

盐渍土分类的模糊聚类法探讨

白应生¹,余承华¹,康 婷¹,郭增玉²,孟 飙¹

(1 空军工程大学 工程学院,陕西 西安 710038;2 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

【摘 要】 **【目的】**寻求更为准确的盐渍土分类方法。**【方法】**对模糊聚类法的原理进行了介绍,并结合西北某机场重要建筑物的地质特点,利用模糊聚类法对该地区 10 个检测点的地基土进行了分类。**【结果】**西北某机场 10 个检测点的地基土可分为 4 类,即(1,2,3,4,8,9)区域属于亚硫酸盐渍土;(5,6)区域属于亚氯盐渍土;(10)区域属于碳酸盐渍土;而(7)区域属于非盐渍土。**【结论】**盐渍土分类的模糊聚类法较传统分类法简单、准确可靠,尤其是能具体判断出某点或某区域是否为盐渍土,对盐渍土的评判和地基处理有较大帮助。

【关键词】 盐渍土;土壤分类;盐渍土地基;模糊聚类法

【中图分类号】 TU448 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2008)02-0194-05

Study on fuzzy clustering methods of the saline soil classification

BAI Ying-sheng¹, YU Cheng-hua¹, KANG Ting¹, GUO Zeng-yu², MENG Biao¹

(1 Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;
2 Institute of Water Conservancy and Hyclroelectric Power, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shannxi 710048, China)

Abstract:**【Objective】** This study aims to find out an accurate classification method for saline soil.**【Method】** Fuzzy clustering methods was introduced, combining the geology characteristics with some important buildings in a northwest airport. The foundation soil in 10 testing points within the region was examined and classified by fuzzy clustering methods.**【Result】** The 10 points can be divided into 4 types to examine the foundation soil, points 1,2,3,4,8,9 belong to the sulfurous acid saline soil, points 5,6 to second chlorine saline soil and point 10 to carbonate saline soil. However, point 7 belongs to the non-saline soil. The paper adopts fuzzy clustering methods to carry on a classification to the saline soil.**【Conclusion】** Fuzzy clustering methods of saline soil classification is more simple and accurate than traditional one. Particularly, we can judge one point or some scope whether it is saline soil. This is of great help to judge saline soil and process foundation.

Key words: saline soil; soil classification; saline soil foundation; fuzzy clustering methods

盐渍土分类结果既是对盐渍土进行评判的主要依据之一,也是地基设计和处理时的重要参考资料。在工程地质勘察和相关工程技术研究中,工程技术人员对盐渍土的分类往往较难把握。国外对盐渍土土壤分类的研究从 60 年代前就已开始,以前苏联为代表,对盐渍土组成成分、类别、物理特性和化学特性等进行了较为全面的试验研究^[1]。从国外对

盐渍土分类的方法可以看出,他们只是宏观上对盐渍土的性质进行了评判,均存在一定的缺陷。我国对盐渍土的研究进行了大量工作,在盐渍土的分类中一直沿用前苏联的分类方法,但在盐渍土的具体分类过程中,又结合了我国盐渍土的分布特点和范围进行了部分调整,但此分类法由于考虑的影响因素不全面,分类所得的结果并不能完全反映土壤实

* [收稿日期] 2007-01-31

[作者简介] 白应生(1972—),男,陕西佳县人,助教,硕士,主要从事岩土工程研究。E-mail:bysapple@126.com

际状况,其缺陷性主要表现以下两个方面^[2-7]:

1)按土中含盐性质分类时,只考虑了 100 g 土中不同阴离子含量的比值,而未考虑阴离子在土中的含量。根据盐渍土的定义,这种分类方法由于未考虑阴离子在土中的含量,会造成将不是盐渍土的地基土被误判为盐渍土。

2)按土中含盐量分类时,只考虑了阴离子在土中的含量,而未考虑 100 g 土中不同阴离子含量的比值。这种方法并未说明哪种盐起主导作用。

因此,寻求科学的盐渍土分类方法,对正确评判盐渍土具有很大帮助。在测定盐渍土含盐量的过程中,由于试验条件、地质分布规律和人为因素等的不确定性,使得试验数据有很大的模糊性,因而采用模糊聚类法更能满足实际工程要求。为此,作者对模糊聚类法的原理进行了介绍,此方法不仅考虑了不同阴离子含量的比值,而且考虑了阴离子在土中的含量,并结合西北某机场重要建筑物的地质特点,利用模糊聚类法对该地区地基土进行分类,以期从事盐渍土地基处理技术研究提供参考,且对有效地控制工程质量,具有积极的意义^[8-10]。

1 模糊聚类法的基本原理

模糊聚类法是按照一定的要求和规律,采用模糊数学理论和方法将事物进行分类的一种数学方法,其本是数理统计中多元分析的一个分支,由于现实的分类往往伴随着模糊性,所以用模糊数学方法来进行聚类分析,会显得更自然且更符合客观实际。它的基本思想是,首先将所研究的 n 个样本各自分为一类,然后计算它们之间的相似程度或距离,并将最相似(或距离最短)两类归为新的一类。如此反复进行,直至所有样本都归为惟一类为止^[11-13]。该法的具体步骤如下:

1.1 原始数据准备

通过试验可以得到原始数据(氯根、硫酸根、碳酸根等阴离子在土中的含量),对这些数据进行处理并抽象化(主要是对数据进行放大或缩小统一倍数,不同的列其倍数可以不同),即可得到原始数据矩阵。

1.2 原始数据标准化

一般地,设某一分类问题共有 n 个样本, m 个特性指标,则原始数据矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix}。$$

(1)

由于 m 个特性指标的量纲和数量都不同,所以直接利用上式进行计算,一些数量级比较小的特性指标对分类结果会产生影响。为克服这一缺点,必须对原始数据矩阵进行无量纲化处理,使每一指标统一在某一共同的数据特性范围内。这个处理过程称为原始数据标准化。本研究采用均值标准化方法,即将原始数据矩阵中的元素(y_{ij})除以该列的标准值($\bar{y}_j$),其商即为标准化数据矩阵的元素 x_{ij} ,

$$x_{ij} = y_{ij} / \bar{y}_j。$$

(2)

1.3 构造模糊相似矩阵

有了标准化数据矩阵 X 后,就可以根据此矩阵构造出 n 行 n 列的相似矩阵 R 。目前构造相似矩阵的方法很多,本研究采用绝对指数法,其公式如下:

$$r_{ij} = \exp(-c \sum_{k=1}^m |x_{ik} - x_{jk}|)。$$

(3)

式中: r_{ij} 为描述对象 x_i, x_j 之间的相关程度,且 $r_{ij} \in [0, 1], r_{ij} = r_{ji}, r_{ii} = 1 (i, j = 1, \cdots, n); r_{ij}$ 为标准化矩阵 X 的 i 行 k 列; r_{ji} 为标准化矩阵 X 的 j 列 k 行。

1.4 计算传递闭包 $t(R)$

由步骤 1.3 中所得的相似矩阵 R 经多次平方运算后可得,

$$R \Rightarrow R^2 \Rightarrow R^4 \Rightarrow \cdots \Rightarrow R^{2^k}, t(R) = R^{2^k}。$$

(4)

令 $2^k \leq n$, 得 $k \leq \lg n$, 即至多复合 $[\lg n] + 1$ 次即可求得 $t(R)$ 。

1.5 动态聚类

根据不同的阈值(λ)得出不同的聚类结果,其分类的方法主要有 3 种,即传递闭包法、图论法和 ISO-DATA 法。本研究采用传递闭包法,得到 R 的传递闭包 $t(R)$ 后,选取不同的 λ , 就可以得到不同的 λ 水平截矩阵。一个 λ 水平截矩阵就代表一个聚类。当 λ 从 1 变化到 0 时,其分类数从 n 类变化到 1 类。

2 盐渍土的模糊聚类法应用

为了更清楚地说明盐渍土模糊聚类分析的全过程,作者结合西北某机场重要建筑物的地质情况来逐步阐述。为了简便计算,这里仅选出了盐渍土中 $Cl^- / SO_4^{2-}、(CO_3^{2-} + HCO_3^-) / (Cl^- + SO_4^{2-})$ 及 SO_4^{2-} 在 100 g 土中含量作为指标,来说明盐渍土的模糊聚类法^[14]。

2.1 原始数据准备

西北某机场重要建筑物的地基面积约为 100 m×200 m,根据其地质特点共选择 10 个点的地基土进行检测,检测点分布见图 1。

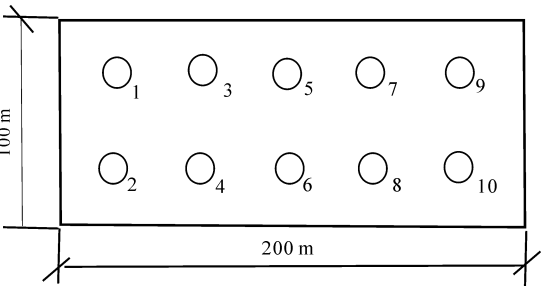


图 1 西北某机场试验检测点的分布示意图
Fig.1 Sketch map of distribution of the test dots is in a northwest airport

对各分布点取样,分别测定土样中各阴离子的含量(cmol/kg),由各阴离子的含量计算 Cl^- 与 SO_4^{2-} 、 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 之间的比值,所得数据如表 1 所示。

2.2 原始数据标准化

由 1.2 节中的内容可知,根据表 1 的数据可得到原始数据矩阵;然后将原始数据矩阵标准化,为了在标准化过程中不排斥数量级较小特性指标对分类结果的影响,必须先对原始数据进行无量纲化处理,使每一指标值统一在某一共同的数据特性范围

内,以保证分类结果准确。为了使矩阵在计算的过程中不发生失真现象,使其尽可能在同一个特性范围内,因而取 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的值为 1.0, $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)/(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 的值为 1.0, SO_4^{2-} 取值为 70.4 cmol/kg,经计算后得到标准化矩阵 $\mathbf{Y}^*$;最后将第一列数据取倒数所得的矩阵记为 $\mathbf{X}$ 。上述计算程序可用 MATLAB 7.1 来实现。

表 1 西北某机场 10 个地基土样中的阴离子含量及其比值
Table 1 Anion content and its specific value of 10 foundation soil is in a northwest airport

测点序号 No.	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	$\frac{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{2-}}{\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-}$	$\text{SO}_4^{2-}/$ (cmol · kg ⁻¹)
1	0.76	0.21	211.2
2	0.87	0.23	201.3
3	0.78	0.25	226.1
4	0.82	0.22	196.2
5	1.15	0.11	186.0
6	1.36	0.23	209.6
7	2.05	0.13	96.5
8	0.78	0.15	227.3
9	0.85	0.20	198.2
10	0.56	0.17	176.7

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0.76 & 0.21 & 211.2 \\ 0.87 & 0.23 & 201.3 \\ 0.78 & 0.25 & 226.1 \\ 0.82 & 0.22 & 196.2 \\ 1.15 & 0.11 & 186.0 \\ 1.36 & 0.23 & 209.6 \\ 2.05 & 0.13 & 96.5 \\ 0.78 & 0.15 & 227.3 \\ 0.85 & 0.20 & 198.2 \\ 0.56 & 0.17 & 176.7 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{标准化}} \mathbf{Y}^* = \begin{bmatrix} 0.760\ 0 & 0.210\ 0 & 3.000\ 0 \\ 0.870\ 0 & 0.230\ 0 & 2.859\ 4 \\ 0.780\ 0 & 0.250\ 0 & 3.211\ 6 \\ 0.820\ 0 & 0.220\ 0 & 2.786\ 9 \\ 0.150\ 0 & 0.110\ 0 & 2.642\ 0 \\ 1.360\ 0 & 0.230\ 0 & 2.977\ 3 \\ 2.050\ 0 & 0.130\ 0 & 1.37\ 0 \\ 0.780\ 0 & 0.150\ 0 & 3.228\ 7 \\ 0.850\ 0 & 0.200\ 0 & 2.815\ 6 \\ 0.560\ 0 & 0.170\ 0 & 2.509\ 9 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{第一列数据取倒数}} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1.315\ 8 & 0.210\ 0 & 3.000\ 0 \\ 1.149\ 4 & 0.230\ 0 & 2.859\ 4 \\ 1.282\ 1 & 0.250\ 0 & 3.211\ 6 \\ 1.219\ 5 & 0.220\ 0 & 2.786\ 9 \\ 0.869\ 6 & 0.110\ 0 & 2.642\ 0 \\ 0.735\ 3 & 0.230\ 0 & 2.977\ 3 \\ 0.487\ 8 & 0.130\ 0 & 1.370\ 7 \\ 1.282\ 1 & 0.150\ 0 & 3.228\ 7 \\ 1.176\ 5 & 0.200\ 0 & 2.815\ 3 \\ 1.785\ 7 & 0.170\ 0 & 2.509\ 9 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 构造模糊相似矩阵

有了标准化数据矩阵后,可以采用绝对指数法

构造出 n 行 n 列的相似矩阵 $\mathbf{R}$ 。其计算结果如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.721\ 1 & 0.751\ 7 & 0.726\ 6 & 0.404\ 9 & 0.536\ 2 & 0.079\ 1 & 0.724\ 4 & 0.716\ 1 & 0.367\ 9 \\ 0.721\ 1 & 1.000\ 0 & 0.603\ 6 & 0.858\ 5 & 0.539\ 5 & 0.587\ 4 & 0.105\ 4 & 0.558\ 8 & 0.903\ 9 & 0.351\ 4 \\ 0.751\ 7 & 0.603\ 6 & 1.000\ 0 & 0.596\ 2 & 0.325\ 6 & 0.448\ 8 & 0.063\ 6 & 0.889\ 5 & 0.575\ 9 & 0.276\ 5 \\ 0.726\ 6 & 0.858\ 5 & 0.596\ 2 & 1.000\ 0 & 0.546\ 2 & 0.504\ 3 & 0.106\ 7 & 0.653\ 1 & 0.912\ 6 & 0.409\ 3 \\ 0.404\ 9 & 0.539\ 5 & 0.325\ 6 & 0.546\ 2 & 1.000\ 0 & 0.554\ 6 & 0.187\ 7 & 0.353\ 8 & 0.565\ 4 & 0.330\ 1 \\ 0.536\ 2 & 0.587\ 4 & 0.448\ 8 & 0.504\ 3 & 0.554\ 6 & 1.000\ 0 & 0.141\ 7 & 0.415\ 5 & 0.530\ 9 & 0.206\ 4 \\ 0.079\ 1 & 0.105\ 4 & 0.063\ 6 & 0.106\ 7 & 0.187\ 7 & 0.141\ 7 & 1.000\ 0 & 0.069\ 1 & 0.110\ 4 & 0.084\ 0 \\ 0.724\ 4 & 0.558\ 8 & 0.889\ 5 & 0.563\ 1 & 0.353\ 8 & 0.415\ 5 & 0.069\ 1 & 1.000\ 0 & 0.566\ 1 & 0.288\ 7 \\ 0.716\ 1 & 0.903\ 9 & 0.575\ 9 & 0.912\ 6 & 0.565\ 4 & 0.530\ 9 & 0.110\ 4 & 0.566\ 1 & 1.000\ 0 & 0.388\ 8 \\ 0.367\ 9 & 0.351\ 4 & 0.276\ 5 & 0.409\ 3 & 0.330\ 1 & 0.206\ 4 & 0.084\ 0 & 0.288\ 7 & 0.388\ 8 & 1.000\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

上述中模糊相似矩阵 $\mathbf{R}$ 的元素可由公式(3)求出,此时公式中的 c 取值为 1,即有

$$r_{ij} = \exp(-\sum_{k=1}^m |x_{ik} - x_{jk}|) \quad (7)$$

2.4 计算传递闭包

本例中 n 为 10,由 1.4 小节中的内容可知, $2^3<$

$$t(R)=\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.726\ 6 & 0.751\ 7 & 0.726\ 6 & 0.565\ 4 & 0.587\ 4 & 0.187\ 7 & 0.751\ 7 & 0.726\ 6 & 0.409\ 3 \\ 0.726\ 6 & 1.000\ 0 & 0.721\ 1 & 0.903\ 9 & 0.565\ 4 & 0.587\ 4 & 0.187\ 7 & 0.721\ 1 & 0.903\ 9 & 0.409\ 3 \\ 0.751\ 7 & 0.721\ 1 & 1.000\ 0 & 0.726\ 6 & 0.565\ 4 & 0.587\ 4 & 0.187\ 7 & 0.889\ 5 & 0.761\ 6 & 0.409\ 3 \\ 0.726\ 6 & 0.903\ 9 & 0.726\ 6 & 1.000\ 0 & 0.565\ 4 & 0.587\ 4 & 0.187\ 7 & 0.724\ 4 & 0.912\ 6 & 0.409\ 3 \\ 0.565\ 4 & 0.565\ 4 & 0.565\ 4 & 0.565\ 4 & 1.000\ 0 & 0.554\ 6 & 0.187\ 7 & 0.565\ 4 & 0.565\ 4 & 0.409\ 3 \\ 0.587\ 4 & 0.587\ 4 & 0.587\ 4 & 0.587\ 4 & 0.554\ 6 & 1.000\ 0 & 0.187\ 7 & 0.558\ 8 & 0.587\ 4 & 0.4\ 9\ 3 \\ 0.187\ 7 & 0.187\ 7 & 0.187\ 7 & 0.187\ 7 & 0.187\ 7 & 0.187\ 7 & 1.000\ 0 & 0.187\ 7 & 0.187\ 7 & 0.187\ 7 \\ 0.751\ 7 & 0.721\ 1 & 0.889\ 5 & 0.724\ 4 & 0.565\ 4 & 0.558\ 8 & 0.187\ 7 & 1.000\ 0 & 0.716\ 1 & 0.409\ 3 \\ 0.726\ 6 & 0.903\ 9 & 0.716\ 1 & 0.912\ 6 & 0.565\ 4 & 0.587\ 4 & 0.187\ 7 & 0.716\ 1 & 1.000\ 0 & 0.409\ 3 \\ 0.409\ 3 & 0.409\ 3 & 0.409\ 3 & 0.409\ 3 & 0.409\ 3 & 0.409\ 3 & 0.187\ 7 & 0.409\ 3 & 0.409\ 3 & 1.000\ 0 \end{bmatrix}.$$

(8)

2.5 动态聚类

根据不同的阈值 ,得到了西北某机场盐渍土的模糊聚类图(图 2)。

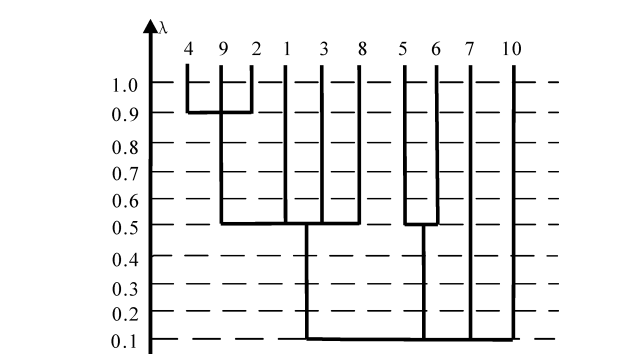


图 2 西北某机场盐渍土的模糊聚类结果
Fig. 2 Diagram of fuzzy clustering result of saline soil is in a northwest airport

由图 2 可知,当 $0.9<\lambda\leq 1.0$ 时,2,4,9 归为一类,其他各自为一类,共 8 类;当 $0.7<\lambda\leq 0.9$ 时,1,2,3,4,8,9 为一类,其他各自为一类,共 5 类;当 $0.5<\lambda\leq 0.7$ 时,1,2,3,4,8,9 归为一类,5,6 及 7,10 各为一类,共 4 类;当 $0.1<\lambda\leq 0.5$ 时,全部划分为惟一类。

根据经验,并结合 SO_4^{2-} 的含量,水平阈值为 $0.5<\lambda\leq 0.7$,将检测区域分为 4 类,即(1,2,3,4,8,9)区域属于亚硫酸盐渍土;(5,6)区域属于亚氯盐渍土;(10)区域属于碳酸盐渍土;而(7)区域属于非盐渍土。

综上所述,本例在对西北某机场重要建筑物的地质情况进行盐渍土的模糊聚类中,分类之前所摄取的数据和检测手段虽与传统的盐渍土分类方法基本相似,但采用这种分类方法的准确度明显高于常规分类方法。譬如本研究中西北某机场(10)和(7)区域,按常规分类方法得出的分别是亚硫酸盐渍土

10,得 $k=3$,故 R 经 3 次平方运算后得 $t(R)$ 为:

和亚氯盐渍土^[15-16],而用盐渍土模糊聚类法得出的分别是碳酸盐渍土和非盐渍土。

3 结 论

在机场跑道工程、道路工程及大型建筑物的地基处理过程中,由于占地范围广,盐渍土的分布往往不均匀,为了有针对性地采取有效的地基处理方法,对盐渍土进行准确分类显得十分重要。将本研究介绍的盐渍土分类模糊聚类法与传统的盐渍土分类方法相比,可得出以下结论:

1)常规分类方法只是对盐渍土性质的一种宏观评判,可用于整体上判定某土是否属于盐渍土或达到哪一级,即属于超盐渍土、中盐渍土及弱盐渍土的哪一种;而盐渍分类模糊聚类法是一种量化的方法,能够具体确定某点或某范围的土属于哪一种类型盐渍土。

2)常规分类方法按土中含盐性质分,只体现了盐渍土中阴离子之间含量的比值,并未定量描述各离子的含量;盐渍土分类模糊聚类法则克服了这一缺陷,使得分类方法更加合理、更符合实际。

3)常规分类方法按土中含盐量分类,只是对各阴离子含量的定量描述,未考虑阴离子含量之间的比值,因而不全面;盐渍土分类模糊聚类法中不仅考虑了各阴离子含量之间的比值,而且定量地描述了各阴离子在土中的含量(在本研究中尽管只考虑了 SO_4^{2-} 的含量,因为其他阴离子的含量可通过他们之间的比值计算得到),故分类结果较为准确。

4)盐渍土分类模糊聚类法简单,原理易于理解,只需将原始数据输入计算机即可。另外,其模糊聚类图也可通过计算机来完成。

[参考文献]

[1] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991.

- Xu Y Z. Saline soil foundation [M]. Beijing:Chinese Constructs the Industry Publisher,1991. (in Chinese)
- [2] 黎立群. 盐渍土基础知识[M]. 北京:科学出版社,1996.
Li L Q. Saline soil foundation knowledge[M]. Beijing: Science Publisher,1996. (in Chinese)
- [3] 常士骧. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
Chang S B. Engineering geology manual [M]. Beijing:Chinese Constructs the Industry Publisher,1994. (in Chinese)
- [4] 铁道部第一勘测设计院. 盐渍土地地区铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
The First of Railroad Surveys to Designning Institute. The area railroad engineering of the Saline soil [M]. Beijing: Chinese Railroad Publisher,1988. (in Chinese)
- [5] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册(路基)[M]. 北京:人民交通出版社,1996.
The Second Highway Investigates to Designning Institute of Ministry of Transportation. The highway design manual(road bed)[M]. Beijing:People the Transportation Publisher,1996. (in Chinese)
- [6] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.
Lin Z Y. The rock soil engineering investigates to design the manual [M]. Shenyang:Science Technique Publisher of Liaoning,1996. (in Chinese)
- [7] 建设部综合勘察研究设计院. 岩土工程勘察规范(GB50021—2001)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying. The rock soil engineering investigates the norm (GB50021—2001)[M]. Beijing: Chinese Constructs the Industry Publisher,2002. (in Chinese)
- [8] 范 珉,余承华,史业宏. 综合费-效分析的军用机场建设项目灰色评价[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(1):21-23.
Fan M,Yu C H,Shi Y H. Gray appraisal of military airport project with integrated cost-benefit/effectiveness analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2007,8(1):21-23. (in Chinese)
- [9] 黄立度,席元伟,李俊超. 硫酸盐渍土道路盐胀病害的基本特征及其防治[J]. 中国公路学报,1997(2):39-47.
Huang L D,Xi Y W,Li J C. The feature and prevention of the highway salt dilating distress in the vitriol salinized soil area [J]. China Journal of Highway and Transport,1997(2):39-47. (in Chinese)
- [10] 刘 艳,许金余. 灰色系统理论在混凝土侵砌深度计算中的应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(4):92-94.
Liu Y,Xu J Y. Application of the gray system theories to pe- termination of depth calculation of projecties penetration into concrete [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2006,7(4):92-94. (in Chinese)
- [11] 王新洲,史文中,王树良. 模糊空间信息处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
Wang X Z,Shi W Z,Wang S L. The misty space information processing [M]. Wuhan:The University of Wuhan Publisher, 2003. (in Chinese)
- [12] 高江平,吴家惠,杨尚荣. 硫酸盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报,1997(1):10-15.
Gao J P,Wu J H,Yang S R. Analysis of the interaction laws factors upon salt heaving of all influeucing of the sulphate salty properties soil [J]. China Journal of Highway and Transport,1997(1):10-15. (in Chinese)
- [13] 李 芳,高江平,王高勇. 硫酸盐渍土盐胀与低层建筑[J]. 西安公路交通大学学报,1998(2):25-27.
Li F,Gao J P,Wang G Y. Salt expansion of sulphate salty soil and low storied building [J]. Journal of Xi'an Highway Uni- versity,1998(2):25-27. (in Chinese)
- [14] 杨丽英,李 斌. 氯与硫酸根比值对硫酸盐渍土工程性质影响的研究[J]. 冰川冻土,1997(1):84-89.
Yang L Y,Li B. Study on the infuence of on the engineering behaviours of sulphate saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1997(1):84-89. (in Chinese)
- [15] 黄晓波. 新疆克拉玛依民用机场盐渍土地基处理试验成果报告[R]. 北京:空军工程设计局,2003.
Huang X B. The Kelemayi in Xinjiang depends on the saline soil foundation processing report of the public airport to ex- periment result [R]. Beijing: The Engineering of Air Force Designing Bureau,2003. (in Chinese)
- [16] 于 昆. 盐渍土地地区高等级公路设计施工[J]. 山西交通科技, 2002(6):23-26.
Yu K. The Design and construction of high-Grade highway in salty soil area[J]. Shanxi Science & Technology of Communi- cations,2002(6):23-26. (in Chinese)