

基于蛛网结构相似的高速公路软基处理决策模型

蔡雨[†], 徐林荣^{1,2}, 钟启荣¹, 商拥辉^{1,3}, 周俊杰¹

(1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075;
3. 黄淮学院, 建筑工程学院, 河南驻马店 463000)

摘要: 目前高速公路软基处理决策方法较多, 在工程中得到广泛应用. 这些方法从优选角度出发, 从技术、经济、环境、施工等方面进行综合评价, 选择最优方案, 但这些方法评价指标具有模糊性, 决策结果单一, 适应性不强. 针对以上问题, 以处理效果显著的工程案例为标准, 以客观 6 参数为评价指标, 建立一种基于蛛网结构相似的高速公路软基处理决策模型. 所提出的方法相较于传统范例推理法进行如下改进: 1) 考虑参数值变化与目标效果影响的非线性关系, 提出指标参数非线性规一化处理方法; 2) 利用蛛网图形面积及形状差异, 综合度量源范例 M 与目标范例 O 的贴近程度, 提出一种新的相似度计算方法. 以国内某高速公路软基处理工程为例, 将所提出的方法与传统方法进行对比, 结果表明, 所提出的方法匹配程度较好, 验证了该模型的可靠性. 该模型计算便捷, 结果客观, 可为软基处理决策提供一种新方法.

关键词: 道路工程; 高速公路; 软基处理; 范例推理; 蛛网结构相似; 决策模型

中图分类号: TU447

文献标志码: A

Decision model for soft-foundation treatment of expressway based on similarity of cobweb structure

CAI Yu[†], XU Lin-rong^{1,2}, ZHONG Qi-rong¹, SHANG Yong-hui^{1,3}, ZHOU Jun-jie¹

(1. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory of High-speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China; 3. College of Architecture and Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: At present, there are many decision-making methods for expressway soft-foundation treatment, which are widely used in engineering. By comprehensively evaluating technical, economic, environmental, and construction aspects, these methods select the optimal solution from the point of preferred selection. However, the evaluation indexes of these methods are fuzzy, the result of decision-making is single, and the adaptability is weak. Taking the engineering cases with significant effect as standard and the objective 6 parameter as evaluation indexes, a decision model for expressway soft foundation treatment based on the similarity of cobweb structure is established. The proposed method is improved from the traditional case-based reasoning method as follows: 1) Considering the non-linear relationship between the change of the parameter value and the influence of the target effect, a non-linear standardized processing method of the index parameter is proposed; 2) Utilizing the area and shape difference of cobweb structure, a new similarity calculation method is used to evaluate the closeness between source case M and target case O . Finally, taking a domestic expressway soft foundation treatment project as an example, the comparison between the proposed method and the traditional method is carried out. The results show that the proposed method has a high matching degree, which verifies the reliability of the model. The model is convenient in computation and the result is objective, which provides a new method in soft foundation decision-treatment.

Keywords: road engineering; expressway; soft foundation treatment; case-based reasoning; cobweb structure similarity; decision model

0 引言

近几十年来,随着我国高速公路的迅猛发展,建造技术日趋成熟,但仍存在一些问题,比如沉降超限、桥头跳车等,这都与沉降控制有关.尤其在软土地区,

沉降控制难度大、费用高昂,如何科学合理地选择地基处理方式尤为重要.由于高速公路对地基变形控制要求较高,软土地基是否处理、如何处理成了首要解决的问题.软基处理影响因素复杂,设计计算理论

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-08-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778634).

[†]通讯作者. E-mail: 15616124236@163.com.

并不完善,对于缺少经验的工程师而言,方案的选择可能具有盲目性^[1-3]。

科研人员在软基处理决策方面提出了许多新方法,其中包括评分优选法^[4]、神经网络法^[5]、层次分析法^[6]、模糊评价法^[7]、专家系统^[8]等。这些方法从优选的角度出发,考虑技术条件、工程经济、周围环境和施工条件等多种因素,从中选择最优处理方案。但这些影响因素均具有模糊性和随机性,导致决策结果可能出现偏差^[9]。

本文基于范例推理法基本原理,根据指标参数的客观性,利用熵权法确定各指标值的权重,并对不同量纲指标值进行非线性归一化处理。为避免指标极值影响相似度计算精度,结合蛛网结构的面积与形状相似,提出一种新的计算方法,用来度量源范例 M 与目标范例 O 的贴近程度,并将最相似源范例的软基处理方式作为该目标范例的处理方法。以杭浦高速公路的软基处理工程为例,采用本文方法和传统方法分别进行计算,从而验证本文方法的可靠性。

1 决策模型建立

本文软基处理决策模型建立主要分为3个阶段:第1阶段为选择阶段,选择合适的指标参数和软基处理效果显著的源范例样本及待决策的目标范例样本,建立样本数据库;第2阶段为数据处理分析阶段,包括指标参数的归一化处理和权重计算;第3阶段为计算类比阶段,计算目标范例与源范例的相似程度,选择与目标范例最相似的源范例软基处理方法作为决策结果,建模思路如图1所示。

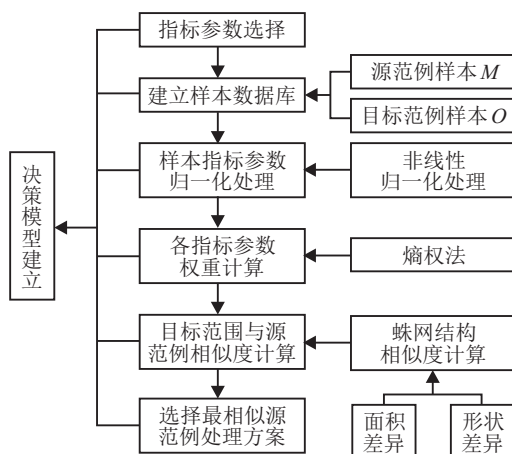


图1 建模思路

1.1 指标参数选择

影响软基处理效果的因素众多,包括内在因素和外在因素。内在因素有水文地质条件、软土及上覆硬壳层厚度、土的物理力学性质等,这些因素都是客观

存在且相互独立的,以上参数可根据地质勘查资料和常规的室内土工试验获取;外在因素包括施工技术、组织管理、成本控制、环境保护及其他人为因素等,这些因素不完全可控,具有模糊性和主观性,且不相互独立。决策模型参数的选择直接影响决策结果,在考虑模型参数时,应尽量选择客观、确定、独立性参数,采用主观、模糊、不独立参数进行决策时,不同的决策者往往会出现不同的决策结果。

对于高速公路地基处理而言,处理后地基首先应满足沉降和稳定性要求,沉降和稳定性控制都与内在因素有关,折学森^[10]认为软土各物理力学指标与沉降存在一定的内在联系,例如孔隙比、含水量、压缩系数、压缩模量等;张诚厚等^[11]研究认为软土厚度与填土高度是影响软基处理效果的两大主要因素;朱福等^[12]研究发现地表硬壳层对路堤起到一定的支撑作用,且能显著提高路堤稳定性。

本文模型参数选择从内因出发,以沉降稳定性控制作为决策结果实现的主要目标。建议采用软土(厚度 H_1 、孔隙比 e 、压缩模量 E_{S1})、地表硬壳层(厚度 H_2 、压缩模量 E_{S2})、路堤填土高度 H_3 这6个客观参数作为模型输入参数,且这些参数均较容易获取,便于建立大样本数据库。

1.2 数据库建立

以处理效果显著、处理方式明确的软基处理工程实例为类比源范例,收集该类工程上述6个参数及其对应的处理方式建立源范例库 M ,待决策工程为目标范例 O 。设多指标源范例有 m 种方案,组成源范例集 $M = (M_1, M_2, \dots, M_m)$; n 个评价指标组成指标集 $H = (H_1, H_2, \dots, H_n)$ 。由此可得源范例集 M 对指标集 H 的决策样本矩阵 Z ,即

$$Z = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \dots & H_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.3 非线性归一化处理

因所选参数的意义、量纲和性质各不相同,具有不可公度性,需对源范例与目标范例样本参数值进行归一化处理。为方便计算,常采用线性处理方法^[13],例如总和规一化、标准差规一化、极值规一化、极差规一化等。归一化处理后的转化值应能较好地度量该参数对目标效果的影响,某些参数按其性质而言,当参数值变化对目标效果的影响呈线性关系时,采用线性归一化处理是可行的,转化值会随参数值呈等比

例变化. 然而, 对于大多数指标参数而言, 参数值变化与目标效果不呈线性关系, 例如越大越优型、越小越优型指标参数, “越大与越优”、“越小与越优”往往不是线性关系, 当参数值达到较高或较低水平时, 随着参数值的增大或减小对目标效果的影响越来越弱, 趋于渐进, 类似指数函数关系, 因此对于此类指标参数采用非线性规一化处理比较合理^[4].

一般而言, 软基处理指标集分为两类: 一类为正向指标, 即越大越优型; 另一类为逆向指标, 即越小越优型. 其中软土厚度 H_1 、孔隙比 e 、路堤填土高度 H_3 属于越小越优型参数, 而硬壳层厚度 H_2 、软土压缩模量 E_{S1} 、硬壳层压缩模量 E_{S2} 属于越大越优型参数. 上述所选的6个参数均与目标效果呈非线性关系, 例如, 软土厚度达到较高水平后, 对沉降控制的影响较小, 并不会增加软基处理难度, 同样其他所选参数均有类似的特征. 因此, 本文根据指标参数与目标效果的非线性特征, 采用极值函数作为自变量, 将参数值进行指数函数变换, 实现参数值的归一化处理. 函数图形如图2所示, 图2(a)、图2(b)分别为极值逆向、正向指标函数图形, 图2(e)、图2(f)分别为极差逆向、正向指标函数图形, 图2(c)、图2(d)、图2(g)、图2(h)分别为极值与极差函数变换后指数函数图形. 为何采用极值函数作为自变量, 而不是上述其他线性归一化, 本文仅以极差归一法为例做如下对比讨论:

1) 极值线性归一化.

正向指标

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_j)}, \quad (2)$$

逆向指标

$$r_{ij} = \frac{\min(x_j)}{x_{ij}}; \quad (3)$$

2) 极差线性归一化.

正向指标

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

逆向指标

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}; \quad (5)$$

3) 指数非线性归一化.

正向指标

$$r_{ij} = \frac{1}{e-1} \left[\exp\left(\frac{x_{ij}}{\max(x_j)}\right) - 1 \right], \quad (6)$$

逆向指标

$$r_{ij} = \frac{1}{e-1} \left[\exp\left(\frac{\min(x_j)}{x_{ij}}\right) - 1 \right]. \quad (7)$$

其中: x_{ij} 为样本原始指标值; r_{ij} 为归一化处理后的指标值; $\max(x_j)$ 、 $\min(x_j)$ 分别为软基范例中第 j 个指标参数的最大值和最小值; $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, m$ 为范例数, n 为指标数.

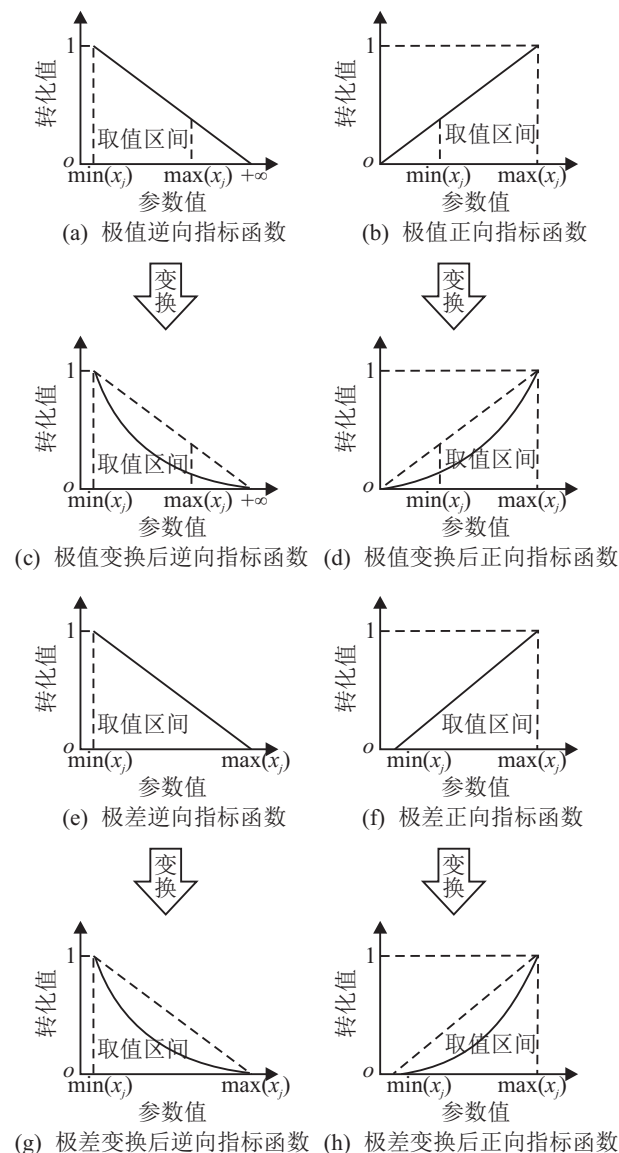


图2 指标参数归一化函数图

如图2所示, 以极值、极差函数为自变量作指数变换后的转化值不同, 在相同的取值区间内, 极差函数变换后的转化值范围为[0,1], 而极值函数变换后转化值并不是从0开始. 由图2(c)与图2(g)对比可以看到, 对逆向指标而言, 极大值用极差函数变换后转化值为0, 而极值函数变换后为一个大于0的数, 同样, 图2(d)与图2(h)对比得出类似结论, 通过极差函数变换后的转化值除了数值1外, 其他相同参数值变换后转化值均小于极值函数变换. 说明极差变换后降低了参数值变化对目标效果的影响, 尤其将极值转化后为0的情况, 意味着该极值参数对目标效果已无影响, 且参数值取值范围越小, 该影响越明显, 显然这是不符

合实际情况的。

当然,本文所选的极值函数变换也有一定局限性,认为正向指标极大值、逆向指标极小值为最优,这与理论不符,应该是 $+\infty$ 或 0 (正数指标)为最优,而就实际情况而言,决策模型所建立的数据库非常庞大,数以百万、千万甚至亿万计,几乎涵盖所有可能出现的参数值,因此认为以极大、极小值定义最优标准是可行的,采用极值函数作为自变量是合理的。

1.4 熵权法参数权重计算

软基处理方案的选择属多目标决策问题,上述所选参数对方案决策的重要程度不同,需要对各评价指标进行权重计算。目前,确定属性权重的计算方法可分为3类^[15-17]: 1) 主观赋权法: AHP法、最小平方和法和Delphi法等; 2) 客观赋权法: 主成分分析法、熵权法和多目标最优化方法等; 3) 综合赋权法: 熵权-层次分析法,主客观综合考虑。其中熵权法因其计算过程简单,计算结果客观,决策结果可信度高等特点被广泛运用于多目标决策问题中^[18],本文所选的6个参数均为客观真实数据,因此利用熵权法对各指标参数进行权重计算。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; \tag{8}$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), k = \frac{1}{\ln(m)}; \tag{9}$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \tag{10}$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.$$

其中: x_{ij} 为第*i*个案例的第*j*个指标值, p_{ij} 为第*j*项指标下第*i*个案例指标比重, e_j 为第*j*项指标的熵值, w_j 为第*j*项指标的熵权, m 为源范例数, n 为指标数。

1.5 基于蛛网结构相似度计算

传统范例类比方法通过计算目标范例与源范例各指标参数的综合距离来评价两者的相似程度,距离越小,相似度越高^[19]。常用的距离计算公式有欧几里得距离、明可夫斯基距离、曼哈顿距离、切比雪夫距离、马氏距离等。上述方法计算结果均为各指标综合距离,易受到指标极值的影响,影响计算精度,且当出现两组案例距离相同时,无法判别其中哪个案例更优或更相似。

本文利用蛛网结构^[20],从一点出发,辐射出多条轴,每条轴代表一个指标,且各指标轴间夹角相等。如

图3所示,通过对比各轴指标值连线所围成的蛛网面积及形状差异,综合判断目标范例与源范例的相似程度,差异越小相似度越高。本文相似度的描述有别于传统对相似度的一般认知,采用两者差异来度量它们之间的相似程度。对于本文决策模型而言,目的在于找最相似,即与目标范例差异最小的源范例,考虑其他源范例与目标范例的相似程度意义不大,因此无需采用传统相似度度量。该模型对于多指标决策方案而言,指标越多,计算结果越精确。

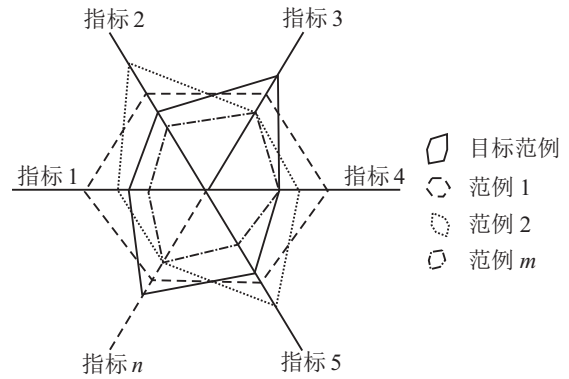


图3 蛛网结构相似度计算模型

1.5.1 面积相似度度量

$$c_i = \frac{1}{2} \sin \frac{360^\circ}{n} w_1 w_2 |r_{i,1} r_{i,2} - r_{O,1} r_{O,2}| + \frac{1}{2} \sin \frac{360^\circ}{n} w_2 w_3 |r_{i,2} r_{i,3} - r_{O,2} r_{O,3}| + \dots + \frac{1}{2} \sin \frac{360^\circ}{n} w_{j-1} w_j |r_{i,j-1} r_{i,j} - r_{O,j-1} r_{O,j}| + \frac{1}{2} \sin \frac{360^\circ}{n} w_j w_1 |r_{i,j} r_{i,1} - r_{O,j} r_{O,1}| \Rightarrow c_i = \frac{1}{2} \sin \frac{360^\circ}{n} \sum_{j=1}^n w_j w_{j+1} |r_{i,j} r_{i,j+1} - r_{O,j} r_{O,j+1}| \tag{11}$$

$$a_i = \frac{c_i}{\frac{1}{2} \sin \frac{360^\circ}{n} \sum_{j=1}^n w_j w_{j+1} r_{O,j} r_{O,j+1}} \Rightarrow a_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_j w_{j+1} |r_{i,j} r_{i,j+1} - r_{O,j} r_{O,j+1}|}{\sum_{j=1}^n w_j w_{j+1} r_{O,j} r_{O,j+1}} \tag{12}$$

其中: c_i 为第*i*个源范例与目标范例*O*蛛网面积差值; a_i 为两者的面积相似性误差参数, a_i 越小,相似度越高, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为源范例数; $j = 1, 2, \dots, n$, n 为指标个数; w_j 为第*j*个指标权重; $r_{i,j}$ 为第*i*个源范例第*j*个规范化指标值; $r_{O,j}$ 为目标范例*O*第*j*个规范化指标值。

1.5.2 形状相似度度量

图形形状相似性判别分为两个阶段: 第1阶段为建立图形形状的特征描述; 第2阶段为基于特征描述进行图形相似性度量. 目前形状相似度计算方法主要有SC(shape context)法^[21]、链码法^[22]、IMD(invariant multi-scale descriptor)法^[23]、GCT(geometry complex transform)法等. 在简单形状相似性判定上, GCT法^[24]相比其他方法有着较好的效果. 本文基于GCT法基本思想, 考虑到蛛网结构的指标轴固定, 范例对比时蛛网图形不可转动性, 建立适用本文方法的形状相似度计算模型.

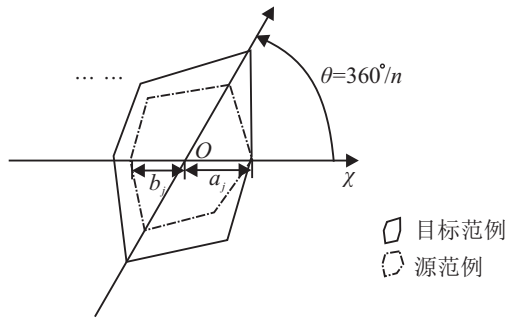


图4 蛛网图形的360°角n等分

如图4所示, 为描述蛛网图形形状特征, 将x轴绕原点O按θ角逆时针旋转, 根据评价指标数n将图形按等角度分成n份, 当指标数为单数时, 将图形等分成2n份. 切割线与图形交于两点, 记这两点至原点O的距离分别为 a_j 和 b_j , 当以指标轴为分割线时, a_j 、 b_j 为考虑权重后的归一化指标值, 并以 a_j 、 b_j 参数构建复数 $a_j + b_j i$, 然后构建该蛛网图形复数空间特征向量 $F = (a_1 + b_1 i, a_2 + b_2 i, \dots, a_n + b_n i)$, 根据该复数空间特征向量 F 能生成且只能生成一个几何图形.

1) 复数空间特征向量 F 的相位序列 p 为

$$p = \left(\frac{b_1}{a_1}, \frac{b_2}{a_2}, \dots, \frac{b_n}{a_n} \right). \quad (13)$$

2) 相似相位序列为

$$\delta_i = \frac{\sum_{j=1}^n |p_{i,j} - p_{O,j}|}{\sum_{j=1}^n p_{O,j}}. \quad (14)$$

其中: δ_i 为第 i 个源范例与目标范例 O 相位序列相似性误差参数, $p_{i,j}$ 为第 i 个源范例复数空间特征向量 F 相位序列的第 j 个元素, $p_{O,j}$ 为目标范例复数空间特征向量 F 相位序列的第 j 个元素.

3) 复数空间特征向量 F 的强度序列 M 为

$$M = (\sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \sqrt{a_2^2 + b_2^2}, \dots, \sqrt{a_n^2 + b_n^2}). \quad (15)$$

4) 相似度强度序列为

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^n |M_{i,j} - \lambda_i M_{O,j}|}{\sum_{j=1}^n M_{O,j}}, \quad (16)$$

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n M_{i,j}}{\sum_{j=1}^n M_{O,j}}. \quad (17)$$

其中: η_i 为第 i 个源范例与目标范例 O 强度序列相似性误差参数; $M_{i,j}$ 为第 i 个源范例复数空间特征向量 F 强度序列的第 j 个元素; $M_{O,j}$ 为目标范例复数空间特征向量 F 强度序列的第 j 个元素; λ_i 为第 i 个源范例相对于目标范例 O 的尺寸缩放因子, 它是 M_O 相对于 M_i 的尺寸缩放.

5) 形状相似度度量 s .

文献[24]认为相位序列 δ_i 与强度序列 η_i 在相似度上同等重要.

$$s_i = \frac{1}{2}(\delta_i + \eta_i). \quad (18)$$

其中: s_i 为第 i 个源范例与目标范例的形状相似度度量, s_i 越小, 目标范例与源范例 i 的形状越相似.

1.5.3 综合相似度度量

本文利用各指标值围成的蛛网面积大小相似与蛛网形状相似两个方面综合评判目标范例与源范例的相似程度, 并认为面积相似与形状相似同等重要, 同样的, Ψ_i 值越小, 相似度越高.

$$\Psi_i = \frac{1}{2}(a_i + s_i). \quad (19)$$

1.5.4 指标极值影响性分析

上述传统相似度计算方法中, 欧氏距离在范例类比相似度计算中最为常用, 它描述的是 n 维空间中两点之间的真实距离, 该法同样适用于多指标决策模型相似度计算, 距离越大, 个体差异越大, 相似度越小.

$$s_{i,O} = \left(\sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (r_{i,j} - r_{O,j})^2} \right). \quad (20)$$

其中: $s_{i,O}$ 为目标范例 O 与样本数据库中第 i 个源范例的欧氏距离, $s_{i,O}$ 越小, 目标范例与源范例越相似; $r_{i,j}$ 为第 i 个源范例中第 j 个指标参数归一化后的转化值; $r_{O,j}$ 为目标范例 O 的第 j 个指标参数归一化后的转化值; w_j 为第 j 个指标参数权重; n 为指标个数.

欧氏距离用来度量各点之间综合距离, 是各指标参数单向差异的总和, 且各指标差异相互独立. 在做目标范例与源范例类比时, 其中一项或少项指标因

参数极值,会出现差异较大的情况,即使源范例其他各项指标参数值与目标范例非常接近,计算结果仍可能得出相似度较差的结论,有点“以偏概全”的意思。

本文提出的蛛网结构相似度计算方法,将各指标值所在点连线围成一个二维平面图形来表征范例样本,指标参数值不同,所围成的平面图形面积大小和形状不同.为讨论上述两种方法的极值影响,随机选取1组目标范例样本,为排除其他指标差异的影响,仅对目标范例指标1进行等量0.2的改变,将改变后的范例样本作为源范例,如表1所示.为方便计算不考虑指标权重,计算结果详见表2.

表1 指标参数值列举

序号	指标1	指标2	指标3	指标4	指标5	指标6	范例类型
1	0.265	0.873	0.600	0.552	0.828	0.315	目标范例
2	0.465	0.873	0.600	0.552	0.828	0.315	源范例
3	0.665	0.873	0.600	0.552	0.828	0.315	
4	0.865	0.873	0.600	0.552	0.828	0.315	

表2 不同方法相似度计算结果

相似度(差异)	源范例1	源范例2	源范例3	计算方法
目标范例1	0.2	0.4	0.600	欧氏距离
	0.124	0.191	0.268	本文方法
差异增量	0	0.2	0.4	欧氏距离
	0	0.067	0.144	本文方法
差异增率	0	100%	200%	欧氏距离
	0	54%	116.1%	本文方法

两种方法计算出的差异值不能直接拿来作等量对比,需通过差异增率进行极值影响分析,以源范例1与目标范例计算差异为基准,指标1数值增加0.2时,两种方法计算得到源范例2与目标范例的差异增率分别为100%、54%,当指标1数值增加0.4时,两者的差异增率分别为200%、116.1%,显然,本文方法计算结果受极值影响要小于欧氏方法。

本文方法有如下特征:1)在一定程度上能减小参数极值影响;2)相较于欧氏距离方法,出现源范例与目标范例相似度相同的概率大大减小,下文有数据佐证;3)对于不相互独立的指标参数,可根据各指标之间的相关关系,以一个指标为基准进行转化计算。

2 软基处理决策应用与对比分析

以杭浦高速为例,杭浦高速公路嘉兴段全长102.75 km,主线路基净长76.098 km,软基深厚且分布广泛,地基处理68.761 km,占路基90.4%,主线一般路段(不含结构物路段)长58.009 km,其中复合地基

8.2%,塑排板80.9%,不处理10.9%。在复合地基中64.4%欠载,26.5%等载;塑排板中44.4%欠载,25.1%等载,30.5%超载。2008年初建成通车,至今营运已近10年,沉降基本达到稳定。

选取该高速公路主线一般路段沉降控制效果较好的路段作为范例样本库,以软土(厚度 H_1 、孔隙比 e 、压缩模量 E_{s1})、硬壳层(厚度 H_2 、压缩模量 E_{s2})、填土高度 H_3 这6个参数值作为评价指标,共计15200个范例样本.以其中1000个样本作为目标范例,并通过Matlab软件采用本文方法与传统范例推理法分别进行1420万次计算,传统范例推理法计算匹配度为74.96%,其中出现两组及以上范例样本相似度相同的概率为3.58%~6.12%;本文方法计算匹配度为89.43%,其中出现两组及以上范例样本相似度相同的概率为0.54%~2.01%。限于篇幅,本文选取20个不同区间的范例样本值进行展示,将前15个实例作为源范例样本,每种处理方式(不处理、塑排板、复合地基)选取5个,后5个实例作为目标范例样本,用来验证模型的可靠性,详见表3.采用本文方法与传统范例推理法计算各目标范例16~20与源范例1~15的相似度,找出最相似源范例,计算结果如表4所示。

表3 软基处理范例库

序号	H_1/m	e	E_{s1}/MPa	H_2/m	E_{s2}/MPa	H_3/m	处理方式	范例类型
1	4	1.143	2.53	3	3.69	3.7	不处理	
2	1.5	1.120	2.36	3	2.78	3	不处理	
3	6.5	1.121	2.53	3.5	4.17	3.5	不处理	
4	1.5	1.136	2.44	3.5	2.42	2.6	不处理	
5	5	1.155	2.97	2	3.73	3.8	不处理	
6	9	1.134	2.88	2	3.12	3.6	塑排板	
7	15	1.071	2.25	3	3.03	2.5	塑排板	
8	19.5	1.116	2.63	1.8	2.87	3.9	塑排板	源(M)
9	6.9	1.137	2.78	3.5	2.77	3.9	塑排板	
10	18.5	1.130	2.87	1.2	2.97	3.1	塑排板	
11	10.5	1.115	3.03	1.9	2.41	5.0	管桩	
12	20	1.047	3.54	3	3.13	4.6	管桩	
13	6.2	1.093	3.57	4.5	2.66	2.5	搅拌桩	
14	2.5	1.191	3.42	3.5	3.43	4.8	搅拌桩	
15	4.5	1.144	2.79	2.5	2.44	3.8	搅拌桩	
16	2.5	1.098	2.42	4	4.10	3.7	不处理	
17	12.5	1.170	2.70	2.5	3.17	5	塑排板	
18	26.7	1.201	3.14	2.7	2.76	6.7	管桩	目标(O)
19	5	1.218	3.20	1.5	2.55	4.2	搅拌桩	
20	11	1.147	2.43	2.5	2.91	1.6	搅拌桩	

表4 两种方法计算结果

范例类型	目标范例 O					计算方法
	16	17	18	19	20	
源范例 M	6	6	11	11	7	传统方法
源范例 M	1	8	12	15	7	本文方法

对照表3所建范例库各范例所对应的软基处理方式, 本文方法计算结果与原设计方法完全一致. 传统范例推理法计算得到的结果中, 只有目标范例 O_{17} 、 O_{18} 、 O_{20} 与原设计结果相匹配, 本文方法决策结果匹配度高, 较好地验证了该模型准确性和可靠性.

3 结论

本文综合考虑了蛛网结构面积及形状相似, 提出了一种新的相似度算法, 基于范例推理基本原理, 以6个参数作为评价指标, 建立高速公路软基处理决策模型, 并以杭浦高速公路软基处理工程实例验证了该模型的可靠性. 1) 参数指标量纲不同, 具有不可公度性, 采用线性规范处理虽然简单, 但不一定符合实际, 对于大多数评价指标而言, 参数值变化与目标效果影响呈非线性关系, 利用指标非线性规范化处理更加合理; 2) 本文提出一种基于蛛网结构面积与形状相似的综合计算方法, 较传统相似度计算方法而言, 能减少指标峰值对计算结果的影响, 从而提高计算精度; 3) 以杭浦高速公路软基处理工程为例, 利用本文所建立的软基处理决策模型进行计算, 计算结果匹配程度较高, 针对多指标决策问题, 评价指标越多, 数据库越丰富, 决策结果越合理.

参考文献(References)

- [1] 冯仲仁, 陈向阳, 鄢恒珍. 基于范例推理的公路软基处理方案决策模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1779-1781.
(Feng Z R, Chen X Y, Yan H Z. Decision model of highway soft foundation treatment scheme based on case-based reasoning[J]. Geotechnical Mechanics, 2004, 25(11): 1779-1781.)
- [2] Zhao M, Ling Z, Jiang D. Design calculation method for soft foundation treatment by geocell mattress and stone column[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2008, 3(2): 59-64.
- [3] Zhou H Y, Huang L. Multi-attribute decision-making model for choice of the soft soil foundation treatment methods[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 23(193/194): 732-735.
- [4] 张士勋, 张亦飞, 袁航新, 等. 考虑指标不确定性的软基处理方案优选模型[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 19-23.
(Zhang S L, Zhang Y F, Yuan H X, et al. Optimum selection model of soft foundation treatment scheme considering index uncertainty[J]. Journal of Railway Engineering, 2010, 27(3): 19-23.)
- [5] 冯仲仁, 朱瑞赓. 基于 Matlab-NNT 的高速公路软基处理方案决策模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 225-227.
(Feng Z R, Zhu R G. Decision-making model of soft foundation treatment scheme of expressway based on Matlab-NNT[J]. Geotechnical Mechanics, 2002, 23(2): 225-227.)
- [6] 张彩江, 沈岐平. 基于层次分析(AHP)的深层软基处理方案优化选择研究: 一个案例[J]. 系统工程, 2006, 24(9): 121-125.
(Zhang C J, Shen Q P. Study on optimal selection of deep soft foundation treatment scheme based on analytical hierarchy process: A case study[J]. Systems Engineering, 2006, 24(9): 121-125.)
- [7] 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 Z R, Zhu R G, Yao A M. Multi-level fuzzy decision of soft foundation treatment scheme for expressway[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 915-918.)
- [8] 张留俊, 黄晓明, 尹利华. 基于可信度的不确定性推理在公路软基处理专家系统中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 80-85.
(Zhang L J, Huang X M, Yin L H. Application of uncertainty reasoning based on reliability in highway soft foundation treatment expert system[J]. Journal of Communications and Transport Engineering, 2007, 7(3): 80-85.)
- [9] 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: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2008: 15-19.
(Chen X Y. Research on intelligent evaluation and optimization of soft foundation treatment scheme for expressway[D]. Wuhan: College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2008: 15-19.)
- [10] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 20-25.
(Zhe X S. Calculation of settlement of soft soil foundation[M]. Beijing: People's Communications Publishing Society, 1998: 20-25.)
- [11] 张诚厚, 袁文明, 戴济群. 高速公路软基处理[M]. 北

- 京: 中国建筑工业出版社, 1997: 32-36.
(Zhang C H, Yuan W M, Dai J Q. Soft foundation treatment of expressway[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997: 32-36.)
- [12] 朱福, 战高峰, 佺磊. 天然软土地基路堤临界高度一种计算方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1738-1744.
(Zhu F, Zhan G F, Yi L. A calculation method for critical height of embankment on natural soft soil foundation[J]. Geotechnical Mechanics, 2013, 34(6): 1738-1744.)
- [13] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛. 地质灾害危险性评价指标规范化方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 39-43.
(Kuang L H, Xu L R, Liu B C. Study on standardized method of risk assessment index for geological hazards[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(1): 39-43.)
- [14] 吴松涛, 侯风华, 戴锋. 非线性数据标准化处理过程中的线性近似法[J]. 信息工程大学学报, 2007, 8(2): 250-253.
(Wu S T, Hou F H, Dai F. Linear approximation method in the process of standardization of nonlinear data processing[J]. Information Engineering University Journal, 2007, 8(2): 250-253.)
- [15] 郭金维, 蒲绪强, 高祥, 等. 一种改进的多目标决策指标权重计算方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 118-125.
(Guo J W, Pu X Q, Gao X, et al. An improved method for calculating the weights of multi-objective decision indexes[J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 41(6): 118-125.)
- [16] Hua Z W, Song W R. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [17] Aguarón J, Escobar M T, Moreno-Jiménez J M. The precise consistency consensus matrix in a local AHP-group decision making context[J]. Annals of Operations Research, 2016, 245(1/2): 245-259.
- [18] Xue S. Logistics suppliers evaluation based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Journal of Gansu Sciences, 2016, 38(7): 47-54.
- [19] 杨逾, 郑志明. 基于范例推理的软基处理评价方案研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 93-97.
(Yang Y, Zheng Z M. Research on evaluation scheme of soft foundation processing based on case-based reasoning[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2015, 32(12): 93-97.)
- [20] 曾波, 刘思峰, 李川, 等. 基于蛛网面积的区间灰数灰靶决策模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2329-2334.
(Zeng B, Liu S F, Li C, et al. Decision-making model of grey target with interval grey number based on cobweb area[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2013, 35(11): 2329-2334.)
- [21] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 24(4): 509-522.
- [22] Zhang D, Lu G. Review of shape representation and description techniques[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(1): 1-19.
- [23] Yang J, Wang H, Yuan J, et al. Invariant multi-scale descriptor for shape representation, matching and retrieval[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2016, 145(C): 43-58.
- [24] 吴绍根, 王康, 路利军, 等. GCT变换及几何图形形状的相似性判定[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(12): 1671-1684.
(Wu S G, Wang K, Lu L J, et al. GCT transform and similarity judgment of geometric shape[J]. Proceedings of the China Journal of Image Graphics, 2016, 21(12): 1671-1684.)

作者简介

蔡雨(1989—), 男, 博士生, 从事地基、基础工程及其应用的研究, E-mail: 15616124236@163.com;

徐林荣(1964—), 男, 教授, 博士, 从事路基工程、地质灾害等研究, E-mail: lrxu@csu.edu.cn;

钟启荣(1992—), 男, 硕士, 从事路基工程的研究, E-mail: 571098627@qq.com;

商拥辉(1985—), 男, 博士, 从事路基工程与隧道工程的研究, E-mail: 495839701@qq.com;

周俊杰(1993—), 男, 硕士, 从事路基工程的研究, E-mail: 903849817@qq.com.

(责任编辑: 闫妍)