

路基软基处理方案优选的区间层次决策

颜可珍,朱向平,石 华

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:针对传统决策方法在评价指标量化和权值确定时主观性较强、误差较大的问题,综合运用区间数学理论法、层次分析法和区间关联分析法,建立了软土路基处理方案优选的区间层次决策法。通过对某工程软基处理方案进行优选,计算各方案的隶属度,得出各方案的优劣次序。研究表明:与模糊相似优先比等方法计算结果进行对比,优选结果一致;区间层次决策法充分考虑了主观判断的不确定性,将评价指标值和权值区间化,大大提高了决策精度,为路基软基处理方案决策提供了一种新方法。

关键词:道路工程;路基;软基处理;模糊优化;区间关联;隶属度

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Interval hierarchy optimization decision for soft ground improvement scheme

YAN Ke-zhen, ZHU Xiang-ping, SHI Hua

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: Aimed at the strong subjectivity and the big error of the evaluation index quantization and the weight decision of traditional decision methods, the interval hierarchy decision method was set up to optimize the soft ground improvement scheme by comprehensively applying the interval mathematics theory, the analytic hierarchy process and the interval relative analysis method. Taking a project for example, the order of the various programs was got by calculating the degree of membership. The results show that comparing with the other methods, the interval hierarchy decision can give a full consideration to the uncertainties of subjective judgement, the interval evaluation index value and the interval weight can greatly improve the decision accuracy, it provides a new method for soft ground treatment decision. 8 tabs, 1 fig, 13 refs.

Key words: road engineering; subgrade; soft ground improvement; fuzzy optimization; interval relation; membership degree

0 引 言

软土路基的处理对提高路基的稳定性和承载能力起着重要作用,软基处理方案优选具有一定的层

次性和模糊性,如何提高模糊决策的准确度,对软基处理方案的优选具有一定意义。近年来,研究者先后将模糊物元分析方法、层次分析法、灰色理论和智能辅助分析方法引入到软基处理方案的优选中,取

得了很多成果^[1-7]。但是,这些研究仍有不足之处:①采用层次单排序方法确定各指标权重,在判断各指标相对重要性时具有较大主观性;②用定量表示评价指标属性值,忽略了评价指标评判时具有的模糊区间属性;③没有充分考虑影响因素和评价指标之间的层次性;④可操作性不佳,受客观因素影响较大,计算过程无法校核。因此,现有决策方法虽具一定可行性,但仍需改进。

本文综合运用区间数学理论、层次分析法和区间关联分析法,提出了一种软基处理方案的区间关联模糊决策方法。首先,建立软基处理方案综合评价模型,运用专家打分法,得出各评价指标的区间属性值,通过建立区间判断矩阵,得出各指标区间权重;然后,结合层次分析法和区间关联分析法,得到准则层和指标层综合影响下的各处理方案的隶属度值;最后,对隶属度进行综合排序,得到最优软基处理方案。

1 软基处理方案综合评价模型

中国软土路基处理方案主要有换土垫层、轻质路堤、碎石桩、粉体搅拌桩、二灰桩、砂井预压和塑料排水板预压等。综合考虑经济、技术和资源环境 3 方面的因素来确定最优方案,根据影响因素和评价指标的层次性和模糊性特点建立模型,由 4 个层次组成,如图 1 所示。其中,准则层包含 3 个影响因素,用 $A_i(i = 1, 2, 3)$ 表示;指标层包含 8 个评价指标,用 $B_{ij}(j$ 为第 j 个评价指标)表示。

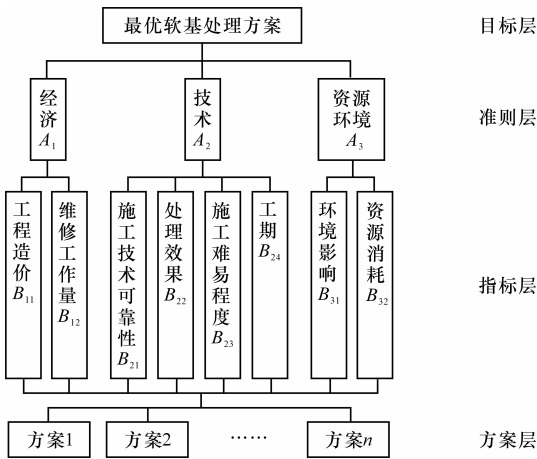


图 1 软基处理方案综合评价模型

2 区间关联模糊优化决策

2.1 准则层和指标层区间数权向量确定

组织专家及有关人员按照 1~9 标度对各指标两两之间的相对重要性程度进行打分,并将平均分作为判断的基数 r_{ij} 。1~9 标度值表示的意义见表 1。

表 1 判断标度值分析

标度值	含义
1	表示两个元素相比,具有同等重要性
3	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素稍重要
5	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素明显重要
7	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素强烈重要
9	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素极端重要
2,4,6,8	如果对事物的差别介于以上两者之间,取中间值

专家的判断分为 3 种类型:确定型、基本确定型和可能型。根据判断的可能性和不确定性,将判断的基数作为区间的中点,给出判断的可能取值范围或者变异程度,即区间宽度,一个判断的不确定性一般不超过 1,变异度不超过 $1/2$ ^[8]。从而形成区间判断矩阵 $\Psi_{ij} = [b_{ij}^-, b_{ij}^+]$ 。

$$b_{ij}^- = \begin{cases} r_{ij} \\ r_{ij} - \delta, \\ r_{ij} - 2\delta \end{cases}, \quad b_{ij}^+ = \begin{cases} r_{ij} \\ r_{ij} + \delta \\ r_{ij} + 2\delta \end{cases}$$

确定型
基本确定型
可能型

(1)

式中: σ 为变异度; $\delta = 1/6$ 。

判断矩阵各区间数的较小值组成矩阵 Ψ_{ij}^- ,较大值组成 $\Psi_{ij}^+, \Psi_{ij}^-, \Psi_{ij}^+$ 为数值型矩阵,求得各自最大特征值 $\lambda_{\max}^-, \lambda_{\max}^+$,及对应的特征向量 x^-, x^+ ,并进行一致性检验,即一致性指标 ρ_{CI} 的计算式为

$$\rho_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(2)

式中: n 为方案数; λ_{\max} 为特征值。

当 $\rho_{CR} = \rho_{CI}/\rho_{RI} < 0.01$ 时,判断矩阵具有满意的一致性,否则就需对判断矩阵进行调整。其中, ρ_{CR} 为一致性检验指标, ρ_{CI} 为一致性指标, ρ_{RI} 为平均随机一致性指标。

根据区间数特征根方法(IEM),可以求得第 i 个影响因素所含 j 个评价指标的区间数权向量 $w_{ij} = (w_{ij}^-, w_{ij}^+) = (kx^-, mx^+)$ ^[9]。其中

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_{ij}^+}}, m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_{ij}^-}}}$$

(3)

用相同的方法,可以确定出各影响因素对目标层的区间数权向量 w_i 。

2.2 评价指标区间属性值确定

2.2.1 定量指标

本模型中工程造价、施工工期属于定量指标,根据不同地区的工程资料及施工经验,确定其区间属性值。

2.2.2 定性指标

定性指标采用数轴法,用 0~1 之间的小数作

为评价指标区间属性值^[10]; 并采用专家评分法打分。组织 3 ~ 5 个专家进行打分, 得出各评价指标区间属性值, 用 (x_{eij}^-, x_{eij}^+) 表示第 e 个方案作用下指标 B_{ij} 的区间属性值。

2.3 规范化区间数决策矩阵

上述评价指标分别按成本型和效益型归一化^[10]。经过归一化处理, 区间数决策矩阵可以表示为 F_i , 即

$$F_i = \begin{bmatrix} (f_{1i1}^-, f_{1i1}^+) & \cdots & (f_{1ij}^-, f_{1ij}^+) \\ \vdots & & \vdots \\ (f_{mi1}^-, f_{mi1}^+) & \cdots & (f_{mij}^-, f_{mij}^+) \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: (f_{mij}^-, f_{mij}^+) 为区间数。

2.4 区间关联度确定

根据规范化区间数决策矩阵, 取各评价指标区间数上下限之和最大对应的区间数为最优, 当有多个相等时, 取区间数上限较大者为最优, 得出最优方案区间数向量 S_i ^[11]。即

$$S_i = \{[f_{0i1}^-, f_{0i1}^+], [f_{0i2}^-, f_{0i2}^+], \cdots, [f_{0ij}^-, f_{0ij}^+]\} \tag{5}$$

将 S_i 与各处理方案作用下的第 i 个影响因素所含评价指标的区间数向量进行区间关联分析, 得两者之间区间关联度。第 e 个方案作用下评价指标 B_{ij} 的规范化区间数 $[f_{eij}^-, f_{eij}^+]$ 与理想最优方案区间数 $[f_{0ij}^-, f_{0ij}^+]$ 的关联系数为 $\lambda_e(B_{ij})$, 即

$$\lambda_e(B_{ij}) = \frac{\min_e \min_j \{D_{eij}\} + 0.5 \max_e \max_j \{D_{eij}\}}{\{D_{eij}\} + 0.5 \max_e \max_j \{D_{eij}\}} \tag{6}$$

式中: D_{eij} 为规范化区间数与理想最优区间数的欧氏距离^[12]。

$$D_{eij} = \sqrt{\frac{[(f_{eij}^- - f_{0ij}^-)^2 + (f_{eij}^+ - f_{0ij}^+)^2]}{2}} \tag{7}$$

对关联系数加权求和, 得到影响因素 B_i 对第 e 个方案的区间关联度 ζ_{ei} , 即

$$\zeta_{ei} = (\zeta_{ei}^-, \zeta_{ei}^+) = \sum \{\lambda_e(B_{ij})(\omega_{ij}^-, \omega_{ij}^+)\} \tag{8}$$

将 ζ_{ei} 作为第 e 个方案作用下准则层影响因素 A_i 的区间属性值, 形成 e 个方案作用下的准则层影响因素区间数决策矩阵。归一化后, 将各区间数向量与理想最优方案区间数向量进行区间关联分析, 对关联系数加权求和, 得到所有影响因素对目标层的区间关联度 ζ_e 。

2.5 区间关联度排序

采用相对优势度分析方法对区间关联度进行排序, 对于 $\zeta_e = (\zeta_e^-, \zeta_e^+)$ 和 $\zeta_l = (\zeta_l^-, \zeta_l^+)$, $\zeta_e > \zeta_l$ 的相对优势度记为 $R_d(\zeta_e > \zeta_l)$ 。

$$R_d(\zeta_e > \zeta_l) =$$

$$\begin{cases} 1 - 0.5 \frac{1}{\exp(M_d - 0.5)} & M_d \geq 0.5 \\ 0.5 \frac{1}{\exp(0.5 - M_d)} & M_d \leq 0.5 \end{cases} \tag{9}$$

式中: ζ_l 为 l 方案的区间关联度;

$$M_d = \frac{\zeta_e^+ - \zeta_e^-}{\zeta_e^+ - \zeta_e^- + \zeta_l^+ - \zeta_l^-}$$

进而得到以 R_d 为元素的相对优势度判断矩阵 $[R_d]_{n \times n}$ 。

区间关联度 ζ_e 的隶属度值记为 u_e ^[13]。则有

$$u_e = \frac{1}{n(n+1)} \left(\sum_{l=1}^n R_d + \frac{n}{2} - 1 \right) \tag{10}$$

将各处理方案对应的隶属度值进行排序, 最大者即对应最优软基处理方案。

3 工程实例

选择某高速公路软基进行处理。计算行车速度为 120 km/h, 双向 4 车道, 路基宽 28 m, 全线长度 45.72 km。全线地处平坦水网化平原区和低洼湖荡平原区, 路基均为填方, 高度为 2.0 ~ 7.5 m。全线分布有厚度不等的软土, 需处理的软基长度为 32.211 km, 沿线第四系地层一片覆盖, 厚度巨大, 沿线不良地层主要分布在起点 K2+800 ~ K40+000, 本区软土均属高压压缩性低强度软土, 对路基的稳定均会产生较大影响, 需进行处理。文献[2]已经选出 4 种较适合方案, 组成方案集 $\{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ 为{振冲碎石桩, 塑料排水板, 二灰桩, 粉体搅拌桩}。

文献[2]采用的是模糊相似优先比的方法, 最后利用层次分析法得出最优方案, 其用定值反应评价指标属性值和权重, 没有体现评判的模糊性。本文方法统一用区间数表示指标值和权重, 最大程度体现了模糊评判方法的不确定性, 大大提高了评判的精确度。参照文献[2]的专家评分结果, 视专家判断为基本确定型, 由图 1 并结合工程资料得到表 2、下页表 3 ~ 表 5 的区间数判断矩阵。

表 2 准则层判断矩阵

指标	A_1	A_2	A_3
A_1	(1, 1)	$\left(\frac{1}{2+1/6}, \frac{1}{2-1/6}\right)$	(5 - 1/6, 5 + 1/6)
A_2	(2 - 1/6, 2 + 1/6)	(1, 1)	(5 - 1/6, 5 + 1/6)
A_3	$\left(\frac{1}{5+1/6}, \frac{1}{5-1/6}\right)$	$\left(\frac{1}{5+1/6}, \frac{1}{5-1/6}\right)$	(1, 1)

表 3 指标层判断矩阵

指标	B_{11}	B_{12}
B_{11}	(1,1)	$(3-1/6,3+1/6)$
B_{12}	$(\frac{1}{3+1/6},\frac{1}{3-1/6})$	(1,1)

表 4 指标层判断矩阵

指标	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}
B_{21}	(1,1)	$(\frac{1}{5+1/6},\frac{1}{5-1/6})$	(1,1)	$(\frac{1}{7+1/6},\frac{1}{7-1/6})$
B_{22}	$(5-1/6,5+1/6)$	(1,1)	$(3-1/6,3+1/6)$	$(\frac{1}{3+1/6},\frac{1}{3-1/6})$
B_{23}	(1,1)	$(\frac{1}{3+1/6},\frac{1}{3-1/6})$	(1,1)	$(\frac{1}{7+1/6},\frac{1}{7-1/6})$
B_{24}	$(7-1/6,7+1/6)$	$(3-1/6,3+1/6)$	$(7-1/6,7+1/6)$	(1,1)

表 5 指标层判断矩阵

指标	B_{31}	B_{32}
B_{31}	(1,1)	$(3-1/6,3+1/6)$
B_{32}	$(\frac{1}{3+1/6},\frac{1}{3-1/6})$	(1,1)

根据前述理论,求出所有矩阵区间下限矩阵和区间上限矩阵的最大特征值及对应的特征向量,并进行一致性检验,最后得出准则层数权向量 W 和指标层区间数权向量 W_1 、 W_2 、 W_3 。

$$w = \begin{bmatrix} w_{A_1} \\ w_{A_2} \\ w_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.346 & 3,0.357 & 0 \\ 0.543 & 0,0.568 & 6 \\ 0.088 & 1,0.088 & 5 \end{bmatrix}$$

$$w_1 = \begin{bmatrix} w_{B_{11}} \\ w_{B_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.741 & 9,0.757 & 5 \\ 0.247 & 7,0.252 & 9 \end{bmatrix}$$

$$w_2 = \begin{bmatrix} w_{B_{21}} \\ w_{B_{22}} \\ w_{B_{23}} \\ w_{B_{24}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.039 & 6,0.043 & 5 \\ 0.406 & 5,0.460 & 8 \\ 0.072 & 9,0.081 & 9 \\ 0.459 & 3,0.514 & 3 \end{bmatrix}$$

$$w_3 = \begin{bmatrix} w_{B_{31}} \\ w_{B_{32}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.247 & 7,0.252 & 9 \\ 0.741 & 8,0.757 & 5 \end{bmatrix}$$

在所有评价指标中,只有工程造价、施工工期为定量指标,其余均为定性指标。根据工程资料及工程实际得到定量指标取值区间,结果见表 6。

表 6 定量指标属性值

定量指标	方案			
	U_1	U_2	U_3	U_4
工程造价 / 万元	(214.3,284.9)	(64.3,86.9)	(128.6,174.0)	(160.7,217.5)
施工工期 /d	(139,182)	(383,518)	(128,173)	(128,173)

用 0 ~ 1 之间的小数字表示定性指标的相对优劣,根据专家评分得到定性指标的区间属性值,将所有指标归一化,得到归一化指标区间值,结果见表 7。

表 7 归一化指标区间值

定性指标	方案			
	U_1	U_2	U_3	U_4
B_{11}	(0.10,0.18)	(0.34,0.61)	(0.17,0.31)	(0.13,0.25)
B_{12}	(0.61,0.83)	(0.36,0.48)	(0.37,0.51)	(0.66,0.90)
B_{21}	(0.60,0.82)	(0.69,0.93)	(0.18,0.24)	(0.35,0.47)
B_{22}	(0.61,0.83)	(0.64,0.86)	(0.36,0.48)	(0.37,0.49)
B_{23}	(0.61,0.83)	(0.69,0.93)	(0.55,0.75)	(0.53,0.71)
B_{24}	(0.22,0.38)	(0.08,0.14)	(0.23,0.41)	(0.23,0.41)
B_{31}	(0.69,0.93)	(0.71,0.95)	(0.27,0.37)	(0.26,0.35)
B_{32}	(0.44,0.60)	(0.69,0.93)	(0.60,0.82)	(0.43,0.59)

通过前述理论,得出理想最优区间数向量。根据式(6)求得指标层各关联系数,对关联系数加权求和,得到各处理方案的区间关联度, $\zeta_1 = (0.716, 0.746)$, $\zeta_2 = (0.768,0.795)$, $\zeta_3 = (0.508,0.528)$, $\zeta_4 = (0.520,0.541)$ 。根据式(9)算出各处理方案的相对优势度判断矩阵,结果见表 8。

表 8 相对优势度判断矩阵

R_d	方案			
	U_1	U_2	U_3	U_4
1	0.500	0.205	0.993	0.990
2	0.795	0.500	0.998	0.997
3	0.007	0.002	0.500	0.368
4	0.010	0.003	0.632	0.500

根据式(10),求得各处理方案的隶属度值 $u = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{0.184, 0.215, 0.094, 0.107\}$ 。通过区间关联模糊优化决策,得出 4 种方案的优序关系为 $U_2 > U_1 > U_4 > U_3$,与文献[2]的基于模糊相似优先比的软基处理方案评价模型计算的结果一致。文献[2]结果的正确性在工程实际应用中得到了论证,表明该方法用于软基处理方案的决策是合理可行的,且对各处理方案的区分度较好。

4 结 语

(1)用区间数表示评价指标属性值,将专家根据主观判断得出的评分结果通过区间数来表达,可以更好地减少主观因素对结果带来的误差,大大提高了计算结果的可信度。

(2)根据区间数判断矩阵,通过区间层次分析方法,得出指标层和准则层的区间权重,解决了以往用

定量表示权向量而不能充分反映专家判断带来的主观误差,使结果更加准确。

(3)计算结果表明,本文方法对各处理方案的优劣具有较好的区分度,更便于决策者进行决策。

参考文献:

References:

- [1] 罗君君,郑俊杰,孙 玲.基于语言变量和熵权的公路软基处理方案的模糊物元决策分析法[J].公路交通科技,2009,26(5):12-16.
LUO Jun-jun, ZHENG Jun-jie, SUN Ling. Selection of alternatives of weak subgrade treatment using linguistic variable and entropy based fuzzy matter element decision analysis method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(5): 12-16.
- [2] 陈向阳.高速公路软基处理方案智能评价与优化方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [3] 冯仲仁,朱瑞赓,姚爱民.高速公路软基处理方案的多层次模糊决策[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):915-918.
FENG Zhong-ren, ZHU Rui-geng, YAO Ai-min. Multi-layer fuzzy decision for improvement of expressway foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 915-918.
- [4] 朱丽赓,赵 坤.路基软土层处理方案浅析[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(3):45-46,49.
ZHU Li-zhen, ZHAO Kun. Discussion on treatment scheme for soft soil layer of subgrade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(3): 45-46, 49.
- [5] 冯仲仁,陈向阳,鄢恒珍.基于灰色理论的软基处理方案决策模型[J].武汉理工大学学报,2004,26(10):38-41.
FENG Zhong-ren, CHEN Xiang-yang, YAN Heng-zhen. The decision model of the soft soil improvement methods based on grey system theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(10): 38-41.
- [6] 冯仲仁,汪爱兵.5参数高速公路软基处理方案 ANN 决策模型[J].岩土力学,2004,25(9):1480-1482.
FENG Zhong-ren, WANG Ai-bing. ANN decision model of soft soil improvement of expressway with 5 parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1480-1482.
- [7] 陈向阳,夏元友,鄢恒珍.基于 ART 网络的高速公路软基处理决策模型[J].武汉理工大学学报,2007,29(2):104-106.
CHEN Xiang-yang, XIA Yuan-you, YAN Heng-zhen. Decision model of the soft ground improvement method of the expressway using ART neural net[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2): 104-106.
- [8] 吴育华,诸 为,李新全,等.区间层次分析法:IAHP [J].天津大学学报,1995,28(5):700-705.
WU Yu-hua, ZHU Wei, LI Xing-quan, et al. Interval approach to analysis of hierarchy process[J]. Journal of Tianjin University, 1995, 28(5): 700-705.
- [9] 魏毅强,刘进生,王绪柱.不确定型 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(4):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]. System Engineering Theory and Practice, 1994(4): 16-22.
- [10] 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 determine support schemes for foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 66-71.
- [11] Alefeld G, Mayer G. Interval analysis: theory and applications[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 121(1/2): 421-464.
- [12] 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.
- [13] 段宝彬.基于区间数的多级模糊优选模型[J].河海大学学报,2004,32(4):478-480.
DUAN Bao-bin. Interval number-based multiple fuzzy optimization model[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2004, 32(4): 478-480.