由此可以看出，现有基坑支护方案的确定方法虽然可行，但仍存在诸多不足，如缺乏统一的层次性评价指标体系，评价指标属性值及其权重值不能反映影响因素的不确定性，因此，有必要对现有基坑支护方案确定方法进行改进，这也正是本文研究的核心内容。

本文将在深入研究基坑支护方案确定的影响因素基础上，首先，根据主要影响因素及评价指标的层次性和模糊性特点，建立出基坑支护方案确定的综合优化评价模型，然后，引进区间数学理论，在探讨评价指标区间属性值及区间数权向量确定方法等基础上，采用区间关联分析法对区间关联度进行分析，最后，通过相对优势度分析确定基坑支护最优方案，进而建立出基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析方法，以期使基坑支护方案确定更趋合理化。

1　基坑支护方案确定的综合优化评价模型

基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法的关键之一就是建立基坑支护方案确定的综合优化评价模型，换句话说，就是确定基坑支护方案的影响因素与评价指标，其选择必须具有全面性，且模型的建立必须能够反映影响因素与评价指标的层次性与模糊性。为此，笔者通过深入研究现有基坑支护方法及工程实际，确定出基坑支护方案确定的综合优化评价模型，如图 1 所示。

本模型由方案层、指标层、准则层及目标层 4 个层次组成，分两级进行区间关联模糊优化分析，准则层含 5 个影响因素，指标层共含 17 个评价指标。

采用该模型确定基坑最优支护方案就是对方案层的 n 个支护方案以准则层的影响因素与指标层的评价指标为基础进行区间关联模糊优化分析，进而得到基坑最优支护方案，因此，必须给出基坑支护方案的区间关联模糊优化分析过程与方法。

2　基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析方法

运用区间关联模糊优化方法确定基坑支护方案，首先，必须建立评价指标区间属性值确定方法，并对其进行归一化处理，进而确定出理想最优方案区间数向量，然后，计算区间数权向量，并以此得到各支护方案的区间关联度，最后，对区间关联度进行相对优势度分析，从而，确定出基坑最优支护方案。上述即为基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析方法所要解决的关键问题，下文将分别予以阐述。

2.1　评价指标区间数决策矩阵确定方法

为了进行基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析，必须首先确定出能反映评价指标取值情况的区间属性值，评价指标有定性与定量两种类型，确定方法是不同的，下面将作具体介绍。

（1）定量评价指标区间属性值确定方法

定量评价指标在按规程计算其属性值时，由于存在各种不确定性因素的影响，所得属性值必然存在不确定性，难以用定值表示，为此，提出采用区间数表示定量评价指标属性值。

设准则层影响因素 p_i 所含指标层的定量评价指标 p_{ij} 对方案 D_k 的区间属性值为 $[x_{kij}^{\mathrm{L}}, x_{kij}^{\mathrm{R}}]$，其中，$i=$

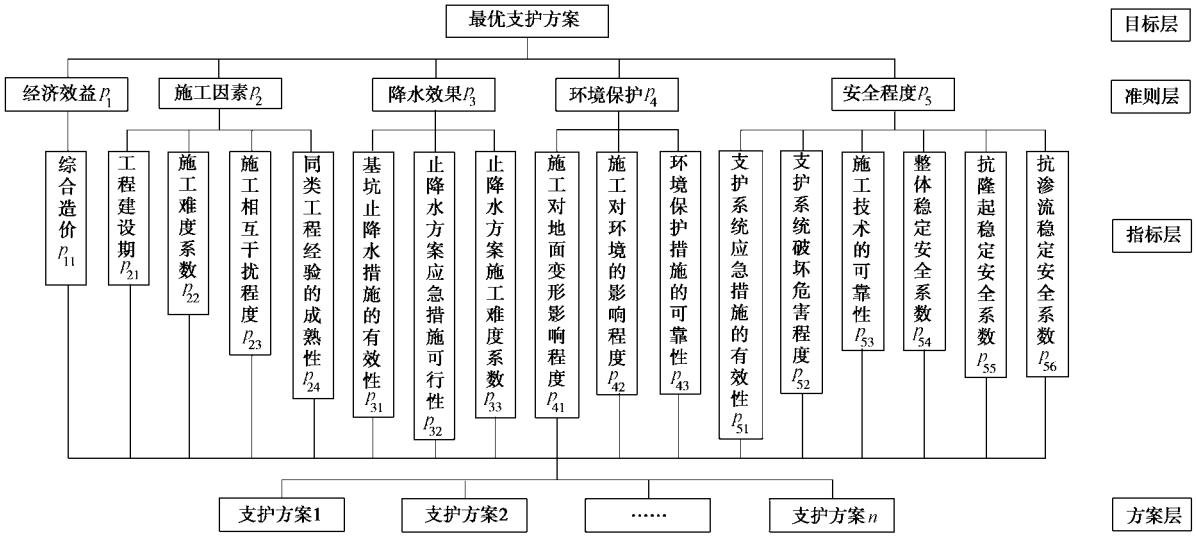


图 1　基坑支护方案确定的综合优化评价模型

Fig. 1 Comprehensive optimization evaluation model to determine supporting schemes for foundation pits

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1,2,…,5 为准则层中影响因素个数，j 为指标层的第 j 个评价指标，k=1,2,…,n 为基坑支护方案个数，x_{kij}^{L} 与 x_{kij}^{R} 为区间数左右界限值，可由定量指标计算方法按其参数取可能最小值与最大值分别计算得到。本文模型中属于定量评价指标的仅为综合造价（p_{11}）、工程建设工期（p_{21}）、整体稳定安全系数（p_{54}）、抗隆起稳定安全系数（p_{55}）与抗渗流稳定安全系数（p_{56}）5 个。

（2）定性评价指标区间属性值确定方法

若 p_{ij} 为基坑支护工程中定性评价指标，由定性评语确定其属性值时，存在更大的不确定性，且难以给出其确定性取值，此时，若用区间数表示属性值则更具可操作性。为此，本文参照 MacCrimmon 提出的两极比例法[8]建立评价指标定性评语转化为定量值的数轴法，即将 0～1 区间分为 9 段，分别采用不同的数值与可能性评语相对应，如图 2 所示。实际工程中，针对不同评价指标由 3～5 个专家根据具体情况给出其定性评语，并由图 2 得相应定量值，进而统计可得定性评价指标区间属性值。

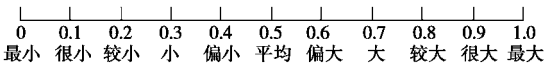


图 2 数轴法的指标转换

Fig. 2 Index change of number axis method

由上述方法确定的定量或定性评价指标区间属性值可表示成矩阵形式，即区间数决策矩阵，记为

$$\boldsymbol{X}_i=\begin{bmatrix}[x_{1i1}^{\mathrm{L}},x_{1i1}^{\mathrm{R}}] & [x_{1i2}^{\mathrm{L}},x_{1i2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [x_{1ij}^{\mathrm{L}},x_{1ij}^{\mathrm{R}}]\\ [x_{2i1}^{\mathrm{L}},x_{2i1}^{\mathrm{R}}] & [x_{2i2}^{\mathrm{L}},x_{2i2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [x_{2ij}^{\mathrm{L}},x_{2ij}^{\mathrm{R}}]\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ [x_{ki1}^{\mathrm{L}},x_{ki1}^{\mathrm{R}}] & [x_{ki2}^{\mathrm{L}},x_{ki2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [x_{kij}^{\mathrm{L}},x_{kij}^{\mathrm{R}}]\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ [x_{ni1}^{\mathrm{L}},x_{ni1}^{\mathrm{R}}] & [x_{ni2}^{\mathrm{L}},x_{ni2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [x_{nij}^{\mathrm{L}},x_{nij}^{\mathrm{R}}]\end{bmatrix},\quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{X}_i$ 为影响因素 p_i 所含评价指标对 n 个支护方案的决策矩阵，其中，第 k 行表示由基坑支护影响因素 p_i 所含 j 个评价指标对支护方案 D_k 的区间属性值构成的区间数向量；第 j 列表示由基坑支护影响因素 p_i 所含评价指标 p_{ij} 对 n 个支护方案的区间属性值构成的区间数向量。为了便于对区间数决策矩阵进行分析，必须对其进行归一化处理。

2.2 区间数决策矩阵归一化处理方法

基坑支护方案的评价指标集 p_{ij} 按经济性可分为效益型和成本型两种，效益型指标就是其值越大越好，成本型指标就是其值越小越好，由于它们的量纲及类型不同，在分析时必须首先进行归一化处理，使其转化为统一表达形式，即其值越大表示对基坑支护工程越有利。区间数决策矩阵中区间属性值归一化处理方法[9]如下所示。

若 p_{ij} 为效益型评价指标，则

$$\left.\begin{aligned} r_{kij}^{\mathrm{L}}&=x_{kij}^{\mathrm{L}}\Big/\sum_{k=1}^{n}x_{kij}^{\mathrm{R}},\\ r_{kij}^{\mathrm{R}}&=x_{kij}^{\mathrm{R}}\Big/\sum_{k=1}^{n}x_{kij}^{\mathrm{L}};\end{aligned}\right\}\quad (2)$$

若 p_{ij} 为成本型评价指标，则

$$\left.\begin{aligned} r_{kij}^{\mathrm{L}}&=(\frac{1}{x_{kij}^{\mathrm{R}}})\Big/\sum_{k=1}^{n}(\frac{1}{x_{kij}^{\mathrm{L}}}),\\ r_{kij}^{\mathrm{R}}&=(\frac{1}{x_{kij}^{\mathrm{L}}})\Big/\sum_{k=1}^{n}(\frac{1}{x_{kij}^{\mathrm{R}}})。\end{aligned}\right\}\quad (3)$$

其中，$r_{kij}^{\mathrm{L}},r_{kij}^{\mathrm{R}}\in[0,1]$ 分别为归一化评价指标区间属性值左右界限,效益型评价指标包含 p_{24}，p_{31}，p_{32}，p_{33}，p_{43}，p_{51}，p_{53} 与 p_{54}，其余为成本型评价指标。

评价指标区间属性值归一化处理后，区间数决策矩阵 $\boldsymbol{R}_i$ 可记为

$$\boldsymbol{R}_i=\begin{bmatrix}[r_{1i1}^{\mathrm{L}},r_{1i1}^{\mathrm{R}}] & [r_{1i2}^{\mathrm{L}},r_{1i2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [r_{1ij}^{\mathrm{L}},r_{1ij}^{\mathrm{R}}]\\ [r_{2i1}^{\mathrm{L}},r_{2i1}^{\mathrm{R}}] & [r_{2i2}^{\mathrm{L}},r_{2i2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [r_{2ij}^{\mathrm{L}},r_{2ij}^{\mathrm{R}}]\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ [r_{ni1}^{\mathrm{L}},r_{ni1}^{\mathrm{R}}] & [r_{ni2}^{\mathrm{L}},r_{ni2}^{\mathrm{R}}] & \cdots & [r_{nij}^{\mathrm{L}},r_{nij}^{\mathrm{R}}]\end{bmatrix}。\quad (4)$$

2.3 理想最优方案区间数向量确定方法

采用上述确定的基坑支护归一化区间数决策矩阵对基坑支护方案的确定进行区间关联模糊优化分析，还必须确定出关联分析所需理想最优方案的区间数向量，其由不同支护方案对应的评价指标最优区间属性值得到，为一假想向量，仅作为区间关联分析的参照体。

对于影响因素 p_i 所含评价指标 p_{ij}，其理想最优方案的区间数左右界限 r_{0ij}^{L} 与 r_{0ij}^{R} 可由评价指标 p_{ij} 对所有支护方案的归一化区间属性值上下界限确定，即

$$\left.\begin{aligned} r_{0ij}^{\mathrm{L}}&=\max_{1\le k\le n}r_{kij}^{\mathrm{L}},\\ r_{0ij}^{\mathrm{R}}&=\max_{1\le k\le n}r_{kij}^{\mathrm{R}},\end{aligned}\right\}\quad (5)$$

则影响因素 p_i 所含评价指标的理想最优方案区间数向量为

$$\boldsymbol{S}_i=\{[r_{0i1}^{\mathrm{L}},r_{0i1}^{\mathrm{R}}],[r_{0i2}^{\mathrm{L}},r_{0i2}^{\mathrm{R}}],\cdots,[r_{0ij}^{\mathrm{L}},r_{0ij}^{\mathrm{R}}]\}\quad ,\quad (6)$$

将 $\boldsymbol{S}_i$ 与各基坑支护方案对应的影响因素所含评价指标区间属性值向量进行关联分析得其区间关联度，以此作为影响因素区间值，由上述方法可得到影响因素 p_i 的理想最优方案区间数向量为

$$\boldsymbol{S}=\{[r_{01}^{\mathrm{L}},r_{01}^{\mathrm{R}}],[r_{02}^{\mathrm{L}},r_{02}^{\mathrm{R}}],\cdots,[r_{05}^{\mathrm{L}},r_{05}^{\mathrm{R}}]\}\quad 。\quad (7)$$

至此，可得由 $\boldsymbol{S}$ 与 $\boldsymbol{S}_i$ 构成的基坑支护理想最优方案的区间数向量。

2.4 区间数权向量确定方法

将各基坑支护方案的归一化区间数决策矩阵与理想最优方案区间数向量进行区间关联分析，为了能

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

够反映不同评价指标对关联度的影响，进而突出个别不利评价指标对基坑支护方案选择的决定性影响，必须采用加权求和法计算关联度。因此，有必要探讨影响因素与评价指标权向量确定方法。

现有权向量确定方法主要由层次分析法、专家打分法及灰色关联分析法等，最常用的是层次分析法。但是，层次分析法是用定值描述两个评价指标间重要程度，实际过程中很难操作，为此，首先，采用区间数表示重要程度取值，得到区间数比较矩阵，然后，通过区间层次分析法得到影响因素 p_i 的区间数权向量 $\boldsymbol{W}=\{[w_1^{\mathrm{L}},w_1^{\mathrm{R}}],[w_2^{\mathrm{L}},w_2^{\mathrm{R}}],\cdots,[w_5^{\mathrm{L}},w_5^{\mathrm{R}}]\}$ 及其所含评价指标 p_{ij} 的区间数权向量 $\boldsymbol{W}_i=\{[w_{i1}^{\mathrm{L}},w_{i1}^{\mathrm{R}}],[w_{i2}^{\mathrm{L}},w_{i2}^{\mathrm{R}}],\cdots,[w_{ij}^{\mathrm{L}},w_{ij}^{\mathrm{R}}]\}$，以此进行关联分析，其将更具合理性与可操作性。区间层次分析法计算过程可参考文献[10]。

2.5　区间关联度确定方法

采用归一化决策矩阵、理想最优方案区间数向量及区间数权向量进行基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析，必须建立出区间关联度确定方法。由灰色理论可知，对于基坑支护方案 D_k，影响因素 p_i 所含评价指标 p_{ij} 的归一化区间属性值 $[r_{kij}^{\mathrm{L}},r_{kij}^{\mathrm{R}}]$ 与理想最优方案区间数向量 $\boldsymbol{S}_i$ 中 $[r_{0ij}^{\mathrm{L}},r_{0ij}^{\mathrm{R}}]$ 的关联系数[9]为

$$\xi_k(p_{ij})=\frac{\min\limits_i\min\limits_j\{L_{kij}\}+0.5\max\limits_i\max\limits_j\{L_{kij}\}}{L_{kij}+0.5\max\limits_i\max\limits_j\{L_{kij}\}}\quad,\quad(8)$$

式中，L_{kij} 为归一化区间值 $[r_{kij}^{\mathrm{L}},r_{kij}^{\mathrm{R}}]$ 与 $[r_{0ij}^{\mathrm{L}},r_{0ij}^{\mathrm{R}}]$ 的距离，记为[9]

$$L_{kij}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left|r_{0ij}^{\mathrm{L}}-r_{kij}^{\mathrm{L}}\right|^2+\left|r_{0ij}^{\mathrm{R}}-r_{kij}^{\mathrm{R}}\right|^2\right]^{1/2}\quad。\quad(9)$$

通过式（8）与（9）可得到所有基坑支护方案与理想最优方案对应评价指标的关联系数，然后，采用区间数权重加权求和得到基坑支护方案 D_k 的影响因素 p_i 对理想最优支护方案区间数向量 $\boldsymbol{S}_i$ 的区间关联度为

$$\zeta_{ki}=[\zeta_{ki}^{\mathrm{L}},\zeta_{ki}^{\mathrm{R}}]=\sum\xi_k(p_{ij})[w_{kij}^{\mathrm{L}},w_{kij}^{\mathrm{R}}]\quad。\quad(10)$$

于是，采用式（10）可得到反映影响因素 p_i 所含评价指标的区间关联度，参照模糊二级综合评判的思想[11]，将评价指标区间关联度作为影响因素的归一化区间属性值，并得到其理想最优方案区间数向量，然后，进行区间关联分析，得到能反映准则层影响因素与指标层评价指标综合影响的各基坑支护方案区间关联度 ζ_k。如何由各最终区间关联度 ζ_k 得到基坑最优支护方案，还须建立区间关联度排序方法。

2.6　区间关联度相对优势度分析方法

为了对区间关联度进行排序，将采用相对优势度分析方法，首先，计算区间关联度两两间的相对优势度，并将其写成判断矩阵，然后，由判断矩阵计算各支护方案对理想最优方案的隶属度值，则最大隶属度值所对应的支护方案即为基坑最优支护方案。具体计算方法如下。

对于任意区间关联度 $\zeta_k=[\zeta_k^{\mathrm{L}},\zeta_k^{\mathrm{R}}]$ 与 $\zeta_l=[\zeta_l^{\mathrm{L}},\zeta_l^{\mathrm{R}}]$ $(k,l=1,2,\cdots,n)$，$\zeta_k>\zeta_l$ 的相对优势度[12]记为

$$P(\zeta_k>\zeta_l)=\begin{cases}1-\dfrac{1}{2\exp\left(\dfrac{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_k^{\mathrm{L}}+\zeta_l^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}-\dfrac{1}{2}\right)} & \left(\dfrac{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_k^{\mathrm{L}}+\zeta_l^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}\geq\dfrac{1}{2}\right),\\ \dfrac{1}{2\exp\left(\dfrac{1}{2}-\dfrac{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_k^{\mathrm{L}}+\zeta_l^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}\right)} & \left(\dfrac{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}{\zeta_k^{\mathrm{R}}-\zeta_k^{\mathrm{L}}+\zeta_l^{\mathrm{R}}-\zeta_l^{\mathrm{L}}}<\dfrac{1}{2}\right)。\end{cases}\quad(11)$$

若 s_{kl} 表示区间数 $\zeta_k>\zeta_l$ 的相对优势度 $P(\zeta_k>\zeta_l)$，计算两两相对优势度可得到以 s_{kl} 为元素的相对优势度判断矩阵$\boldsymbol{[S]}=[s_{kl}]_{n\times n}$，则区间关联度 ζ_k 的隶属度值[12]为

$$u_k=\frac{1}{n(n+1)}\left(\sum_{l=1}^{n}s_{kl}+\frac{n}{2}-1\right)\quad。\quad(12)$$

至此，建立出基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析方法，以此对基坑支护方案进行选择将更能反映决策过程中的不确定性特点与工程实际。

3　工程实例分析

为了验证本文方法的合理性，结合某具体工程实际问题进行了深入研究，具体情况如下。

3.1　工程概况

某基坑工程[6]开挖深度为 6.5 m，开挖面积约 3000 m^2。场地东、西、北三侧紧临基坑边线均为天然地基 4～6 层住宅楼；在北侧坡顶约 5 m 远处还架设有一条煤气主管道。南侧紧贴城市交通干道，其下埋设有改造掩埋后的地下箱涵。土层主要由松散的杂填土（3.5 m 厚）和饱和流塑淤泥（6.0 m 厚）及软塑黏性土组成，土性极差；且建设场地狭窄，周边环境严峻。本工程基础采用静压预制桩，对基坑中土体变形要求严格。基坑工程设计重点是控制基坑边坡和坑底土体的变形，防止基坑开挖对周边环境和工程桩的影响。初步支护方案为喷锚网（D_1）、悬臂桩（D_2）、支护桩＋锚杆（D_3）与支护桩＋支撑（D_4），各方案均配以相同的 4 口深井降水的地下水处理措施。

针对工程实际及 4 种支护方案的特点，分别计算了综合造价、工程建设期与稳定安全系数的可能取值区间，并请 3～5 个专家给出了定性评价指标的定性评

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

语，统计结果如表 1 所示，其中，抗隆起稳定安全系数p_{55}与抗渗流稳定安全系数p_{56}根据文献[6]中的资料未能计算出，在此分析过程中不予考虑。

表 1 评价指标初始值

Table 1 Initial values of evaluating indices

目标	D_1	D_2	D_3	D_4
p_{11}	[120,130]	[180,190]	[270,280]	[200,210]
p_{21}	[40,45]	[30,35]	[50,55]	[40,45]
p_{22}	很大或最大	平均或偏大	较大或很大	偏小或平均
p_{23}	很大或最大	偏大或大	较大或很大	平均或偏大
p_{24}	平均或偏大	较大或很大	很大或最大	很大或最大
p_{31}	较大或很大	较大或很大	较大或很大	较大或很大
p_{32}	平均或偏大	平均或偏大	平均或偏大	平均或偏大
p_{33}	较大或很大	较大或很大	较大或很大	较大或很大
p_{41}	较大或很大	偏大或大	偏大或大	平均或偏大
p_{42}	大或较大	偏小或平均	大或较大	偏小或平均
p_{43}	较小或小	较小或小	平均或偏大	平均或偏大
p_{51}	偏大或大	大或较大	很大或最大	很大或最大
p_{52}	较大或很大	较大或很大	大或较大	平均或偏大
p_{53}	很小或较小	较小或小	偏小或平均	偏小或平均
p_{54}	[1.2,1.3]	[1.3,1.5]	[1.4,1.7]	[1.6,1.9]

3.2 基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析过程与结果

为确定基坑工程最优支护方案，将采用本文方法进行分析，具体实施过程如下。

（1）根据工程情况及定量与定性评价指标区间属性值确定方法得到相应各支护方案影响因素p_i所含评价指标的区间属性值，具体情况如表 2 所示，并按式（2）与（3）进行归一化处理，得到归一化区间数决策矩阵$\boldsymbol{R}_1$～$\boldsymbol{R}_5$。

表 2 定性评价指标区间属性值

Table 2 Interval attribute values of qualitative evaluating indices

目标	D_1	D_2	D_3	D_4
p_{22}	[0.9,1.0]	[0.5,0.6]	[0.8,0.9]	[0.4,0.5]
p_{23}	[0.9,1.0]	[0.6,0.7]	[0.8,0.9]	[0.5,0.6]
p_{24}	[0.5,0.6]	[0.8,0.9]	[0.9,1.0]	[0.9,1.0]
p_{31}	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]
p_{32}	[0.5,.0.6]	[0.5,.0.6]	[0.5,.0.6]	[0.5,.0.6]
p_{33}	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]
p_{41}	[0.8,0.9]	[0.6,0.7]	[0.6,0.7]	[0.5,0.6]
p_{42}	[0.7,0.8]	[0.4,0.5]	[0.7,0.8]	[0.4,0.5]
p_{43}	[0.2,0.3]	[0.2,0.3]	[0.5,0.6]	[0.5,0.6]
p_{51}	[0.6,0.7]	[0.7,0.8]	[0.9,1.0]	[0.9,1.0]
p_{52}	[0.8,0.9]	[0.8,0.9]	[0.7,0.8]	[0.5,0.6]
p_{53}	[0.1,0.2]	[0.2,0.3]	[0.4,0.5]	[0.4,0.5]

（2）由归一化区间数决策矩阵$\boldsymbol{R}_2$～$\boldsymbol{R}_5$及式（5）得到影响因素p_2～p_5所含评价指标的理想最优方案区间数向量$\boldsymbol{S}_2$～$\boldsymbol{S}_5$。

（3）采用区间层次分析法计算影响因素 p_1～p_5的区间数权向量 $\boldsymbol{W}$ 及其所含评价指标的区间数向量$\boldsymbol{W}_2$～$\boldsymbol{W}_5$分别为

$\boldsymbol{W}$={[0.16,0.18],[0.10,0.13],[0.20,0.21],[0.31,0.34],[0.20,0.22]}，

$\boldsymbol{W}_2$={[0.16,0.18],[0.21,0.24],[0.33,0.36],[0.28,0.31]}，

$\boldsymbol{W}_3$={[0.35,0.39],[0.28,0.32],[0.32,0.34]}，

$\boldsymbol{W}_4$={[0.43,0.46],[0.08,0.14],[0.43,0.46]}，

$\boldsymbol{W}_5$={[0.28,0.31],[0.21,0.25],[0.24,0.27],[0.23,0.26]}。

（4）针对归一化决策矩阵$\boldsymbol{R}_2$～$\boldsymbol{R}_5$，由式（8）与（9）计算$\boldsymbol{R}_2$～$\boldsymbol{R}_5$中归一化区间属性值$[r_{kij}^{\mathrm{L}}, r_{kij}^{\mathrm{R}}]$与$\boldsymbol{S}_2$～$\boldsymbol{S}_5$中$[r_{0ij}^{\mathrm{L}}, r_{0ij}^{\mathrm{R}}]$之间的关联系数$\xi_k(p_{ij})$，由式（10）计算影响因素 p_i 的区间关联度$[\zeta_{ki}^{\mathrm{L}}, \zeta_{ki}^{\mathrm{R}}]$（$k$=1～4,$i$=2～5），具体情况如表 3 所示，将$[\zeta_{ki}^{\mathrm{L}}, \zeta_{ki}^{\mathrm{R}}]$作为$p_2$～$p_5$的归一化区间属性值，由$\boldsymbol{R}_1$及式（5）得到影响因素$p_1$～$p_5$的理想最优方案区间数向量$\boldsymbol{S}$，计算关联系数，进而得到各基坑支护方案最终区间关联度分别为 ζ_1＝[0.47,0.53]，ζ_2＝[0.52,0.60]，ζ_3＝[0.57,0.63]，ζ_4＝[0.72,0.78]。

（5）由式（11）计算各区间关联度ζ_1～ζ_4的相对优势度，并得到相对优势度判断矩阵$\boldsymbol{[S]}$，进而由式（12）得隶属度u_1～u_4分别为 0.19，0.22，0.25 与 0.34，根据最大隶属度原则即可确定基坑最优支护方案为D_4方案，即“支护桩＋支撑”方案。

表 3 影响因素区间关联度

Table 3 Interval relational grades of factors

影响因素	D_1	D_2	D_3	D_4
p_2	[0.57,0.64]	[0.63,0.71]	[0.61,0.69]	[0.59,0.64]
p_3	[0.62,0.67]	[0.52,0.56]	[0.59,0.65]	[0.59,0.65]
p_4	[0.33,0.41]	[0.48,0.54]	[0.60,0.68]	[0.68,0.75]
p_5	[0.51,0.57]	[0.50,0.55]	[0.57,0.64]	[0.60,0.65]

针对该工程，文献[6]方法与本文分析结果相同，施工结果表明该方案满足工程要求，说明本文方法具有一定可行性，而且，本文方法所建立的综合优化评价模型更能全面反映各种因素的影响，且能体现评价指标及其权向量确定过程中所具有的不确定性，采用区间关联模糊优化分析方法确定基坑支护方案，增强了可操作性。

4 结 论

针对基坑支护方案确定之影响因素的复杂性、层次性、模糊性及取值不确定性，提出了基坑支护方案

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

综合优化评价模型，并综合运用区间数学、模糊数学与灰色理论建立出基坑支护方案确定的区间关联模糊优化分析方法，由此可得如下结论。

（1）本文提出的基坑支护方案确定的综合优化评价模型体现了方案层到目标层的逻辑关系，能充分反映各因素对基坑支护方案确定之影响的层次性与模糊性。

（2）采用区间数表示评价指标属性值及其权向量，更能体现基坑支护方案决策过程所具有的不确定性，并增强了其可操作性，并且，采用区间关联模糊优化分析则使方案确定过程定量与科学化，使基坑支护方案确定过程更趋合理化。

参考文献：

[1] 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 grey system theory and method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(7): 1203－1206. (in Chinese))

[2] 廖貅武, 吕培印. 深基坑支护方案的多属性决策分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(3): 490－493. (LIAO Xiu-wu, LU Pei-ying. Multi-attribute decisionmakinganalysis on selecting retaining scheme of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(3): 490－493. (in Chinese))

[3] 王广月, 刘　健, 芮洪范. 深基坑支护方案的模糊物元评价方法[J]. 山东大学学报, 2004, **34**(2): 84－88. (WANG Guang-yue, LIU Jian, RUI Hong-fan. Fuzzy matter-element evaluation method for supporting prcjects of deep foundation pit[J]. Journal of Shandong University, 2004, **34**(2): 84－88. (in Chinese))

[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**(12): 737－739. (WANG Guang-yue. Information entropy fuzzy analysis hierarchy process model for retaining decision making of deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 737－739. (in Chinese))

[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. (ZHAG Shang-gen, CHEN Chan-shou, XIA Yan. Fuzzy optimization model of support scheme for deep foundation pit and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004, **23**(12): 2046－2048. (in Chinese))

[6] 徐杨青. 深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(7): 844－848. (XU Yang-qing. Study on the optimum decision-making and evaluation model for the design of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(7): 844－848. (in Chinese))

[7] 戴佑斌, 张尚根, 周早生, 等. 模糊一致矩阵理论在地铁深基坑支护方案优选中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1162－1165. (DAI You-bing, ZHANG Shang-gen, ZHOU Zao-sheng, et al. Application of fuzzy consistent matrix theory to optimization of bracing projects for deep foundation pit of metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2005, **27**(10): 1162－1165. (in Chinese))

[8] MACCRIMMON K R, WEHRUNG D A. Taking risks: the management of uncertainty[M]. New York: The Free Press, 1986.

[9] 党耀国, 刘思峰, 刘　斌, 等. 多指标区间数关联决策模型的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, **36**(3): 403－406. (DANG Yao-guo, LIU Si-feng, LIU Bin, et al. Study on incidence decision making model of multi-attribute interval number[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, **36**(3): 403－406. (in Chinese))

[10] 魏毅强, 刘进生, 王绪柱. 不确定性 AHP 中判断矩阵的一致性概念及权重[J]. 系统工程理论与实践, 1994, **14**(7): 16－22. (WEI Yi-qiang, LIU Jin-sheng, WANG Xu-zhu. Concept of consistence and weights of the judgement matrix in the uncertain type of AHP[J]. Theory and Practice on System Engineering, 1994, **14**(7): 16－22. (in Chinese))

[11] 曹文贵, 张永杰. 地下结构岩体质量分类的变权重二级模糊综合评判方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1612－1618. (CAO Wen-gui， ZHANG Yong-jie. Study on two-stage fuzzy synthetic judgment method based on interval AHP analysis method to the classification of rock quality in underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1612－1618. (in Chinese))

[12] 段宝彬. 基于区间数的多级模糊优选模型[J]. 河海大学学报（自然科学版）, 2004, **32**(4): 478－480. (DUAN Bao-bin. Interval number based multiple fuzzy optimization model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, **32**(4): 478－480. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net