



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.026

曾志雄, 田海, 江名金. 基于遗传投影寻踪模型的膨胀土胀缩等级分类[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 155-160. ZENG Zhi xiong, TIAN Hai, JIANG Ming jin. Classification of the swelling shrinkage grade of expansive soils based on genetic projection pursuit model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 155-160. (in Chinese)

基于遗传投影寻踪模型的膨胀土胀缩等级分类

曾志雄¹, 田海¹, 江名金²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 广东省长大公路工程有限公司, 广州 510620)

摘要: 由于膨胀土的胀缩特性受多种因素的综合影响, 膨胀土胀缩等级分类是膨胀土处理中的一个难题。选取影响膨胀土胀缩等级分类的5个主要因素, 通过在各评价等级范围内按均匀分布随机构建标准样本, 结合遗传算法和投影寻踪方法, 获得最佳投影方向和样本最佳投影值, 利用逻辑斯谛曲线函数拟合最佳投影值与经验等级之间的非线性关系, 建立了膨胀土胀缩等级分类的遗传投影寻踪模型。最后, 将该模型应用到某实际工程中, 分类结果与实际情况相吻合, 验证了该模型的可行性和适用性, 该模型可以作为一种膨胀土胀缩等级分类的新方法。

关键词: 膨胀土; 胀缩等级; 遗传算法; 投影寻踪; 逻辑斯谛曲线

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0155-06

Classification of the swelling shrinkage grade of expansive soils based on genetic projection pursuit model

ZENG Zhi xiong¹, TIAN Hai¹, JIANG Ming jin²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Guangdong Provincial Changda Highway Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: Due to the integrated effects of multiple factors, the classification of the swelling shrinkage grade of expansive soils is one of the most difficult problems in expansive soil treatment. Five key factors were chosen to construct the model. By constructing standard samples through stochastic interpolation, we obtained the best projection direction and best projection values using the genetic algorithm and the projection pursuit method. Then we fitted a non-linear relationship between the best projection values and empirical values using the logistic curve function, and developed a new model for the classification of swelling shrinkage grade of expansive soils, i. e., the genetic projection pursuit model. Finally, the new model was applied to actual engineering. The results tallied well with the actual situation, and thus verified the feasibility and applicability of the proposed model. This model can be a new method for classifying the swelling shrinkage grade of expansive soils.

Key words: expansive soil; swelling shrinkage grade; genetic algorithm; projection pursuit; logistic curve function

膨胀土是一种由强亲水性矿物组成的高塑性黏土, 对气候变化极为敏感, 遇水膨胀, 失水收缩, 具有显著的胀缩特性, 可能造成建筑物开裂, 公路、铁路

塌方, 膨胀土边坡发生浅滑等工程灾害^[1-2]。膨胀土在我国分布极为广泛, 膨胀土工程灾害频发, 其中低估膨胀土胀缩等级是造成工程灾害的重要原因, 相

收稿日期: 2016-03-15 修回日期: 2016-10-17 网络出版时间: 2017-01-04
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20110525.1659.001.html>
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430634; 10872210)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41430634; 10872210)

作者简介: 曾志雄(1990), 男, 湖南郴州人, 主要从事特殊土土力学与地基基础处理方面的研究。E-mail: cezengzhixiong@163.com

通讯作者: 田海(1985), 男, 湖北武汉人, 博士, 主要从事特殊土土力学方面的研究工作。E-mail: htianova@gmail.com

反如果膨胀土胀缩等级分类过高则会导致工程量增大、工期延长,一定程度增加膨胀土处理的工程造价。前者会给建(构)筑物安全埋下隐患,后者则会造成人力财力的极大浪费^[3,4]。因此,合理地膨胀土胀缩等级进行分类具有重要的现实意义,也是膨胀土处理的首要任务。

现阶段,膨胀土分类中仍采用单指标或少数几个指标进行分类的传统方法,主要有风干含水率分类法^[5]和塑性图分类法^[6]。然而,影响膨胀土胀缩性的因素较多,部分指标不能全面反映膨胀土胀缩特性影响因素,传统分类方法会忽略一些重要信息,可能会误判膨胀土胀缩等级。为了提高膨胀土胀缩等级分类的准确性,近些年来,一些学者提出了模糊数学^[7],可拓学^[8,9],粗糙集^[10],Vague 集^[11],Fisher 判别分析^[2],距离判别分析^[4]等综合分类方法,这些方法在膨胀土胀缩等级分类中取得了不错的效果。然而,膨胀土胀缩特性是多种因素共同作用的结果,且不同因素对膨胀土胀缩性的影响程度和作用机制不同,目前仍然未形成一套系统的胀缩等级分类理论,膨胀土胀缩等级分类尚无通用的准则可寻。投影寻踪方法^[12]作为一种处理多因素复杂问题的统计方法,已经在边坡、围岩稳定性评价、岩爆预测等领域得到了广泛应用,并逐渐开始应用于膨胀性岩土胀缩等级分类中,方崇等^[13]利用投影寻踪方法,建立了膨胀土胀缩等级与最佳投影值之间的二次关系。孙元春等^[14]以新疆大坂输水隧洞岩样作为分析样本,根据样本最优投影值的移动平均趋势线将 20 个样本分为四类。然而,搜集大量代表性的样本实例是非常困难的,而且根据某个工程样本得到的最佳投影向量并不能真实反映各评价指标的重要程度,另外,相关研究表明用逻辑斯谛曲线来描述最佳投影值与评价等级之间的关系更为合适^[15]。基于此,本文通过在各评价等级范围内按均匀分布随机构建标准样本,利用遗传算法优化求解得到最佳投影方向,获得样本的最佳投影值,再利用逻辑斯谛曲线函数拟合最佳投影值与经验等级的非线性关系,建立膨胀土胀缩等级分类模型,然后将该模型应用于某实际工程中,并与其他方法分类结果进行比较验证该模型的可行性和合理性。

1 遗传投影寻踪模型

根据膨胀土样本评判指标 x_{ij}^* ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$) 以及经验等级值 y_i ($i = 1, 2, \dots, n$), n 为样本个数, m 为评判指标个数,建立遗传投影寻踪模型的具体步骤如下^[12,15]:

(1) 样本数据归一化。由于各评判指标的量纲不尽相同,数值范围相差较大,须在建模之前将指标数据变换到 $[0, 1]$ 区间,本文按照下式对数据进行归一化处理。

对于指标值越大等级值越大的指标:

$$x_{ij} = (x_{ij}^* - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (1)$$

对于指标值越大等级值越小的指标:

$$x_{ij} = (x_{j\max} - x_{ij}^*) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (2)$$

式中: x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$) 为经归一化处理后的样本评判指标; $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别表示第 j 个评判指标的最大值和最小值。

(2) 线性投影。投影方向 (a_1, a_2, \dots, a_m) 是维数与指标个数相同的 m 维单位向量,样本 i 在一维线性空间的投影值 z_i 可以表示为

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

(3) 构建目标函数。投影值 z_i 应该尽可能地提取评判指标 x_{ij} 的变异信息。类间距离 $S(\mathbf{a})$ 愈大,散布愈开,局部密度 $D(\mathbf{a})$ 愈大,分类愈明显。为了获得显著的散布结构,因此可以将目标函数 $Q(\mathbf{a})$ 定义为类间距离 $S(\mathbf{a})$ 与局部密度 $D(\mathbf{a})$ 的乘积:

$$Q(\mathbf{a}) = S(\mathbf{a}) \cdot D(\mathbf{a}) \quad (4)$$

其中,

$$S(\mathbf{a}) = \left[\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_a)^2 / (n-1) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$D(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_k) f(R - r_k) \quad (6)$$

式中: \bar{z}_a 为投影方向上投影值的均值; $r_k = |z_i - z_k|$ ($i, k = 1, 2, \dots, n$) 为投影值间的距离; R 为窗宽参数,其取值与样本数据结构有关,运算时可取 $\max(r_k) + m/2 \leq R \leq m$ 。 $f(R - r_k)$ 为单位阶跃函数:

$$f(R - r_k) = \begin{cases} 1 & R \geq r_k \\ 0 & R < r_k \end{cases} \quad (7)$$

(4) 优化投影方向。在给定样本数据的情况下,目标函数 $Q(\mathbf{a})$ 随着投影方向 \mathbf{a} 的变化而变化,当 $Q(\mathbf{a})$ 取得最大值时对应的投影方向就是所要寻找的最佳投影方向。因此,可以通过求解下面的最大化问题来寻找最佳投影方向:

$$\begin{cases} \max Q(\mathbf{a}) = S(\mathbf{a}) \cdot D(\mathbf{a}) \\ \text{s. t. } \|\mathbf{a}\| = \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

对于上述的最优化问题,用常规方法求解较为困难,本文利用 Matlab 软件中自带的遗传算法求解得到最佳投影方向 \mathbf{a}^* 。

(5) 建立膨胀土胀缩等级分类模型。根据步骤(4)中得到的最佳投影方向 \mathbf{a}^* ,将其代入公式(3)中得到样本的最佳投影值 z_i^* 。相关研究表明用逻辑

斯谛曲线来描述最佳投影值 z_i^* 与评价等级 y_i 之间的关系效果较好。逻辑斯谛曲线可以分为缓慢增加、快速增加和趋于稳定三部分,分别反映了事物的发生、发展和成熟生命周期规律,又称为生长曲线,其表达式为^[15]:

$$y_i^* = \frac{N}{(1 + e^{c_1 - c_2 z_i^*})} \quad (9)$$

式中: y_i^* 为第 i 个样本的模型计算值; N 为膨胀土胀缩等级分级数。曲线参数 c_1 和 c_2 , 可以通过求解下面的最小化问题得到。

$$\min F(c_1, c_2) = \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i) \quad (10)$$

对于上式的优化求解,同样利用遗传算法求解,不同的是,此处为最小化问题。

2 膨胀土胀缩等级分类模型

2.1 评判指标的选择

影响膨胀土胀缩性的因素较为复杂,主要包括矿物成分、粒度组成、液限、塑限、塑性指数、胀缩总率、自由膨胀率、膨胀力、比表面积、阳离子交换量、标准吸湿含水量^[2-3, 10]。现阶段,膨胀土胀缩等级的评判指标选取尚无通用准则可循,现行做法主要依据相关专家的经验选取。为了便于与其他方法比较,基于代表性、层次性、可操作性原则,本文中选用容易测量的液限 W_L 、胀缩总率 e_{ps} 、塑性指数 I_p 、天然含水率 w 、自由膨胀率 F 、5 个因素作为膨胀土胀缩等级的评判指标。将膨胀土胀缩等级分为 4 级:极高(第 1 类)、高(第 2 类)、中(第 3 类)、低(第 4 类)。本文选用的各评判指标分类标准与文献[9]一致(见表 1)。

表 1 膨胀土胀缩等级分类标准

Tab. 1 Classification standards for the swelling shrink age grades of expansive soils

评价类别	液限 (%)	胀缩总率 (%)	塑性指数 (%)	天然含水率 (%)	自由膨胀率 (%)	
极高	1	> 55	> 6	> 35	< 15	> 85
高	2	50~ 55	4~ 6	25~ 35	15~ 25	70~ 85
中	3	45~ 50	2~ 4	18~ 25	25~ 35	55~ 70
低	4	40~ 45	0.7~ 2	< 18	> 35	40~ 55

2.2 膨胀土胀缩等级分类模型构建

2.2.1 数据处理

搜集大量代表性的样本实例是非常困难的,而且根据某个工程样本得到的最佳投影向量并不能真实反映各评价指标的重要程度。为了获得能客观反映各评判指标重要程度的最佳投影方向,本文通过

随机产生数量足够大的标准样本集,将样本指标值代入(8)式中,利用优化算法(遗传算法)求解(8)式即可得到代表各指标重要程度的最佳投影方向。根据随机产生的标准样本得到的最佳投影方向能较好地避免了人为因素的影响。基于此,在表 1 所示的每一个等级区间内按均匀分布随机产生 10 个样本,共形成 40 个标准样本,标准样本的评判指标 x_{ij}^* ($i=1, 2, \dots, 40; j=1, 2, \dots, 5$) 以及对应的经验等级 y_i ($i=1, 2, \dots, 40$) (见表 2)。

2.2.2 模型建立

根据式(1)和式(2),将表 2 中的评判指标 x_{ij}^* ($i=1, 2, \dots, 40; j=1, 2, \dots, 5$) 进行归一化处理,代入(8)式得到一个复杂的非线性优化问题,利用 Matlab 软件中自带的遗传算法求解得到最佳投影方向 $\mathbf{a}^* = (0.4346, 0.4649, 0.4526, 0.4398, 0.4436)$ 。由于本文标准样本在各等级范围内随机产生,最佳投影方向客观反映了各因素的重要程度,投影方向中各分量的正负号表示胀缩等级与评判指标间的相互关系,投影方向各分量的绝对值反映了该评判指标对胀缩等级的影响程度大小,绝对值越大,该评判指标对胀缩等级分类的影响越大,分类等级大小对该指标的变化越敏感。本文得到的最佳投影方向 \mathbf{a}^* 中并没有特别小的分量,这也证明本文选择的评价指标是合理的。

将求得的最佳投影方向 \mathbf{a}^* 代入式(3)中得到样本的最佳投影值 z_i^* (见表 2)。图 1 为最佳投影值 z_i^* 与经验等级 y_i 的散点图,本文利用逻辑斯谛曲线函数拟合 z_i^* 与经验等级 y_i 的非线性关系,利用遗传算法优化求解得到逻辑斯谛曲线函数参数为 $c_1 = 2.548, c_2 = 2.512$, 建立膨胀土胀缩等级分类模型为

$$y_i^* = \frac{4}{(1 + e^{2.548 - 2.512 z_i^*})} \quad (11)$$

2.2.3 模型精度检验

将样本最佳投影值 z_i^* 代入式(11)中得到各样本等级计算值,模型计算值与经验值见表 2 和图 2。从表 2 和图 2 中可以看出,样本 35 和 36 计算误差最大,误差绝对值为 0.290,所有样本计算误差平均值为 0.130。各样本的模型计算值误差均在可接受的范围内,胀缩等级分类均与经验值一致,利用逻辑斯谛曲线拟合最佳投影值与经验等级之间关系精度较高,本文所建立的分类模型是合理、可靠的。

3 应用实例

同文献[9]和[11]一样,以文献[7]中某高速公

表 2 膨胀土胀缩等级经验值与模型计算值

Tab. 2 Empirical values and calculated values for expansive soils grades

样本号	液限 (%)	胀缩总率 (%)	塑性指数 (%)	天然含水率 (%)	自由膨胀率 (%)	投影值	经验值	模型计算值	评价	绝对误差
1	63.15	6.01	43.42	11.75	99.44	0.560	1	0.969	极高	-0.031
2	61.61	7.88	44.11	8.35	93.19	0.485	1	0.836	极高	-0.164
3	60.84	6.49	44.31	7.14	88.52	0.594	1	1.032	极高	0.032
4	75.07	6.71	39.05	11.18	87.11	0.520	1	0.897	极高	-0.103
5	63.97	6.05	38.61	8.57	93.74	0.612	1	1.067	极高	0.067
6	62.67	7.72	35.86	6.04	87.65	0.584	1	1.013	极高	0.013
7	64.95	6.51	39.45	3.64	93.27	0.532	1	0.917	极高	-0.083
8	67.78	8.80	35.62	12.73	88.06	0.521	1	0.898	极高	-0.102
9	61.54	6.43	39.12	1.24	98.23	0.520	1	0.897	极高	-0.103
10	60.62	6.58	49.64	6.97	93.36	0.503	1	0.866	极高	-0.134
11	53.07	4.91	30.59	18.51	80.93	1.046	2	2.079	高	0.079
12	53.85	5.83	34.15	23.08	71.45	1.058	2	2.110	高	0.110
13	50.57	5.92	31.78	24.15	83.38	1.032	2	2.044	高	0.044
14	53.95	5.97	29.12	18.60	81.53	0.987	2	1.932	高	-0.068
15	53.68	5.54	29.65	21.51	84.32	1.012	2	1.993	高	-0.007
16	52.95	5.87	27.96	16.78	77.14	1.033	2	2.046	高	0.046
17	53.87	4.74	34.91	19.14	81.38	1.007	2	1.981	高	-0.019
18	53.20	5.47	31.56	21.33	82.51	1.014	2	2.000	高	0.000
19	52.79	5.99	29.57	24.44	82.55	1.034	2	2.048	高	0.048
20	53.99	5.84	33.28	21.02	76.33	1.012	2	1.994	高	-0.006
21	47.71	3.43	23.92	29.43	69.08	1.426	3	2.951	中	-0.049
22	48.06	3.50	24.65	32.47	55.72	1.534	3	3.147	中	0.147
23	46.33	3.36	24.64	27.92	60.10	1.492	3	3.074	中	0.074
24	49.09	3.31	19.41	34.43	59.69	1.571	3	3.207	中	0.207
25	49.69	3.59	19.73	30.57	64.17	1.481	3	3.055	中	0.055
26	47.50	2.37	24.61	34.74	55.57	1.623	3	3.288	中	0.288
27	49.73	2.06	24.76	31.18	62.21	1.538	3	3.153	中	0.153
28	49.03	3.80	23.76	33.65	55.19	1.529	3	3.138	中	0.138
29	49.40	3.33	18.90	26.36	63.09	1.481	3	3.055	中	0.055
30	45.35	2.54	20.30	30.54	67.03	1.560	3	3.190	中	0.190
31	41.31	1.15	9.47	53.86	51.40	2.089	4	3.748	低	-0.252
32	41.39	0.93	8.22	40.97	44.22	2.062	4	3.731	低	-0.269
33	43.17	0.76	8.34	54.42	52.02	2.101	4	3.755	低	-0.245
34	43.68	1.20	9.69	52.94	46.15	2.089	4	3.748	低	-0.252
35	42.47	1.71	10.24	46.81	44.77	2.030	4	3.710	低	-0.290
36	40.07	1.26	9.28	47.45	53.64	2.030	4	3.710	低	-0.290
37	41.91	1.72	9.19	52.00	41.25	2.113	4	3.762	低	-0.238
38	42.60	0.98	8.46	53.07	44.44	2.139	4	3.776	低	-0.224
39	40.53	1.13	13.93	53.50	41.38	2.126	4	3.769	低	-0.231
40	41.92	1.43	10.43	41.23	40.75	2.035	4	3.714	低	-0.286

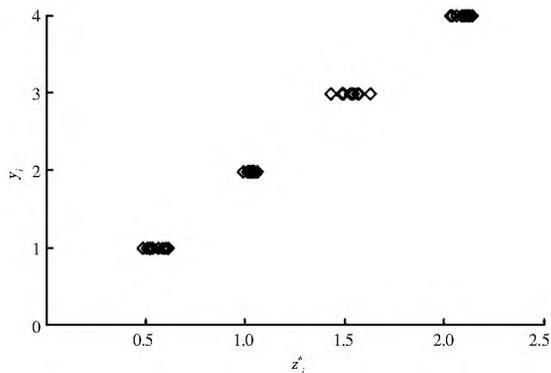


图 1 最佳投影值 z_i^* 与经验等级 y_i 的散点图

Fig. 1 Scatter diagram of best projection values and empirical values for expansive soils grades

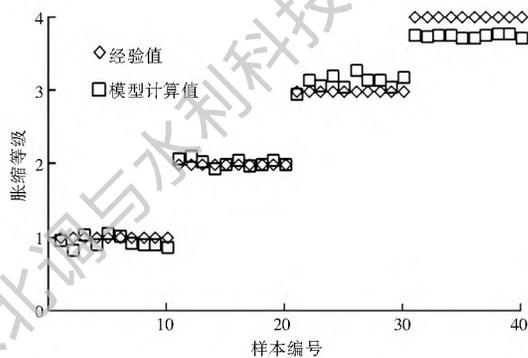


图 2 模型计算值与样本经验值对比

Fig. 2 Comparison between empirical and calculated values

路膨胀土(见表3)作为研究对象,运用本文建立的模型对膨胀土样本胀缩等级进行分类。首先将待测样本按式(1)和式(2)进行预处理,然后将归一化的样本评判指标和上述最佳投影方向代入(3)式中得到各待测样本的最佳投影值,再将最佳投影值代入

本文所建立分类模型(11)中得到样本等级计算值,根据等级计算值距各分类等级的接近程度判定各样本的胀缩等级,分类结果见表3,并将得到的分类结果与模糊数学、改进物元可拓和Vague集结果进行比较。

表3 不同方法膨胀土胀缩等级判别结果对比

Tab. 3 Comparison of results obtained by different methods for the identification and classification of expansive soils

样本序号	液限 (%)	胀缩总率 (%)	塑性指数 (%)	天然含水率 (%)	自由膨胀率 (%)	投影值	模型计算值	胀缩等级			
								本文	模糊数学方法 ^[7]	改进物元可拓方法 ^[9]	Vague集方法 ^[11]
1*	60	7	36	20	80	0.820	1.521	高	极高	极高	高
2	50	5	36	27	66	1.200	2.458	高	高	高	高
3	47	4	24	29	70	1.391	2.881	中	中	中	中
4*	57	6	25	33	61	1.259	2.596	中	高	高	高
5	66	7	35	14	83	0.694	1.237	极高	极高	极高	极高
6	57	5	29	20	74	1.076	2.156	高	高	高	高
7	44	4	23	24	74	1.363	2.825	中	中	中	中
9	43	1.4	16	44	56	1.880	3.592	低	低	低	低
11*	42	3.3	21	44	53	1.759	3.466	中	低	低	中
12	47	5	27	37	59	1.451	2.999	中	中	中	中
13*	44	4.5	38	14	88	1.008	1.983	高	高	极高	高
14	55	6	38	14.7	88	0.810	1.497	极高	极高	极高	极高
15	63	8	42	10	84	0.564	0.976	极高	极高	极高	极高
16	53	4.2	18.5	40	41.5	1.666	3.348	中	中	中	中
19	41	0.65	13	44	51	2.010	3.697	低	低	低	低

注:带*表示与其他分类方法不完全一致。

由表3的分类结果可以看出,四种方法分类结果基本一致,只是在样本1、样本4、样本11和样本13的胀缩等级分类上有细微差别。对于样本1,模糊数学评价、改进物元可拓方法的分类结果为1类,本文方法得到样本的等级计算值为1.521,略微偏向2类,与Vague集方法分类结果一样。对于样本11,本文模型计算值为3.466,分类结果与Vague集方法一致。对于样本13,本文的分类结果与模糊数学方法和Vague集方法相同。对于样本4,其他三种方法分类结果为2类,本文模型计算值为2.596,略微偏向3类。总的来看,本文方法得到的分类结果与其他方法大体相同,可见本文的分类结果是可信的,本文提出的膨胀土胀缩等级分类方法是合理可行的。另外,相比其他三种方法,本文方法得到的膨胀土胀缩等级值是连续的,即使同等级膨胀土也可进行胀缩等级排序。用连续的等级值来描述膨胀土胀缩性更符合实际情况,更有利于对不同危险程度的膨胀土工程灾害进行针对性治理。

4 结论

(1) 膨胀土胀缩性影响因素十分复杂,膨胀土胀缩等级分类是一个复杂的不确定系统问题。本文将遗传算法、投影寻踪技术以及逻辑斯蒂曲线函数相结合,选用与膨胀土胀缩性密切相关的液限 W_L 、胀缩总率 e_{ps} 、塑性指数 I_P 、天然含水率 w 、自由膨胀率 F_s 5个因素作为评判指标,得到最佳投影方向和样本最佳投影值,建立了膨胀土胀缩等级分类的遗传投影寻踪模型,方法简单直观,分类精度较高。

(2) 将该模型运用到某高速公路膨胀土胀缩等级分类中,并与其他方法分类结果进行比较,结果表明该模型分类结果与实际情况基本吻合,分类准确度高,可以作为一种新的膨胀土胀缩等级分类方法,相比其他分类方法,本文模型计算值是连续的,即使是同一等级中的膨胀土样本,也可进行胀缩等级排序。

(3) 本文建立的膨胀土胀缩等级分类方法仅在一个实际工程中进行了验证,在其他地区、其他工程分类结果是否可靠还需要深入研究,其普遍适用性

有待进一步验证。

参考文献(References):

- [1] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065-1073. (KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065-1073. (in Chinese))
- [2] 余颂, 陈善雄, 余飞, 等. 膨胀土分类与分类的 Fisher 分类分析方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 499-504. (YU Song, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Fisher's discriminant analysis method for identification classification of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 499-504. (in Chinese))
- [3] 陈善雄, 余颂, 孔令伟, 等. 膨胀土分类与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1895-1900. (CHEN Shan-xiong, YU Song, KONG Ling-wei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1895-1900. (in Chinese))
- [4] 宫凤强, 李夕兵. 膨胀土胀缩等级分类中的距离分类分析法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 463-467. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. Distance discriminate analysis to the classification of the grade of shrink and expansion for the expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 463-467. (in Chinese))
- [5] 谭罗荣, 张梅英, 邵梧敏, 等. 风干含水量 65W 用作膨胀土分类指标的可行性研究[J]. 工程地质学报, 1994, 2(1): 15-26. (TAN Luo-rong, ZHANG Mei-ying, SHAO Wu-min, et al. The practicability research on use of air dry moisture content W_{65} as identification index of the swelling soil[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(1): 15-26. (in Chinese))
- [6] 马桂芝. 应用塑性图对陕西特殊土的分类[J]. 西安地质学院学报, 1995, 17(2): 87-89. (MA Gui-zhi. The application of plasticity chart to shaanxi special soils discrimination[J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1995, 17(2): 87-89. (in Chinese))
- [7] 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. (CAI Yi, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. To judge the swell and shrink grades of expansive soil under GIS environment by fuzzy mathematics[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(2): 1-4. (in Chinese))
- [8] 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. (WANG Ming-wu, JIN Ju-liang, LI Li. Application of extension method to the
- evaluate of the grade shrinkage and expansion for the expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 754-757. (in Chinese))
- [9] 张慧颖, 曾建民. 物元可拓模型的改进及其在膨胀土分类中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1681-1684. (ZHANG Hui-ying, ZENG Jian-min. Improvement of matter element extension model and its application to classification of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1681-1684. (in Chinese))
- [10] 丁加明, 王永和, 丁力行. 基于粗糙不相容系统的膨胀土分类规则提取[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 396-400. (DING Jia-ming, WANG Yong-he, DING Li-xing. Generating expansive soil classification rule based on rough sets in consistent decision system[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 396-400. (in Chinese))
- [11] 魏东方, 汪明武, 李健, 等. 基于集对分析的膨胀土胀缩性 Vague 集评价模型[J]. 上海国土资源, 2013, 34(3): 89-92. (WEI Dong-fang, WANG Ming-wu, LI Jian, et al. A vague sets model based on set pair analysis for evaluating the swelling shrinkage characteristics of expansive clay[J]. Shanghai Land & Resources, 2013, 34(3): 89-92. (in Chinese))
- [12] 赵小勇. 投影寻踪模型及其在水土资源中的应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006. (ZHAO Xiao-yong. Projection pursuit model and its applications in water and soil resources[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2006. (in Chinese))
- [13] 方崇, 吕海波, 杨军平, 等. 高速公路路基膨胀土分类的投影寻踪方法[J]. 公路与汽运, 2009(6): 80-83. (FANG Chong, LYU Hai-bo, YANG Jun-ping, et al. Projection pursuit method for classification of expansive soil in highways[J]. Highways & Automotive Applications, 2009(6): 80-83. (in Chinese))
- [14] 孙元春, 尚彦军, 曲永新. 投影寻踪模型在膨胀岩判别与分级中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2570-2574. (SUN Yuan-chun, SHANG Yan-jun, QU Yong-xin. Application of projection pursuit model to swelling identification and grading of argillaceous rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2570-2574. (in Chinese))
- [15] 徐飞, 徐卫亚, 刘造福, 等. 基于 PSO-PP 的边坡稳定性评价[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1708-1713. (XU Fei, XU Wei-ya, LIU Zao-bao, et al. Slope stability evaluation based on PSO-PP[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1708-1713. (in Chinese))