

文章编号:1007-2993(2002)03-0135-05

# 基于软计算的边坡稳定性评价方法与实现

李思平

张德政

(广东省水利水电科学研究所, 广州 510610) (北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 在岩土工程中, 适应于复杂数据处理的算法和智能技术的研究越来越受到关注。岩土工程介质和工程地质环境的复杂多变, 在边坡工程中表现边坡的变形破坏机理的复杂和分析评价参数的不确定性。因而常规的边坡稳定性评价方法无论在适用范围还是在有效性上都存在一定的局限性。根据 L·A·扎德(L·A·Zadeh)有关软计算的理论, 提出和实现了由语言值结构和复合神经网络(SOM-BP)构成的软计算边坡稳定性分析方法。该方法不仅适用于边坡工程的稳定性评价, 还可用于更为广泛意义下岩土工程的不确定性信息处理, 如评价、分类以及预测等。在理论分析的基础上, 通过实例运行证明了该方法的有效性。

**【关键词】** 软计算; 语言值结构; 神经网络; 边坡稳定性评价

**【中图分类号】** O29; TU12; TU413.6

## the Evaluation of Slope Stability Based on Soft-computing and It's Realizing

**【Abstract】** According to L·A·Zadeh's soft-computing theory, proposing and completing a soft-computing stability analysis method based on the integration of language value structure and neural network(SOM-BP). The method not only can be used to the stability analysis of slope, but also be suitable for the general evaluation, classification and forecasting in geotechnical engineering with uncertainty information. The effectiveness of the method are proved in this paper based on the theory analysis.

**【Key words】** soft-computing; language value structure; neural network; evaluation of slope stability

### 0 引言

诸多因素综合影响下的边坡工程具有复杂的变形破坏机理和模式, 表现为影响因素的多变性、参数的不确定性和数据的不完备性以及变形破坏机理的难以确定。目前, 分析边坡变形破坏机理及评价其稳定性的方法主要为极限平衡和数值分析法。这些“精确”的分析方法在很多情况下是不适宜的。一方面, 大多数工程需对边坡工程的稳定性做出准确的评价; 另一方面, 由于参数的不确定性和不完备性, “精确”分析方法在表达边坡系统各组成部分之间的非线性关系上有其局限性。

智能技术的发展及其相关学科理论研究, 如认知科学、非线性科学和计算智能等, 和工程应用的不断深入, 已经证明无论是传统人工智能(AI), 还是神经网络(ANN), 或者是进化计算(EC)均无法单独完成复杂信息的有效处理<sup>[1]</sup>, 将多种智能信息处理方法有机地结合在一起, 互相取长补短, 在实际工程问题中发挥着重要的作用, 这就是软计算(Soft Computing<sup>1</sup>)的思想。软计算是一些智能计算方法的有机融合<sup>[2]</sup>, 其核心包括模糊逻辑、神经网络、粗集理论、遗传算法等计算智能方法<sup>[3]</sup>。它通过对不精确性、不确定性以及近

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(69835001)资助项目

**作者简介:** 李思平, 男, 1965年生, 汉族, 广东兴宁人, 博士研究生, 高级工程师。现主要从事岩土工程的理论研究与及管理。

似表征等技术使问题变得易于处理,同时也使得问题的求解过程易于理解。针对现实世界的复杂性,软计算方法可模拟人类在不确定和不精确的环境中做出合理决策,从而使问题更易于求解<sup>[4]</sup>。

本文将基于模糊集合的语言场语言值结构理论同自组织神经网络和反向传播神经网络计算融合在一起构成不确定性数据处理计算方法,用语言场和语言值结构来描述和刻画边坡的结构和影响因素,由复合神经网络来完成稳定性评价知识的获取和进行边坡稳定性评价,并将其应用于解决边坡稳定性评价这一实际问题。该方法容纳了模糊集合理论和神经网络的优点,构成了软计算中十分有效的方法。该方法具有并行性、自适用性和容错性,适于处理边坡工程等不确定性系统中的评价、决策和边坡工程的知识获取等问题。这类知识蕴含在受各种复杂因素影响下的边坡工程之中,在一般情况下这类知识所反映的是复杂非线性关系,具有随机不确定、模糊不确定和非线性时变等性质。借助于这些技术和方法可以揭示边坡稳定性同制约和影响稳定性的因素之间的因果性联系和变化规律,进而提高边坡稳定性评价的客观与合理性。

**1 状(变)态空间——语言场与语言值结构**

岩土工程中包含了大量的反映岩土体以及相关工程地质环境所处状态以及各种不同时间状态的属性描述,即参数和变化过程参量。这些参数可能是数值型变量、离散的布尔型变量以及模糊的语言变量。语言场与语言值结构提供了描述这种复杂性的统一构架和量化模板<sup>[5]</sup>。

自然语言易于被理解和接受,并且可表达十分复杂,具有抽象和不确定性特征的知识。自然语言可以很好地表示有关事物状态、变态以及反映因果性和因果联系的知识<sup>[6][7]</sup>。

定义 1:  $C = \langle D, I, N \leq_N \rangle$ , 若满足下列条件,则称  $C$  为语言场: 1)  $D$  为  $R$  上数的集合或其上闭区间的集合,  $D^+$  为其对应开集; 2)

$N \neq \Phi$  为语言值的有限集; 3)  $\leq_N$  为  $N$  上的全序关系; 4)  $I: N \rightarrow D$  为标准值映射, 满足保序性, 即:  $\forall n_1, n_2 \in N (n_1 \neq n_2 \wedge n_1 \leq_N n_2 \rightarrow I(n_1) \leq I(n_2))$ , ( $\leq$  为偏序关系)。

定义 2: 对于语言场  $C = \langle D, I, N, \leq_N \rangle$ , 称  $F = \langle D, W, K \rangle$  为的语言值结构, 如果  $C$  满足以上定义,  $K$  为自然数; 且  $W: N \rightarrow R^k$  满足:

$$\forall n_1, n_2 \in N (n_1 \leq_N n_2 \rightarrow W(n_1) \leq_{dic} W(n_2)), \forall n_1, n_2 \in N (n_1 \neq n_2 \rightarrow W(n_1) \neq W(n_2))$$

其中,  $\leq_{dic}$  为  $R^k$  上的字典序, 即  $(a^1, \dots, a^k) \leq_{dic} (b^1, \dots, b^k)$  当且仅当存在  $h$ , 使得当  $0 \leq j < h$  时,  $a^j = b^j, a^h \leq b^h$  (见图 1)。

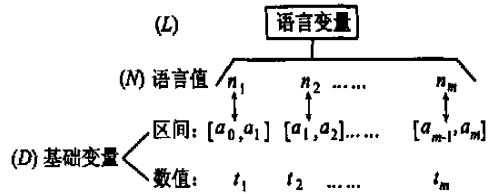


图 1 语言场语言值结构

定义 3: 设  $C_1, C_2$  为两个语言场, 称  $C_1$  是  $C_2$  的扩张, 若存在 1-1 映射  $f: D_1 \rightarrow D_2, g: N_1 \rightarrow N_2$ , 使得: 1)  $f$  单调; 2)  $(\forall n_1 \in N_1) (f(I_1(n_1)) = I_2(g(n_1)))$ ;

其中,  $C_1 = \langle D_1, I_1, N_1, \leq_{N1} \rangle, C_2 = \langle D_2, I_2, N_2, \leq_{N2} \rangle$ 。

定义 4: 设  $C = \langle D, I, N, \leq_N \rangle$  的语言值结构为  $F_1 = \langle C_1, W_1, K_1 \rangle, F_2 = \langle C_2, W_2, K_2 \rangle$ , 若存在 1-1 映射  $h: [0, 1]^{K_1} \rightarrow [0, 1]^{K_2}$  满足:

- 1)  $h$  在字典序下严格单调;
- 2)  $(\forall n \in N) (h(W_1(n)) = W_2(n))$ ;
- 3)  $(\exists \epsilon \in R) (\forall n, n' \in N) (dis_1(W_1(n), W_1(n')) = \epsilon dis_2(W_2(n), W_2(n')))$

其中  $dis_1: [0, 1]^{K_1} \times [0, 1]^{K_1} \rightarrow [0, 1], dis_2:$

$[0, 1]^{K_2} \times [0, 1]^{K_2} \rightarrow [0, 1]$ , 则称  $F_1$  与  $F_2$  为  $(dis_1, dis_2)$  同构。

定理 1: 设  $C_1, C_2$  为两个语言场,  $C_1$  是  $C_2$  的扩张的充要条件是  $C_1$  与  $C_2$  是同型语言场(即  $|N_1| = |N_2|$ )。

定理 2: 设  $F$  为  $C$  的语言值结构, 则  $F$  与  $F$  的 *double* 扩展在加权 Hamming 距离下同构。

在同构意义下, 同型语言场中语言值的描述可以不加区分。在 *dis* 同构意义下, 语言值可以构建在不同维空间上。因而, 语言场和语言值结构可用于描述边坡工程中所涉及到的有关边坡结构、工程地质环境、影响边坡稳定性的因素中的不确定性和不完备性。

## 2 边坡稳定性评价知识获取

边坡工程实例为研究边坡破坏机理、破坏模式和稳定性评价等提供了大量的知识。神经网络具有较强的非线性动态处理能力。无需知道数据的分布形式和变量之间的关系, 可实现高度非线性映射。其较强的学习、存储和计算能力及容错特性适用于从实例样本中提取特征、获得知识。(将语言场和语言值结构的统一描述能力与神经网络的不完备和不确定知识的获取能力相结合,) 可以从大量的边坡工程实例中获取有关边坡稳定性以及变形机理的知识, 还可用这些知识进行边坡工程设计和边坡稳定性评价。

### 2.1 神经网络模型

据边坡稳定性评价理论构造了神经网络复合模型来进行边坡稳定性评价。该网络是由自组织特征映射神经网络(SOM)和前馈神经网络(BP)相结合而构成的复合神经网络。它吸取了两种神经网络的优点, 将(SOM)网络的较好的抗噪能力和自联想最邻近模式分类功能同 BP 网络的高度非线性映射特征结合在一起, 因而比单一网络有较高的计算能力和较少的计算时间。网络包括输入层、二维 Kohonen 层、BP 隐含层及输出层。边坡工程状态信息自输入层传向 Kohonen 层, 在无监

督方式下进行训练, 按自相似性准则进行“竞争”来实现二维自组织的特征映射, 然后传向 BP 隐含层和输出层后, 在自监督方式下进行训练, 实现非线性映射。

### 2.2 语言值结构

用于边坡工程稳定性评价的数据主要包括: 定量数据, 如边坡结构参数(高度、角度等)、岩土体的物理力学性质(粘聚力、内摩擦角等)可直接取实测数据; 定性数据, 如岩土体的分级、分类、岩体结构类型、岩体质量类型以及场区的工程地质条件等。语言值变换就是利用语言值结构理论将同边坡稳定性有关的各类数据转换成适于神经网络进行知识抽取的规则化数据, 即将定性的与定量的参数都采用统一的结构进行离散化和量化。

在语言场中  $t_k$  表示状(或变)态空间中的样本值  $t_k (k=1, 2, \dots, N)$ , 可根据下式进行标准化, 可得到其状(或变)态向量  $\alpha_k$ ,

$$\alpha_i = A_i \cdot \left[ 1 - \frac{|t_i - t_{i0}|}{l_i} \right] + A_{\text{邻}} \cdot \frac{|t_i - t_{i0}|}{l_i} \quad (1)$$

其中:  $t_i$  为落在第  $i$  个区间的输入数据,  $t_{i0}$  为第  $i$  个区间的的中点数据,  $l_i$  为第  $i$  个区间的长度,  $A_i$  为第  $i$  个区间中的状(变)态标准向量,  $A_{\text{邻}}$  为依  $t$  的落点而定的左邻或右邻区间中的状(变)态标准向量, 这样可得到  $\alpha_{t_k}$ 。

判定状(变)态向量  $\alpha_{t_k}$  所属状(变)态类型, 如  $A_k (k=1, 2, 3, 4, 5)$ 。由下式计算  $\alpha_{t_k}$  与各状(变)态标准向量  $A_i$  的测度  $d_H$ , 取最小者为  $\alpha_{t_k}$  归属的状(变)态类型。

$$d_H(\alpha_{t_k}, A_i) = \sum_{j=1}^5 |\mu \alpha_{t_k}^{(j)} - \mu A_i^{(j)}| \quad (2)$$

其中:  $\mu \alpha_{t_k}^{(j)}$  与  $\mu A_i^{(j)}$  分别为其各自对应的分量值。

数据经过处理后, 神经网络可将控制和影响边坡稳定的各类定量、定性和模糊数据, 纳入边坡稳定的分析和评价过程, 因而可表达各类因素对边坡稳定的综合影响。

### 2.3 基于软计算的边坡稳定性评价算法

该稳定性评价方法的算法描述如下:

1)边坡稳定性影响因素的语言值结构量化,形成样本集  $t_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jN}, Y)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$ , 其中,  $N$  为稳定性影响因素数目,  $M$  样本数,  $Y$  为评价结果;

2)对网络输入样本  $t$ ,  $t = (x_1, x_2, \dots, x_N, Y)$ ;

3)计算输入模式同 Kohonen 层神经元的距离

$$d_j = \| X(t) - W_j(t) \| = C \sum_{i=1}^N ((X_i(t) - W_{ij}(t))^2)^{1/2};$$

4)具有最小距离的结点  $N_j^*$  竞争获胜:  $\| X(t) - W_j^*(t) \| = \min\{d_j\}$

5)调整输出结点  $N_j^*$  所连接的权值及  $N_j^*$  内何领域内全部神经元的权值:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \eta(t)(X_i(t) - W_{ij}(t)), \quad (0 < \eta(t) < 1)$$

其他神经元按下式计算:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t)$$

6)利用 sigmoid 非线性活化函数计算隐含层神经元输出值:

$$Q_i = \frac{1}{1 + e^{-(net_i + b_i)}} \quad net_i = \sum W_{ij} Q_j$$

7)误差反应,计算各输出神经元的输出值  $Q_i$  同期望输出值  $t_i$  之间的误差  $\delta_i$ :

$$\delta_i = (t_i - Q_i) Q_i (1 - Q_i)$$

误差反传至同输出神经元相连的隐含层各结点。

各隐含层结点的误差为:

$$\delta_i = Q_i (1 - Q_i) \sum_k \delta_k W_{ki}$$

8)调整连接权值:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \eta \Delta W_{ij}(t+1) \quad \Delta W_{ij} = -\eta \delta_i Q_j$$

9)重复 6)~8)步直到满足某一精度  $\epsilon$  (小正数);

10)训练样本集中的每个样本都重复 2)

~9)步。

训练结束后,网络自样本实例中学到了关于边坡稳定性评价的知识,并将其以网络的连接权值和其它结构参数进行表达。此时输入待评价的边坡状态参数就可进行边坡稳定性评价。

### 3 实验验证

为验证算法的正确性,收集国内外各类岩土工程中潜在或滑动破坏模式为圆弧形滑落的稳定边坡和失稳破坏边坡实例共 46 个。其中 23 个为无水边坡(破坏 13 个,稳定 10), 23 个为有水边坡(破坏 16 个,稳定 7)。边坡状态描述数据包括边坡结构参数,岩土体的物理力学性质参数,孔隙压力比,边坡稳定状态及极限平衡法计算安全系数(见表 1)。

算法设计 6 个输入变量分别对:重度、粘聚力、内摩擦角、边坡角、边坡高度、孔隙压力比。Kohonen 层为  $10 \times 10$  二维神经元阵列, BP 隐含层神经元为 5 个。其中输入神经元的个数取决于所采用的变量个数,中间隐含层神经元的结构和数目是通过反复试算来确定的,也可以结合遗传算法来优化网络结构。输出结果分别对应边坡状态和安全系数估计值。对于所给定的 23 个用于网络训练的工程算例对于设定的误差阈值 0.001 经过 37 800 次迭代后收敛。部分训练样本的计算结果见表 2; 将边坡实际状态和计算结果对比可以看出,该稳定性评价方法对边坡的稳定和失稳破坏做出准确判断,并对安全系数做出较准确的估计。计算结果表明,两个十分相似的边坡工程实例的神经网络评价结果一致,并且给出相近的安全系数估计值。

为算法的适用性,选取两个未参与训练的工程实例作为检测样本进行计算。两个实例分别为均质粘性土边坡和节理化岩体边坡。同分析结果一致,土质边坡处于稳定状态。岩体边坡为我国某露天铁矿采场边坡,其极限平衡安全系数为 1.10, 软计算稳定性评价方法的输出安全系数估计值为 0.84, 且评价边坡

不稳定。在实际生产中,该边坡据岩体移动监测资料进行了加固处理。

#### 4 结论

现实世界是复杂的、多变的,通常难以描述这种复杂性。采用软计算的方法,尤其是该方法的思想值得借鉴。利用语言场结构可以将定

性描述量化,而神经网络则可以刻画复杂的非线性结构,两者结合在一起可以很好地解决一些岩土工程问题。实际工程应用中表明,软计算方法评价边坡的稳定性有较好的适用性。该方法可将制约和影响边坡稳定的各类定性和定量因素纳入稳定性评价(见表1和表2)。

表1 边坡工程实例

编号	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	边坡角 $\beta/(\text{°})$	边坡高度 $h/\text{m}$	孔隙压力比	安全系数	边坡状态
1	18.68	26.34	15	35	8.23		1.11	破坏
2	16.50	11.49	0	30	3.66		1.00	破坏
3	18.84	14.36	25	20	30.50		1.875	稳定
4	18.84	57.46	20	20	30.50		2.045	稳定
5	28.44	29.42	35	35	100.00		1.78	稳定
6	28.44	39.23	38	35	100.00		1.99	稳定
7	20.60	16.28	26.5	30	40.00		1.25	破坏
8	14.80	0	17	20	50.00		1.13	破坏
9	14.00	11.97	26	30	88.00		1.02	破坏
10	25.00	120.00	45	53	120.00		1.30	稳定
11	26.00	150.05	45	50	200.00		1.20	稳定
12	16.00	70.00	45	40	115.00		1.11	破坏
13	20.41	24.90	20	22	10.67	0.35	1.40	稳定
14	19.63	11.97	13	22	12.19	0.405	1.35	破坏
15	21.83	8.62	20	28	12.80	0.49	1.03	破坏
16	20.41	33.52	32	16	45.72	0.20	1.28	破坏
17	18.84	15.32	11	25	10.67	0.38	1.63	稳定
18	18.84	0	30	20	7.62	0.45	1.05	破坏
19	21.43	0	20	20	61.00	0.50	1.03	破坏
20	19.06	11.71	20	35	21.00	0.11	1.09	破坏

表2 基于软计算的边坡稳定性评价结果

编号	边坡实际状态		软计算输出结果	
	安全系数	边坡状态	软计算结果	边坡状态
1	1.11	破坏	1.000	破坏
2	1.00	破坏	0.940	破坏
3	1.875	稳定	1.845	稳定
4	2.045	稳定	2.056	稳定
5	1.78	稳定	1.796	稳定
6	1.99	稳定	1.883	稳定
7	1.25	破坏	1.015	破坏
8	1.13	破坏	0.936	破坏
9	1.02	破坏	1.001	破坏
10	1.30	稳定	1.356	稳定
11	1.20	稳定	1.221	稳定
12	1.11	破坏	1.091	破坏
13	1.40	稳定	1.397	稳定
14	1.35	破坏	1.135	破坏
15	1.03	破坏	0.917	破坏
16	1.28	破坏	1.025	破坏
17	1.63	稳定	1.583	稳定
18	1.05	破坏	1.002	破坏
19	1.03	破坏	1.091	破坏
20	1.09	破坏	0.924	破坏

由于边坡稳定性评价的知识来自边坡工程的稳定及失稳破坏实例,因而评价结果的准确性在很大程度上取决于训练样本的代表性和信息的完备性,因而随着工程实例的不断增多该方法的准确性会不断提高。

#### 参考文献

- 1 Jagielska I, Mathews C. An Investigation into the Application of Neural Network, Fuzzy logic, Genetic Algorithms and Rough Set to Automated Knowledge Acquisition for Classification Problems. Neurocomputing, 1999(24):37~54
- 2 Zadeh L A. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing, ACM., 1994(37):77~84

算得截桩力的最低限值:

$$[P']_{\min} = 303.265 \text{ kN} < P' = 382.051 \text{ kN/m}$$

复核滑动安全系数:

$$K_B = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha_i}} (c_i b_i + W_i \tan \varphi_i) + P'}{\sum W_i \sin \alpha_i} = \frac{671.549 + 382.051}{779.851} = 1.351 > 1.25$$

(数据取自滑坡验算结果。)

## 5 结论

1) 挡土墙下设置抗滑桩, 这是为了阻止地基滑动的需要, 它主要承受水平剪切力和横向的挠曲。这与一般主要承受垂直荷重的桩基不同。

2) 滑动面上土的抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值的选用是评价滑坡稳定性和防治滑坡工程设计计算的关键问题。工程师们对此应取谨慎态度和科学分析的方法。有经验者宜根据工程实际情况, 采用现场试验和滑坡反算相结合, 并与工程地质勘察报告所提供的数据对照, 合理地确定滑动面上土的抗剪强度。报告上土的  $c$ 、 $\varphi$  值, 不宜直接应用, 而由反算法所求得的数据, 符合滑坡的实际情况, 还是比较可靠的。但是, 用反算法只能求得滑动面上土体的平均抗剪强度, 这是此法的缺点, 然而不会对

滑坡的计算造成大的影响, 一般对中小型滑坡, 反算法是经常采用的。

3) 防止挡土墙下地基发生滑动, 除了设置抗滑桩外, 还可采用各种处理软弱地基的措施, 如散体桩(碎石桩、渣土桩等)、水泥土桩、CFG 桩等复合地基和高压喷射注浆、灌浆等方法以提高其强度。所谓土的强度, 实质上就是抗剪强度问题。抗滑桩的施工要简单得多, 因此不失为安全、稳妥、合理的阻滑措施。

4) 在地震烈度为 7 度以上的地区建造带挡土墙的岸坡, 应进行抗震验算; 而在 6 度以下地区可以不予考虑。如何验算, 容后续之。

## 参 考 文 献

- 1 魏汝龙. 软粘土的强度和变形. 北京: 中国人民交通出版社, 1987. 185~189
- 2 GBJ 7-89 建筑地基基础设计规范
- 3 天津大学等四院校. 地基与基础. 北京: 中国建筑工业出版社, 1978. 257
- 4 交通部第一航务工程局设计研究院. 海港码头结构设计手册. 北京: 人民交通出版社, 1975. 189; 349~350
- 5 Paul Andersen. 基础工程学, 钱家欢、潘家铮合译. 上海: 中国科学图书仪器公司, 1951. 13
- 6 GBJ 10-89 混凝土结构设计规范, 49~50

收稿日期: 2002-02-22

(上接第 139 页)

- 3 Mohua B, Sushmita M, Sankar K. Rough fuzzy MLP knowledge encoding and classification, IEEE Trans On neural networks Nov, 1998, 9(6): 1203~1215
- 4 Zadeh L A. From computing with numbers to computing with words—from manipulation of measurement to manipulation of perceptions, IEEE Trans On circuits and systems-I: Fundamental theory and applications, 1999, 45(1): 105~119

- 5 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法. 北京: 地质出版社, 1994, 20~130
- 6 杨炳儒. 基于综合语言场的因果关系推理模型. 模式识别与人工智能. 1996, 9(1): 31~36
- 7 Yang Bingru. FIA and CASE based on fuzzy language field, Fuzzy Sets and Systems, 1998, 95(2): 83~89.

收稿日期: 2002-02-04