

# 基于灰色关联分析和案例推理的 边坡稳定性评价方法

李梅 夏元友

(武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070)

**【摘要】** 采用基于案例推理的方法(CBR)来评价边坡稳定性, 并利用灰色关联理论, 提出基于灰色关联分析的案例检索方法, 应用于边坡工程实例, 效果良好, 且将实例应用结果与同等条件下欧式距离的检索结果比较, 说明此方法合理有效, 具有明显的优越性。

**【关键词】** 案例检索; 灰色关联; 案例推理; 边坡; 稳定性评估

**【中图分类号】** P 642; TU 413.62

## A Method of Slope Stability Evaluation Using Grey-relational Theory

Li Mei Xia Yuanyou

(College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430070 China)

**【Abstract】** Introducing a method of slope stability evaluation based on case-based reasoning, and a case retrieving method using grey-relational theory. Through applying this case retrieving method into practical slope engineering cases, the results show that the method is simple and practical. By comparison with retrieving results of Euclidean distance in the same condition, it proves that this method has obvious advantage.

**【Key Words】** case retrieving; grey-relational theory; case-based reasoning; slope; stability evaluation

## 0 引言

边坡稳定性评估问题一直是岩土工程的一个重要研究内容, 而评价结果的正确性与否直接关系到边坡工程的成败。目前的边坡稳定性评价方法多种多样, 因边坡工程常依赖于经验, 而长期的工程实践已形成了大量的边坡工程实例, 故充分挖掘和利用大量的、其稳定状态已被研究清楚的边坡的成功经验有着重要的实际意义。本文采用基于案例推理的方法来评价边坡稳定性, 并提出基于灰色关联分析的案例检索方法。

基于实例推理 CBR(Case-based Reasoning)是近些年来发展起来的一项人工智能新技术, 它通过对过去案例的回忆来获得知识和经验从而解决当前问题<sup>[1,2]</sup>。CBR 分为案例的表示、组织、检索、储存等步骤, 其中案例检索是关键也是难点。检索的目标就是从案例库中寻找与目标案例(待评价边坡)最相似的边坡案例, 即最佳源案例。在众多的案例检索方法中, 传统的、目前用得最多的相似度计算方法是

采用欧氏距离, 但是它要求案例的信息较全而准确, 不够灵活<sup>[3]</sup>。边坡受很多不确定因素的影响, 传统案例检索方法难以表达这些不确定因素, 故可尝试采用灰色理论方法。

灰色系统理论主要研究系统模型不明确, 行为信息不完全, 运行机制不清楚这类系统的建模、预测、决策和控制等问题。其中, 灰色因素的关联分析是其重要研究内容之一。

关联度, 是表征两个事物的关联程度。研究一个系统, 弄清其结构和功能, 首先要进行因素分析。分清哪些因素关系密切、哪些不密切, 找出主要矛盾、特征和关系, 这是灰色关联度分析要解决的主要问题。灰色关联理论十分适合于解决边坡这类具有很多不确定因素的问题。利用灰色关联度分析原理, 可在不完全的信息中, 通过一定的数据处理, 找出它们的关联性, 确定边坡稳定性各影响因素的影响程度, 进而进行相似度计算、案例检索和稳定性评价<sup>[4~6]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(49902022); 教育部科学技术研究重点项目(104135); 霍英东教育基金会资助项目(71018)

**作者简介:** 李梅, 1976年生, 女, 汉族, 湖北人, 在读博士。

## 1 基于灰色关联分析的边坡稳定评估案例检索方法

已有的大量边坡实例组成案例库, 设论域  $U^*$  是历史案例(案例库中源案例)的集合,  $U_0$  为输入的待评价边坡案例,  $U$  为通过关键指标对案例库进行初步检索得到的案例集合,  $U \subseteq U^*$ 。

$$U = \{\text{案例 } 1, \text{案例 } 2, \dots, \text{案例 } m\} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \quad (1)$$

设  $V$  是因素指标的集合:

$$V = \{\text{指标 } 1, \text{指标 } 2, \dots, \text{指标 } n\} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (2)$$

如有定性指标则先将定性指标定量化, 可请专家按经验确定或采用模糊隶属度函数将其模糊量化。将元素对  $(u_i, v_j)$  搭配的因素指标集计为  $f_{ij}$ , 因此,  $m \times n$  个  $f_{ij}$  得到案例的因素指标集矩阵  $F$ :

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{pmatrix} = (f_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

为了消除不同量纲的因素指标值的影响, 计算时先对  $F$  中的元素  $f_{ij}$  用下式进行量纲一的处理

$$f'_{ij} = \frac{f_j - f_{j\min}}{f_{j\max} - f_{j\min}} \quad (4)$$

从某种角度说, 一个边坡案例  $u_i$  就是  $n$  个因素指标的映射, 即

$$u_i = f_i(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (5)$$

当  $n$  个因素指标值确定的时候, 这个边坡案例的性质和稳定状况基本也随之确定。案例的检索就能转化为综合考虑案例空间  $U$  中各案例点  $u_i$  与输入案例点  $u_0$  关于各因素指标的关联度。

根据灰色系统的基本理论<sup>[4]</sup>, 考虑空间  $U$  中某一案例点  $u_i (i=1, 2, \dots, m)$  在因素  $v_j (j=1, 2, \dots, n)$  时与输入案例点  $u_0$  的相关性大小, 采用下式进行度量。定义

$$\xi_{ij} = \frac{k_{\max, j\max} |f'_{0j} - f'_{ij}|}{|f'_{0j} - f'_{ij}| + k_{\max, j\max} |f'_{0j} - f'_{ij}|} = (\xi_{ij})_{m \times n} \quad (6)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。  $f_{0j}$  代表输入案例  $u_0$  在第  $j$  点的因素指标值,  $f'_{0j}$  为经过量纲一的处理后的值。  $0 \leq \xi_{ij} \leq 1$ , 其中  $k$  为分辨系数,  $k \in (0, 1)$  其值可通过人为设定。  $m \times n$  个  $\xi_{ij}$  构成边坡案例评估的灰色关联度判断矩阵  $\xi$ ,

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \dots & \xi_{1n} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \dots & \xi_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \xi_{m1} & \xi_{m2} & \dots & \xi_{mn} \end{pmatrix} = (\xi_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

式(6)计算的是  $v_j$  方向上边坡案例点  $u_i$  与输入边坡案例点  $u_0$  的关联度。由于  $V$  为  $n$  维的指标空间, 因此, 必须考虑每个方向对边坡案例点关联度的影响, 即要考虑各影响因素的权重。运用特征向量法<sup>[7]</sup>确定归一化后的因素指标权重向量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 。定义输入边坡案例点与库中源边坡案例点的广义权距离为

$$d_{0i} = \left[ \sum_{j=1}^n [\omega_j (1 - \xi_{ij})]^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$u_0$  与  $u_i$  的灰色关联度(即相似度), 可定义为 1 与广义权距离之差:

$$\gamma_{0i} = 1 - d_{0i} \quad (9)$$

根据式(9)的物理意义,  $\gamma_{0i}$  越大, 说明此边坡案例的评价结果越类似于目标边坡案例<sup>[8]</sup>。因此, 采用最大的  $\gamma_{0i}$  所对应的方案的评价结果, 作为输入待评边坡案例的评价结果。实际使用时应设阈值, 只有相似度大于阈值的源案例才可作为参考。

因后面比较需要, 下面简要介绍一下欧式距离的计算式:

$$d_{i0} = \left\{ \sum \omega_j (v_i(j) - v_0(j))^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

式中:  $d_{i0}$  为边坡的目标案例  $u_0$  与源案例库中的第  $i$  个案例  $u_i$  之间的欧式距离,  $d_{i0}$  越小, 说明越相似。  $v_i(j)$  表示案例  $u_i$  的第  $j$  个属性;  $n$  为属性总数;  $v_0(j)$  为目标案例  $u_0$  的第  $j$  个属性值;  $\omega_j$  为属性  $j$  的权重。

## 2 应用

采用文献[9]的 38 个圆弧形破坏的案例, 其中 1~33 作为案例库中源边坡案例, 34~38 作为目标边坡案例, 具体见表 1。按式(4)对指标值进行归一化处理。计算判断矩阵  $\xi_{ij}$ , 为节省篇幅, 只列出  $\xi_{34}$ , 其他目标案例的  $\xi_{ij}$  不一一列出。

表1 圆弧破坏边坡实例及稳定状况

序号	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	边坡角 $\Psi/(\text{°})$	边坡高度 $H/\text{m}$	状态
1	25.00	120.00	45.00	35.00	120.00	1
2	16.50	11.49	0.00	30.00	3.66	0
3	18.84	14.36	25.00	20.00	30.50	1
4	18.84	57.46	20.00	20.00	30.50	1
5	28.44	29.42	35.00	35.00	100.00	1
6	28.44	39.23	38.00	35.00	100.00	1
7	20.60	16.28	26.50	30.00	40.00	0
8	14.80	0.00	17.00	20.00	50.00	0
9	14.00	11.97	26.00	30.00	88.00	0
10	27.30	31.50	29.70	41.00	135.00	1
11	27.30	16.80	28.00	50.00	90.50	1
12	27.30	26.00	31.00	50.00	92.00	1
13	27.30	10.00	39.00	41.00	511.00	1
14	27.30	10.00	39.00	40.00	470.00	1
15	25.00	46.00	35.00	47.00	443.00	1
16	25.00	46.00	35.00	44.00	435.00	1
17	25.00	46.00	35.00	46.00	432.00	1
18	18.50	25.00	0.00	30.00	6.00	0
19	18.50	12.00	0.00	30.00	6.00	0
20	21.40	10.00	30.34	30.00	20.00	1
21	22.00	20.00	36.00	45.00	50.00	0
22	31.30	68.00	37.00	49.00	200.50	0
23	20.00	20.00	36.00	45.00	50.00	0
24	27.00	40.00	35.00	47.10	292.00	0
25	22.00	0.00	36.00	45.00	50.00	1
26	31.30	68.00	37.00	46.00	366.00	0
27	25.00	46.00	36.00	44.50	299.00	1
28	27.30	10.00	39.00	40.00	480.00	1
29	25.00	46.00	35.00	46.00	393.00	1
30	25.00	48.00	40.00	49.00	330.00	1
31	31.30	68.60	37.00	47.00	305.00	0
32	25.00	55.00	36.00	45.50	299.00	1
33	31.30	68.00	37.00	47.00	213.00	0
34	12.00	0.00	30.00	35.00	8.00	0
35	18.68	26.34	15.00	35.00	8.23	0
36	26.00	150.00	45.00	30.00	200.00	1
37	22.40	10.00	35.00	30.00	10.00	1
38	25.00	46.00	35.00	50.00	284.00	1

注:稳定状态中1表示稳定,0表示失稳

取  $K$  值为 0.5, 根据式(6)计算目标边坡 34 的灰色关联矩阵为:

$$\xi_{34} = [0.423 \ 9 \quad 0.331 \ 4 \quad 0.597 \ 9 \quad 0.476 \ 1 \quad 0.691 \ 9; \\ 0.680 \ 1 \quad 0.838 \ 1 \quad 0.426 \ 5 \quad 0.765 \ 9 \quad 0.983 \ 0; \quad 0.583 \ 1 \quad 0.805 \ 5 \quad 0.816 \ 9 \quad 0.521 \ 7 \quad 0.917 \ 9; \\ 0.583 \ 1 \quad 0.508 \ 7 \quad 0.690 \ 5 \quad 0.521 \ 7 \quad 0.917 \ 9; \quad 0.367 \ 9 \quad 0.669 \ 1 \quad 0.816 \ 9 \quad 1.000 \ 0 \quad 0.732 \ 2; \\ 0.367 \ 9 \quad 0.602 \ 6 \quad 0.736 \ 0 \quad 1.000 \ 0 \quad 0.732 \ 2; \quad 0.526 \ 6 \quad 0.785 \ 1 \quad 0.864 \ 4 \quad 0.765 \ 9 \quad 0.887 \ 1; \\ 0.773 \ 6 \quad 1.000 \ 0 \quad 0.631 \ 8 \quad 0.521 \ 7 \quad 0.856 \ 9; \quad 0.827 \ 1 \quad 0.832 \ 5 \quad 0.848 \ 0 \quad 0.765 \ 9 \quad 0.758 \ 7; \\ 0.384 \ 7 \quad 0.653 \ 8 \quad 0.986 \ 7 \quad 0.731 \ 6 \quad 0.664 \ 5; \quad 0.384 \ 7 \quad 0.779 \ 8 \quad 0.917 \ 7 \quad 0.521 \ 7 \quad 0.753 \ 0;$$

0.384 7	0.695 9	0.957 1	0.521 7	0.749 6;	0.384 7	0.856 1	0.712 5	0.731 6	0.333 3;
0.384 7	0.856 1	0.712 5	0.765 9	0.352 5;	0.423 9	0.563 9	0.816 9	0.576 9	0.366 4;
0.423 9	0.563 9	0.816 9	0.645 1	0.370 7;	0.423 9	0.563 9	0.816 9	0.597 9	0.372 3;
0.595 5	0.704 1	0.426 5	0.765 9	0.992 1;	0.595 5	0.832 1	0.426 5	0.765 9	0.992 1;
0.504 4	0.856 1	0.985 0	0.765 9	0.954 5;	0.488 9	0.748 4	0.788 0	0.620 6	0.856 9;
0.331 4	0.466 6	0.761 2	0.538 8	0.566 4;	0.544 6	0.748 4	0.788 0	0.620 6	0.856 9;
0.389 4	0.597 9	0.816 9	0.574 8	0.469 7;	0.488 9	1.000 0	0.788 0	0.620 6	0.856 9;
0.331 4	0.466 6	0.761 2	0.597 9	0.412 6;	0.423 9	0.563 9	0.788 0	0.632 6	0.463 6;
0.384 7	0.856 1	0.712 5	0.765 9	0.347 6;	0.423 9	0.563 9	0.816 9	0.597 9	0.395 1;
0.423 9	0.553 4	0.690 5	0.538 8	0.438 5;	0.331 4	0.464 4	0.761 2	0.576 9	0.458 5;
0.423 9	0.519 6	0.788 0	0.609 1	0.463 6;	0.331 4	0.466 6	0.761 2	0.576 9	0.550 9]

采用特征向量法<sup>[7]</sup>计算指标权重为  $\omega=(0.102 9, 0.150 6, 0.350 3, 0.300 9, 0.095 3)$ 。

取  $p=2$ , 相似度最后计算结果见表 2。基于欧式距离的检索结果见表 3。

表 2 灰色关联检索结果的稳定性比较

目标案例			相似度	最佳源案例			安全系数误差 $\Delta F$
序号	稳定状态	安全系数		序号	稳定状态	安全系数	
34	破坏	0.68	0.951 4	9	1.02	破坏	-0.34
35	破坏	1.11	0.962 3	18	1.09	破坏	0.02
36	稳定	1.20	0.910 2	22	1.2	破坏	0
37	稳定	2.00	0.969 8	20	1.7	稳定	0.3
38	稳定	1.34	0.951 8	15	1.28	稳定	0.06

从表 2 可看出, 除目标案例 36 外, 其余 4 个目标案例与最相似源案例结果一致, 但是, 目标案例 36 与其最相似源案例的安全系数最相近, 因此, 采用安全系数的计算参数作为搜索特征, 搜索结果是

非常合理的, 应用结果说明基于灰色关联分析的边坡案例检索方法有效合理。此外, 同表 3 相比, 检索出的源案例与目标案例的安全系数误差值均减小或相等, 说明灰色关联分析方法有明显优越性。

表 3 欧式距离检索结果的稳定性比较

目标案例			距离	最佳源案例			安全系数误差 $\Delta F$
序号	稳定状态	安全系数		序号	稳定状态	安全系数	
34	破坏	0.68	$1.19 \times 10^{-4}$	8	1.13	破坏	-0.45
35	破坏	1.11	0.015 3	26	1.20	破坏	0.09
36	稳定	1.20	0.043 1	4	2.045	破坏	-0.845
37	稳定	2.00	0.033 8	13	1.434	稳定	0.566
38	稳定	1.34	$7.25 \times 10^{-7}$	15	1.28	稳定	0.06

### 3 结论

本文基于案例推理和灰色关联理论, 提出灰色关联分析的边坡案例检索方法, 实例应用分析比较表明, 该方法不仅有效, 而且较之欧式距离的检索方法有明显优越性。

#### 参 考 文 献

- 1 沙步蛟, 陈 军等. 基于案例的推理及其在成品装船中的应用. 西南公路交通大学学报, 1997, 17(2): 113~115
- 2 王少梅, 王 红. 基于案例推理的门机方案设计系统初

探. 交通与计算机, 1996, 14(6): 1~4

- 3 刘沐宇. 基于范例推理的边坡稳定性智能评价方法研究: [学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2001. 12
- 4 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987: 35~50
- 5 陈新民, 罗国焜. 基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 638~641
- 6 谢全敏, 夏元友, 朱瑞庚. 基于神经网络的岩体边坡稳定性的灰色聚类空间预测法及其应用. 灾害学, 2001, 16(2): 18~20

(下转第 125 页)

表3 通渝隧道 K20+711 断面围岩拱顶下沉监测值

围岩类别 S	埋深 H/m	? <sub>1</sub>	? <sub>2</sub>	? <sub>3</sub>	? <sub>4</sub>	? <sub>5</sub>
Ⅲ	680	2.185	2.920	3.900	4.340	4.440

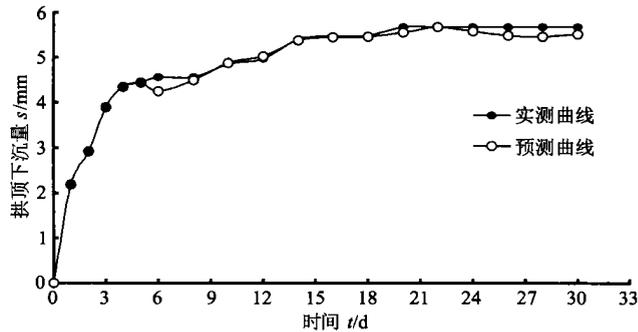


图2 K20+711 断面拱顶下沉神经网络预测曲线与实测曲线对比图

### 3 结论

本文根据通渝隧道围岩拱顶下沉位移变形的特性,采用神经网络技术建模并及时跟踪预测其后续开挖断面的围岩下沉位移变形量,以指导隧道施工实践;K20+711 断面的应用实例表明其预测结果与后来实测值的最大相对误差多小于 10%,该方法简易、有效。这说明利用 BP 神经网络技术进行公路隧道围岩变形时间序列的预测是可行的。

#### 参 考 文 献

- 1 张玉祥. 岩土工程时间序列预报问题初探. 岩石力学及工程学报, 1998, 18(5): 552~558
- 2 王穗辉. 人工神经网络在隧道地表变形预测中的应用. 同济大学学报, 2001, 22(10): 1147~1151

- 3 程相君, 王春宁, 陈生潭. 神经网络原理及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1995. 56~82
- 4 孙海涛, 吴 限. 深基坑工程变形预报神经网络法的初步研究. 岩土力学, 1998, 19(4): 11~15
- 5 黄润秋, 许 强. 工程地质广义系统科学分析原理及应用. 北京: 地质出版社, 1997. 48~59
- 6 靳 蕃, 范俊波. 神经网络与神经计算机. 成都: 西南交通大学出版社, 1991. 26~83
- 7 王大力. 用神经网络作地质数据分析. 石油物探, 1994, 33(4): 31~34
- 8 焦李成. 神经网络系统理论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992. 76~93
- 9 靳晓光. 公路隧道变形监测及其应用. 中国地质灾害防治学报, 2000, 11(1): 31~33

收稿日期: 2004-03-25

(上接第 112 页)

- 7 夏元友. 系统加权聚类法及其在滑坡稳定性预测中的应用. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 85~91
- 8 徐晓臻. 案例推理在多准则评价智能决策与支持系统中的应用研究. 计算机集成制造系统, 2001(1): 16~18

- 9 Sah N K, Sheorey P R & Upadhyaya L N. Maximum likelihood estimation of slope stability. Int. J. Rock Mech. Min. Geomech. Abstr., 1994, 31(1): 47~54

收稿日期: 2004-03-31