

基于改进集对分析方法的膨胀土胀缩性评价模型

汪明武¹, 李 丽², 金菊良¹

(1. 合肥工业大学土木建筑工程学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学资源与环境学院, 合肥 230009)

摘要: 膨胀土胀缩性等级评价是合理治理膨胀土的前提。本文应用模糊联系度概念改进了集对分析过程中差异度系数的确定方法, 进而探讨了膨胀土胀缩性等级的评价新模型, 以挖掘不确定性评价问题的有效信息, 实例应用及与其他方法对比结果表明该法有效可行。

关键词: 膨胀土; 集对分析; 差异度系数; 模糊联系度

作者简介: 汪明武(1972—), 男, 博士, 教授。主要从事城市环境岩土工程、防灾减灾工程和智能岩土工程的教学和科研工作。E-mail: wmw_lily@163.com。

0 引言

膨胀土对环境变化具有敏感性, 加上影响与控制因素具有可变性、不确定性等特点, 使膨胀土胀缩性等级评价问题变得复杂和不确定性, 而膨胀土胀缩等级评价是膨胀土合理治理的前提, 故研究基于实测数据的膨胀土胀缩性评价方法具有实际意义^[1~8]。

目前, 国内外膨胀土胀缩等级评价问题还没有得到很好解决, 如单个或少数指标的传统判别方法(如风干含水率分类法、塑性图分类法等)难以全面准确反映膨胀土实际情况, 而且不同分类法会出现相互矛盾的评价结果, 给决策和设计带来困难; 多因素的综合评判方法(如行业规范的查表法)虽得到广泛认可, 但对等级划分存在跳跃缺点; 模糊数学判别法^[3, 4](如灰色聚类法、关联度方法)虽解决了划分跳跃问题, 但实际应用时评价指标的权重确定很难; 基于神经网络的智能评价方法克服了权重确定难题^[5], 但实际应用时则受知识获取“瓶颈”问题限制; 可拓评价方法和可变模糊集方法^[7, 8], 它们虽能比较全面地考虑各个因素, 但也存在遗漏重要约束条件和权值确定问题, 故它们存在知识获取的瓶颈问题或评价指标权重

的确定等缺陷, 近些年发展起来的集对分析理论可避免这些难题, 也为膨胀土胀缩性等级的系统分析提供了新途径。

本文以集对分析理论为基础, 引入模糊联系度的思想对差异度系数进行数据充分挖掘, 以建立可避免知识获取和指标权重取值等难题的膨胀土胀缩性等级集对分析评价新模型, 从新的角度探索膨胀土胀缩性等级的综合评价方法。

1 膨胀土胀缩性改进集对分析模型

1.1 集对分析理论简介

集对分析方法是由我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种关于确定不确定系统同异反定量分析的系统分析方法, 该法能完整有效刻画确定不确定系统的对立统一关系, 并在工程界得到应用^[9, 10]。它是将被研究客观事物的确定不确定性视为一个确定不确定系统, 从同异反三方面研究客观事物之间的联系与转化, 即以联系度来描述系统的各种不确定性。集对分析理论最基本的概念是集对和联系度。集对是指具有一定联系的两个集合组成的整体。若给定集合 A 和 B , 则两个集合组成的集对表示为 $H=(A, B)$ 。设集对有 N 个特性, 其中共同具有的特性数为 S , 相互对立

的特性数为 P , 既不共同也不相互对立的特性数为 F , 则两个集合的联系度表达式为^[9]

$$\mu_{(A, B)} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中, i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$; j 为对立度系数, 常取 $j = -1$ 。

1.2 评价基本原理及流程

基于改进集对分析方法的膨胀土胀缩性等级评价基本原理: 计算待评样本评价指标的实测值集合与膨胀土胀缩性等级的标准集合之间的集对联系度大小, 并以对应等级隶属度大小来评定样本的胀缩性等级。对某个膨胀土胀缩性等级的集对联系度表达式构建的同异反判别标准为: 若评价指标值处于对应等级分类标准内则为同一; 若处于讨论等级的相邻等级内则为异; 若处于相隔等级内则为对立。

基于改进集对分析理论的膨胀土胀缩性等级评价具体步骤如下: ①首先基于样本实测值、膨胀土胀缩性等级分级标准和同异反判别标准构建集对联系度表达式; ②基于构建的表达式, 计算样本中落入讨论等级的相邻等级评价指标与标准上下限的接近程度, 并应用模糊联系度进行差异度的数据挖掘, 以求最终模糊联系度; ③计算样本对讨论等级的隶属度, 再按判定准则评定样本的胀缩性等级, 具体流程如图 1 所示。

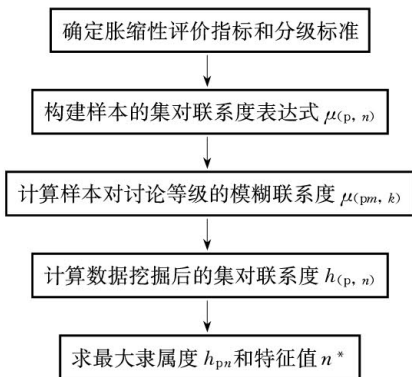


图 1 改进集对分析方法流程图

1.3 改进集对分析模型

集对差异度系数实质上包含宏观和微观两个层次的信息, 它实际上是宏观与微观层次相互结合的参量, 是集对分析的关键。对膨胀土胀缩性等级评价问题, 为确保评价结果的准确可靠和能体现对不确定性程度的刻画, 就必须在确定被评价样本的指标集合与评价标准集合间的同异反联

系度基础上, 还应深层次分析处于相邻等级中的评价指标与所讨论等级间关系, 即需对差异度系数进一步同异反定量分析。

本文应用模糊联系度思想来对差异度系数进行数据信息的充分挖掘和定量分析。而实现集对在某一特性上的同异反模糊刻画, 以及完整描述客观对象和主观认识的不确定性, 则应将公式(1)定义为信息意义上的确定性与不确定性模糊结构函数式。设模糊子集 \tilde{A} 、 \tilde{A}^c 为论域 X 中确定性信息和不确定性信息, 则它们是一种对立描述, 相应定义信息 x 关于 \tilde{A} 、 \tilde{A}^c 的确定度和差异度分别为 $\mu_{\tilde{A}}(x) = a + c$, $\mu_{\tilde{A}^c}(x) = b$, 且 $\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1$, 其中 a, c 为 x 对确定信息的同一度和对立度。若令 $a = S/N$, $b = F/N$, $c = P/N$, $a + b + c = 1$, 则待评样本 p 的膨胀土胀缩性等级属于 $n(n = 1, 2, \dots, G)$ 级的模糊联系度为

$$\mu_{(p, n)} = a_{p, n} + b_{p, n}i + c_{p, n}j \quad (2)$$

式中, $a_{p, n}$, $b_{p, n}$, $c_{p, n}$ 分别为待评价样本 p 对 n 级的同一度、差异度和对立度。由上分析可知, 差异度的取值过程实质是 b_n 的分解过程。假设样本的评价指标值随等级增加而增加时, p 中的评价指标实测值 x_{pm} 落在 n 级相邻等级 $k(k = n - 1$ 或 $n + 1, k \neq 0)$ 的指标标准内共有 M 个。若以接近程度特性来描述 x_{pm} 与 k 级指标标准的模糊联系度, 则落在相邻等级 $n + 1$ 内的评价指标 x_{pm} 与等级 n 的接近程度为 S_k/x_{pm} , x_{pm}/S_{k+1} , 并将归一化后数值作为 x_{pm} 与等级 n 的接近程度的肯定和否定, 即作为集对 (x_{pm}, B_n) 的同一度与对立度, 则差异度为

$$b = \frac{(x_{pm} - S_k)(S_{k+1} - x_{pm})}{(S_k + S_{k+1})x_{pm}} \quad (3)$$

式中, S_k, S_{k+1} 为相邻等级 m 指标的界限值。则落在相邻等级 $n + 1$ 内的样本 p 评价指标 m 、对 n 等级的模糊联系度可按式计算:

$$\mu_{p, n} = \frac{S_k S_{k+1}}{(S_k + S_{k+1})x_{pm}} + \frac{(x_{pm} - S_k)(S_{k+1} - x_{pm})}{(S_k + S_{k+1})x_{pm}} + \frac{x_{pm}}{S_k + S_{k+1}}j \quad (4)$$

而对样本 p 内评价指标值未落在 k 等级内的模糊联系度取 0。同理可求得落在相邻等级 $k = n - 1$ 内的样本 p 评价指标 m 、对 n 等级的模糊联系度可按式计算:

$$\mu_{pm, n} = \frac{x_{pm}}{S_k + S_{k+1}} + \frac{(x_{pm} - S_k)(S_{k+1} - x_{pm})}{(S_k + S_{k+1})x_{pm}} + \frac{S_k S_{k+1}}{(S_k + S_{k+1})x_{pm}} j \quad (5)$$

对 M 个指标对级别 n 分别进行同异反模糊分析, 并取平均值作为最终的模糊联系度, 并将分解值迭加入式(2) 即可得数据充分挖掘后的集对联系度:

$$h_{(p, n)} = (a_{p, n} + \bar{a}_{pm, n} b_{p, n}) + \bar{b}_{pm, n} \bar{b}_{p, n} i + (c_{p, n} + \bar{c}_{pm, n} b_{p, n}) j \quad (6)$$

式中, $\bar{a}_{pm, n}$, $\bar{b}_{pm, n}$, $\bar{c}_{pm, n}$ 分别为落在相邻等级内的评价指标对 n 级的同一度、差异度和对立度的平均值。

1.4 级别判定准则及级别特征值计算

基于数据挖掘后的集对联系度, 计算样本对讨论等级的隶属度 h_{pn} 。对于膨胀土胀缩性等级评价问题, 经数据挖掘后构成的集对联系度已满足实际工程的准确度要求, 即取 $i = 0$, $j = -1$ 来计算样本对讨论等级的隶属度, 再按最大隶属度对应的等级作为评价结果准则来判定等级。为定量描述评价结果, 本文采用级别特征值 n^* 来量化评定结果, 计算公式为^[7, 8]

$$n^* = \frac{\sum_{n=1}^G n \cdot \bar{h}_{pn}}{\sum_{n=1}^G \bar{h}_{pn}} \quad (7)$$

表 1 样本评价指标实测值

指 标	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
液限 W_L	60	50	47	57	66	57	44	43	42	47	44	55	63	53	41
胀缩总率 e_{ps}	7	5	4	6	7	5	4	1.4	3.3	5	4.5	6	8	4.2	0.65
塑性指数 I_p	36	36	24	25	35	29	23	16	21	27	38	38	42	18.5	13
天然含水率 ω	20	27	29	33	14	20	24	44	44	37	14	14.7	10	40	44
自由膨胀率 F_s	80	66	70	61	83	74	74	56	5	59	88	88	84	41.5	51

表 2 膨胀土胀缩性等级评价指标分类标准

类 别	液限 W_L	膨胀总率 e_{ps}	塑性指数 I_p	天然含水率 ω	自由膨胀率 F_s
极高 I	55~100	6~100	35~100	0~15	85~200
高 II	50~55	4~6	25~35	15~25	70~85
中 III	45~50	2~4	18~25	25~35	55~70
低 IV	40~45	0~2	0~18	35~100	40~55

$$\bar{h}_{pn} = \frac{h_{pn} - \text{Min}(h_{pn})}{\text{Max}(h_{pn}) - \text{Min}(h_{pn})} \quad (8)$$

式中, n^* 为待评价样本的膨胀土胀缩性等级特征值; h_{pn} 为样本对讨论等级 n 的隶属度。

2 实例应用及分析

为验证构建模型的正确性和有效性, 实例选用了文献^[6~8]的数据, 胀缩性等级评价指标选用了易于测定的液限 $W_L(m_1)$ 、胀缩总率 $e_{ps}(m_2)$ 、塑性指数 $I_p(m_3)$ 、天然含水率 $\omega(m_4)$ 、自由膨胀率 $F_s(m_5)$ 等, 等级分为极高 I、高 II、中 III、低 IV 四个, 则膨胀土胀缩性等级评价问题的集对 $H(A, B_n)$ 中的集合 A 由待评样本的评价指标 $m(m=1, 2, \dots, 5)$ 实测值构成, 集合 $B_n(n=1, 2, \dots, 4)$ 为膨胀土胀缩性等级对应的评价指标标准构成。样本指标实测值和等级评价标准见表 1 和表 2。基于改进集对分析方法的膨胀土胀缩性等级评价结果及与其他方法的对比分析结果见表 3。从表 3 可知, 基于改进集对分析方法的评价结果与文献^[6~8]方法的评价结果基本吻合, 故应用改进集对分析方法来评价膨胀土胀缩性等级是有效可行的, 而且评价过程可避免权值确定难题和需大样本训练获取信息等问题, 实例中定量计算结果也更接近样本实际情况。

表 3 改进集对分析方法评价结果及对比

样本 p	h_{p1}	h_{p2}	h_{p3}	h_{p4}	本文方法		熵可变模糊 集方法 $n^{* [8]}$	可拓 方法 ^[7]	模糊 方法 ^[6]
					等级	n^*			
1	0.601 0	0.680 1	-0.601 0	-1.000 0	II	1.67	1.53	I	I
2	-0.205 5	0.484 9	0.205 5	-0.605 8	II	2.18	2.59	II	II
3	-0.659 4	0.418 7	0.659 4	-0.381 3	III	2.70	3.05	III	III
4	-0.033 3	0.446 5	0.033 3	-0.581 8	II	2.03	2.50	III	II
5	0.814 6	0.280 5	-0.814 6	-1.000 0	I	1.50	1.45	I	I
6	0.198 1	0.851 0	-0.198 1	-1.000 0	II	1.90	1.94	II	II
7	-0.406 4	0.416 0	0.213 7	-0.384 0	II	2.45	2.93	III	III
8	-1.000 0	-0.820 4	0.467 8	0.779 6	IV	3.47	3.62	IV	IV
9	-1.000 0	-0.572 8	0.369 5	0.627 2	IV	3.35	3.59	IV	IV
10	-0.614 0	0.188 2	0.328 7	-0.211 8	III	2.81	3.08	III	III
11	0.383 3	-0.032 7	-0.576 1	-0.600 0	I	1.39	2.12	II	II
12	1.000 0	0.193 4	-1.000 0	-1.000 0	I	1.37	1.39	I	I
13	0.817 0	0.285 7	-0.817 0	-1.000 0	I	1.50	1.49	I	I
14	-0.628 2	-0.027 1	0.133 6	-0.027 1	III	3.00	3.19	IV	III
15	-1.000 0	-1.000 0	0.166 5	1.000 0	IV	3.63	3.82	IV	IV

现以样本实测值分布广的样本 2 为例,说明基于改进集对分析理论方法的膨胀土胀缩性等级评价具体操作。由样本 2 的实测值及分级标准可知其对各胀缩性等级的联系度为

$$\mu_{(p_2, B_1)} = \frac{1}{5} + \frac{2}{5}i + \frac{2}{5}j,$$

$$\mu_{(p_2, B_2)} = \frac{2}{5} + \frac{3}{5}i + \frac{0}{5}j,$$

$$\mu_{(p_2, B_3)} = \frac{2}{5} + \frac{2}{5}i + \frac{1}{5}j,$$

$$\mu_{(p_2, B_4)} = \frac{0}{5} + \frac{2}{5}i + \frac{3}{5}j.$$

则按改进模型样本 2 的联系度可继续数据挖掘,如由 $\mu_{(p_2, B_2)}$ 集对联系度表达式可知,样本 2 中指标实测值处于讨论等级 I 相邻等级 II 级的指标有 2 个,即指标 m_1 、 m_2 ,由指标分类标准(表 2)可知评价指标 m_1 对应等级 II 的界限值为 $S_2 = 50$ 、 $S_3 = 55$,将实测评价指标值代入式(4)即可求得 $\mu_{21,1} = 0.476 2 + 0.000 0i + 0.523 8j$,同理可求得指标 m_2 相应的模糊联系度,即 $\mu_{22,1} = 0.480 0 + 0.020 0i + 0.500 0j$,再按式(6)计算样本 2 的最终模糊联系度,可得 $h_{(2,1)} = 0.400 8 + 0.004 0i + 0.595 2j$,取 $i=0$ 、 $j=-1$,即可计算的样本 2 对讨论等级 I 的隶属度 $h_{21} = -0.194 4$ 。同理可类似求得 $h_{22} = 0.496 5$ 、 $h_{23} = 0.205 5$ 、 $h_{24} = -0.594 2$,按等级判定准则可判定样本 2 的等级为 II 级,膨胀

土属高胀缩性。再按式(7)和式(8)就可求得级别特征值为 2.17,同熵可变模糊的定量结果比较可知,基于改进集对分析的定量结果也更接近实际情况,且不需确定权值,评价过程操作相对简单。可见,模糊联系度取值过程是对不确定性的进一步分析过程。它是在对不确定性系统深入认识过程中获得的有效信息,从而可提高评价结果的准确性和可靠性。

3 结 语

膨胀土胀缩性等级评价问题是一个复杂的不确定问题。本文基于模糊联系度概念探讨了改进集对分析方法,并应用与膨胀土胀缩性等级的系统评价。实例应用及与其他方法对比结果表明,应用改进的集对分析方法来评价膨胀土胀缩性等级是有效可行的,且可深入挖掘样本的评价信息,该方法具有简便、定量严密的特点,也为其他不确定工程问题评价提供了一种新的参考。

参 考 文 献

[1] 刘松玉,季鹏,方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):9~13.
 [2] 王国强. 安徽省江淮地区膨胀土的工程性质研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):119~121.

- [3] 陈新民, 李生林. 膨胀土判别与分类的灰色关联分析法[J]. 岩土力学, 1996, 17(4): 30~34.
- [4] 黄卫, 钟理, 钱振东. 路基膨胀土胀缩等级的模糊评判[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 408~413.
- [5] 易顺民, 晏同珍. 膨胀土判别与分类的人工神经网络方法[J]. 地质科技情报, 1995, 14(3): 91~94.
- [6] 蔡奕, 王宝军, 施斌, 等. GIS 环境下膨胀土胀缩等级的模糊数学评判[J]. 工程勘察, 2002(2): 1~4.
- [7] 汪明武, 金菊良, 李丽. 可拓学在膨胀土胀缩等级评判中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 754~757.
- [8] 李丽, 汪明武. 基于熵可变模糊集理论的膨胀土胀缩性等级评价[C]. 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集, 2007: 464~468.
- [9] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [10] 万星, 丁晶, 张晓丽. 区域地下水资源承载力综合评价的集对分析方法[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(2): 8~10.