

文章编号:1671-8879(2005)01-0015-05

基于模糊信息优化处理法的膨胀土分类

刘悦¹, 黄强兵², 胡长顺¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:针对膨胀土胀缩性“高低”划分属于模糊概念,应用模糊信息优化处理方法对国道 G316 公路沿线某段膨胀土滑坡区域膨胀土进行分类。首先将 22 组土样的试验资料,按照二维正态信息扩散公式分别建立液限、塑性指数、含水量和胀缩等级之间的模糊关系矩阵 R ,然后将 10 组验证土样的液限、塑性指数和含水量按一维信息分配公式进行信息分配,求得原因集 X_0 ;最后通过两级模糊近似推论得出了该 10 组土样的分类结果,并将其与灰色系统理论方法的分类结果进行比较,其中 7 组的分类完全相同,而其余 3 组土样的分类精度则更高。结果表明该方法是一种有效的膨胀土分类方法,可以为膨胀土的工程治理设计提供参考。

关键词:道路工程;膨胀土;分类;模糊信息;优化处理;胀缩性

中图分类号:U412.221

文献标识码:A

Classification of expansive soil based on fuzzy information optimization disposal

LIU Yue¹, HUANG Qiang-bing², HU Chang-shun¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the fuzzy characteristics of swell-shrinking of expansive soil, the method of fuzzy information optimization disposal was applied to the classification of expansive soil in two landslide areas of G316 highway. In term of the two-dimension normal information pervasion formula, the fuzzy matrixes (R) between liquid limit, plastic index, water content and the grade of swell-shrinking for test data of 22 groups soil samples were established, and then liquid limit, plastic index and water content of 10 groups of test soil samples was distributed separately to cause assembly (X_0) according to one-dimension information distribution formula, and finally the classification results of the 10 groups of test soil samples were obtained. Compared with gray system theory, the classification results for 7 groups of test soil samples are as same as that of gray system theory, and the classification results of the other 3 groups of test soil samples are more exact. The results show this method is an effective measurement for the classification of expansive soil, and it can also provide a reference for engineering harness design of expansive soil.

Key words: road engineering; expansive soil; classification; fuzzy information; optimization disposal; swell-shrinking characteristics

收稿日期:2004-01-10

基金项目:交通部重点科技项目(95-05-05-13)

作者简介:刘悦(1973-),女,陕西蓝田人,长安大学讲师,博士研究生。

0 引言

膨胀土是颗粒高分散,以伊利石、蒙脱石等粘土矿物为主,对环境湿热变化敏感的高塑性粘土,吸水膨胀,失水收缩,产生膨胀压力。膨胀土常给工程建设带来严重危害,如膨胀土路基和路面的变形破坏、膨胀土地基上建筑物的变形开裂以及膨胀土边坡的变形失稳等。因此,为确保膨胀土地区工程建筑物和构筑物的安全,经常需要采取一定的工程治理措施。但是,安全经济的治理措施首先是以膨胀土胀缩性强弱的准确判别即膨胀土的正确分类为前提的。然而由于膨胀土成因的复杂性,使得不同区域、同一区域不同场地或同一场地但不同层次的膨胀土的胀缩性(膨胀潜势)有很大的差异。因此,如何快速准确地评价膨胀土的胀缩性、明确膨胀土的类别,这对工程治理设计非常重要。

目前,工程上按照膨胀性大小,将膨胀土划分为强、中、弱 3 类或低、中、高、很高 4 类,依据的方法主要有:①工程地质法和工程地质比拟法,前者主要是从工程地质观点出发,根据膨胀土的野外地质特征,结合其物理力学性质指标进行判别与分类^[1],后者主要通过比照该区域或场地附近既有工程建筑物或构筑物的胀缩变形破坏程度来判定,两类方法都只能是定性的估计,缺乏定量的标准,难以推广;②矿物鉴别法,通过鉴定粘土矿物(伊利石、蒙脱石)成分及其含量来评价土的胀缩性,但大多数实验室不能进行此项目的分析;③指标法,利用土的粒度成分、胀缩性指标、物理力学性质指标中的一种或多种指标综合评价,但有时根据各个指标作出的评价互相矛盾,难以取舍,而且由于影响胀缩性的因素十分复杂,不同区域指标的界限值很难做到标准统一。此外,还有模糊综合评判法^[2~4]、灰色系统理论评判法^[2~4]、神经网络评判法^[5,6]等。模糊综合评判法中隶属函数的确定和灰色系统理论法中灰元的白化(功效函数的确定)都是人为的带有经验性质,而事实上胀缩性的“高低”划分属于模糊概念。因此,本文提出将模糊信息优化处理方法用于膨胀土的分类评价,使膨胀土胀缩性的评价更符合工程实际。

1 模糊信息有关理论

1.1 近似推论

设 X 是自变量论域或原因论域, Y 是因变量论域或结果论域。在实用的近似推理模型中,一个论域总是由有限个离散点来表示。设

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (2)$$

令 A_0 是一观测事件, X_0 是原因, Y_0 是结果,则

$$A_0 = (X_0, Y_0) \quad (3)$$

所谓 X 到 Y 的因果模糊关系 $R \subseteq X \times Y$, 是指 R 表述了某一类观测事件 $\{A_1, A_2, \dots, A_s\}$, 其描述了原因 X 和结果 Y 的因果规律。如记

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_s\} \quad (4)$$

当 R 表述 A 的因果规律时,记

$$R = R(A) \quad (5)$$

这时,当已知原因 X_0 时,就可通过合适的近似推理合成规则“ \circ ”,推出结论 Y_0 ,即

$$Y_0 = X_0 \circ R \quad (6)$$

1.2 信息扩散

前已述及,模糊关系 R 是进行模糊推论的关键。前人曾用隶属函数、信息分配或其他数学手段构造 R 。本文采用信息扩散方法^[5]。信息扩散是在信息分配的基础上发展起来的,其模型是,假设任一区域 Ω , 该域包含了要处理的系统模型的基础变量范围。若有一原始信息,它可按照一定的扩散规律向该域 Ω 的所有点扩散,任何一点所得信息多,则隶属度大。当有若干个原始信息时,它们分别按一定的扩散规律向域 Ω 内的所有点扩散,则域内的每一点都可获得若干个原始信息扩散来的若干个信息量。将域内各点自己所得信息量叠加,便形成原始信息库,再做正规化处理后可得模糊关系 R 。信息扩散过程如图 1 所示。其中 $u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0$ 为 n 个原始信息, $1, 2, \dots, m$ 为 m 个基础变量点,则 $u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0$ 分别扩散给任一基础变量点 i 的信息量为 v_1, v_2, \dots, v_n , 那么第 i 点的总信息量就为

$$\sum_{i=1}^n v_i$$

同理可得 m 个点各自的总信息量。由这些总信息量的值即可构成原始信息库矩阵。

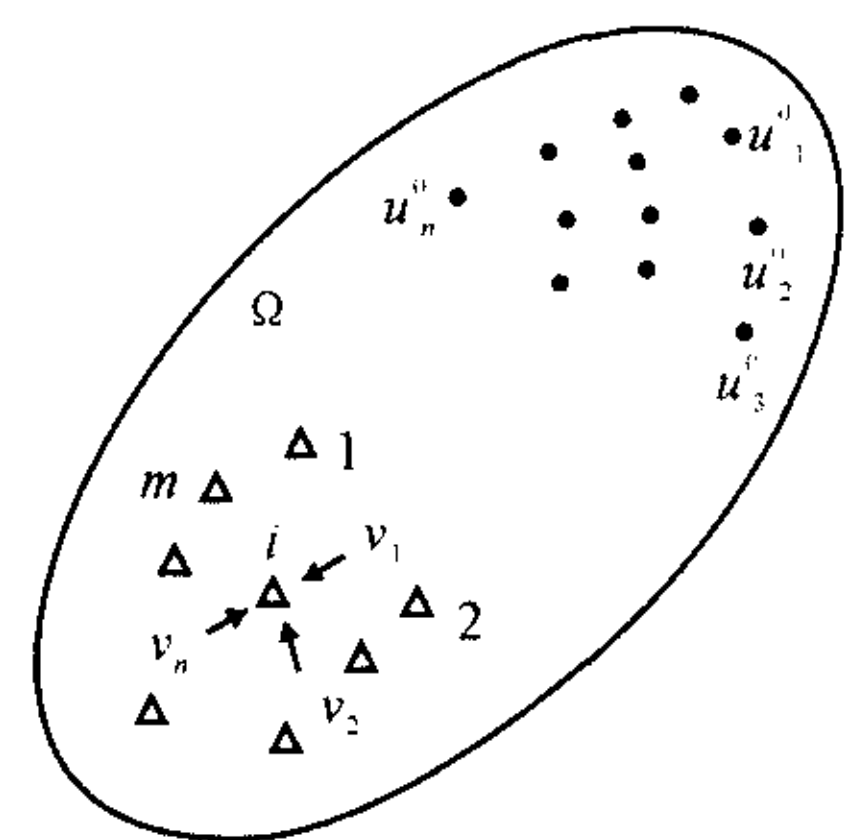


图 1 信息扩散示意图

2 应用实例

陕西安康是中国膨胀土灾害比较严重的地区之一。本文以国道 G316 公路沿线安康段发生的膨胀土滑坡为例,应用前述模糊信息的有关理论对滑坡区域的膨胀土的胀缩性进行评价,为滑坡的治理工程设计提供依据。国道 G316 线 K23+360~610 和

K25+060~140 两处滑坡的有关工程地质勘察资料如表 1 所示。

表 1 滑坡的土工试验结果

土样 序号	液限 $W_L/\%$	塑性指 数 I_P	含水量 $W/\%$	土样 序号	液限 $W_L/\%$	塑性指 数 I_P	含水量 $W/\%$
1	41.4	17.1	25.2	17	44.8	18.7	26.4
2	45.5	19.0	29.6	18	43.2	17.9	22.3
3	42.4	17.6	20.9	19	44.2	18.4	28.8
4	44.4	18.5	22.8	20	45.8	19.1	27.7
5	44.4	18.5	24.8	21	43.2	17.9	27.4
6	44.7	18.6	24.0	22	45.6	19.0	23.2
7	43.9	18.3	20.6	23	46.9	19.6	24.0
8	42.1	17.4	32.6	24	42.6	17.7	29.9
9	42.8	17.8	20.7	25	45.9	19.2	26.5
10	50.2	21.2	27.6	26	44.2	18.4	26.5
11	48.2	20.2	26.0	27	45.6	19.0	21.6
12	38.4	15.8	27.4	28	49.3	20.7	22.2
13	51.2	20.7	31.1	29	39.3	16.2	19.8
14	37.8	15.5	18.6	30	44.7	18.6	19.6
15	43.4	18.0	21.3	31	54.1	22.4	27.0
16	40.0	16.5	26.1	32	45.2	18.9	20.9

2.1 模糊关系矩阵的建立

影响膨胀土胀缩性的因素很多,既有内因又有外因,而内外因结合所反映的结果最终表现在土的物理力学性质及胀缩性指标上。现选取土工试验的常规指标中的液限、塑性指数、天然含水量来综合评价土的胀缩性。因为,液限 W_L (内因) 是反映土的粒度、矿物组成以及交换阳离子成分等特性的灵敏指标,塑性指数 I_P (内因) 是粘性土分类的理想指标,天然含水量 W (外因) 反映了区域气候或场地的水文地质条件并直接影响着土的胀缩性。

从表 1 可见 W_L 的变化范围为 37.8%~54.1%, I_P 的范围为 15.5~22.4, W 的范围为 18.6%~32.6%,因此分别取液限论域 U_{W_L} 、塑性指数论域 U_{I_P} 、含水量论域 U_W 、胀缩等级论域 G ,且

$$U_{W_L} = \{W_{L1}, W_{L2}, \dots, W_{L10}\} =$$
$$\{37.0, 39.0, \dots, 55.0\}$$
$$U_{I_P} = \{I_{P1}, I_{P2}, \dots, I_{P9}\} =$$
$$\{15.0, 16.0, \dots, 23.0\}$$
$$U_W = \{W_1, W_2, \dots, W_{17}\} =$$
$$\{17.0, 18.0, \dots, 33.0\}$$
$$G = \{N, I, II, III, IV\} =$$

$$\{0.00, 0.45, 0.60, 0.75, 0.90\}.$$

同时,设胀缩等级论域 G 的模糊子集为

$$G = 0/N + 0.45/I + 0.60/II + 0.75/III + 0.90/IV$$

式中: N 为无膨胀性; I 为膨胀性低; II 为膨胀性中等; III 为膨胀性高; IV 为膨胀性极高。

按照二维正态信息扩散公式分别建立液限、塑性指数、含水量与胀缩等级间模糊关系矩阵 $R_{W_L \times G}$ 、 $R_{I_P \times G}$ 和 $R_{W \times G}$ 。下面仅以模糊关系矩阵 $R_{W_L \times G}$ 的建立为例进行说明。则

$$\tilde{f}_m(u, \nu) = \frac{1}{2\pi m h^2} \sum_{j=1}^m \exp - [(u' - u'_j)^2 +$$
$$(\nu' - \nu'_j)^2 / 2h^2]$$
(7)

其中, $u' = (u - a_1)/(b_1 - a_1)$; $\nu' = (\nu - a_2)/(b_2 - a_2)$; $u'_j = (u_j - a_1)/(b_1 - a_1)$; $\nu'_j = (\nu_j - a_2)/(b_2 - a_2)$; $a_1 = \min_{1 \leq j \leq m} \{u_j\}$; $b_1 = \max_{1 \leq j \leq m} \{u_j\}$; $a_2 = \min_{1 \leq j \leq m} \{\nu_j\}$; $b_2 = \max_{1 \leq j \leq m} \{\nu_j\}$; $h = 1.4208/(m-1)$; m 为样本数。

根据式(7),利用表 1 中前 22 组土样的液限建立模糊关系矩阵 $R_{W_L \times G}$,后 10 组(第 23~32 组)进行验证,故此 $m = 22$ 。另外, $a_1 = 37.8$, $b_1 = 54.1$, $a_2 = 0.00$, $b_2 = 0.90$, $u = U_{W_L}$, $\nu = G$, u_j 为前 22 组液限的数值, ν_j 为与前 22 组土样的液限的对应的胀缩等级^[2]隶属度,则得到原始信息分布矩阵 $Q_{W_L \times G}$ 。在按行对 $Q_{W_L \times G}$ 做正规化处理(每行中最大的值遍除该行各列)后,即得到液限与胀缩等级之间的模糊关系矩阵 $R_{W_L \times G}(10 \times 5)$ 。

$$R_{W_L \times G} =$$
$$\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.020\ 7 & 0.000\ 3 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.557\ 3 & 0.007\ 1 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.022\ 9 & 1.000\ 0 & 0.012\ 8 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.033\ 5 & 0.000\ 3 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.424\ 0 & 0.005\ 2 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.240\ 0 & 1.000\ 0 & 0.020\ 6 & 0.000\ 1 \\ 0.000\ 0 & 0.014\ 6 & 1.000\ 0 & 0.867\ 1 & 0.010\ 8 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 3 & 0.035\ 4 & 1.000\ 0 & 0.012\ 7 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.012\ 9 & 1.000\ 0 & 0.012\ 7 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.012\ 7 & 1.000\ 0 & 0.012\ 7 \end{bmatrix}$$
(8)

同理,可得塑性指数、含水量与胀缩等级间模糊关系矩阵 $R_{I_P \times G}(9 \times 5)$ 和 $R_{W \times G}(17 \times 5)$ 。

2.2 一级模糊近似推理

按模糊近似推理公式 $Y_0 = X_0 \circ R$,求取与后 10 组土样的液限、塑性指数和含水量对应的胀缩等级的可能性分布。这时的模糊关系 R 已知,分别为

$R_{W_L \times G}(10 \times 5)$ 、 $R_{I_P \times G}(9 \times 5)$ 和 $R_{W \times G}(17 \times 5)$, 合成规则“ \circ ”选用普通乘, 此时的原因论域即为后 10 组资料中的液限、塑性指数和含水量, 将它们按一维信息分配公式进行信息分配^[6], 则得到原因集 X_0 。下面以后 10 组中的第 1 组土样为例, 进行模糊近似推论。

首先, 将第 1 组土样的液限 $W_L = 46.9\%$, 塑性指数 $I_P = 19.6$, 含水量 $W = 24.0\%$ 进行一维信息分配, 得到原因集 $X_0(W_L)$ 、 $X_0(I_P)$ 和 $X_0(W)$, 则

$$X_0(W_L) = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.05 \\ 0.95 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$X_0(I_P) = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.40 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$X_0(W) = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

再将 $X_0(W_L)$ 、 $X_0(I_P)$ 、 $X_0(W)$ 分别与模糊关系矩阵 $R_{W_L \times G}(10 \times 5)$ 、 $R_{I_P \times G}(9 \times 5)$ 和 $R_{W \times G}(17 \times 5)$ 按合成规则“普通乘”进行运算, 得到结论的可能性分布 $Y_0(W_L)$ 、 $Y_0(I_P)$ 和 $Y_0(W)$, 则

$$Y_0(W_L) = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.278\ 0 & 0.971\ 2 \\ 0.019\ 8 & 0.000\ 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_0(I_P) = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.010\ 8 & 1.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_0(W) = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.223\ 2 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}$$

2.3 二级模糊近似推论

综合考虑液限、塑性指数和含水量对膨胀土胀缩性的影响, 按照 $Y_0 = X_0 \circ R$ 进行二级模糊近似

推论。此时的原因集 X_0 由权重构成, 按照专家经验并结合有关研究资料, 液限 W_L 、塑性指数 I_P 和含水量 W 的权重分别取 0.37, 0.33, 0.30, 则

$$X_0 = [0.37 \quad 0.33 \quad 0.30]$$

此时的模糊关系 R 由一级推论得到的 $Y_0(W_L)$ 、 $Y_0(I_P)$ 和 $Y_0(W)$ 构成, 仍以第 1 组土样为例, 则

$$R_1 = \begin{bmatrix} Y_0(W_L) \\ Y_0(I_P) \\ Y_0(W) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.278\ 0 & 0.971\ 2 & 0.019\ 8 & 0.000\ 1 \\ 0.000\ 0 & 0.010\ 8 & 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.223\ 2 & 1.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}$$

再次按照普通乘进行运算得到二级推论结果 $Y_0, Y_0 = [0.000\ 0 \quad 0.106\ 4 \quad 0.756\ 3 \quad 0.307\ 3 \quad 0.000\ 0]$ 。同理可求得其余 9 组土样经二级推论后胀缩等级的可能性分布(见表 2)。此时, 可以直接以二级推论的 Y_0 作为最终结果, 取可能性最大值即最大的隶属度对应的胀缩等级为该土样所属的胀缩等级, 也可以用信息中模型推求最终结果。本文采用按可能性最大值法评价, 对后 10 组土样的胀缩等级进行分类。最终对后 10 组土样的胀缩性评判如表 2 所示。

2.4 结果分析

为验证模糊信息方法分类的效果, 利用灰色系统理论^[2]对第 23~32 组组土样进行了分类, 并将两种方法所得结果进行对比, 分类结果有 7 组相同, 3 组不同。分析认为, 模糊信息方法分类的精度较高, 结果更为准确。因为根据灰色系统理论, 第 25 组和

表 2 膨胀土分类结果

序号	模糊信息优化处理						灰色系统理论			
	隶属度					类别	聚类系数			类别
	N(非)	I(低)	II(中)	III(高)	IV(极高)		σ_1 (强)	σ_2 (中)	σ_3 (弱)	
23	0.000 0	0.106 4	0.756 3	0.307 3	0.000 0	中	0.640	0.813	0.774	中
24	0.001 7	0.675 2	0.546 4	0.000 0	0.000 0	低	0.540	0.723	0.850	弱
25	0.000 0	0.250 6	0.882 8	0.024 5	0.000 0	中	0.612	0.800	0.805	弱
26	0.000 0	0.549 4	0.729 1	0.021 3	0.000 0	中	0.589	0.774	0.822	弱
27	0.000 0	0.294 6	0.551 0	0.303 6	0.000 0	中	0.645	0.780	0.767	中
28	0.000 0	0.004 6	0.647 9	0.628 2	0.004 1	中	0.684	0.831	0.727	中
29	0.315 8	0.560 8	0.006 0	0.300 0	0.000 0	低	0.576	0.679	0.767	弱
30	0.000 0	0.493 2	0.465 3	0.301 7	0.000 0	低	0.644	0.748	0.765	弱
31	0.000 0	0.000 0	0.634 7	0.373 9	0.004 7	中	0.710	0.819	0.701	中
32	0.000 0	0.379 3	0.508 2	0.302 5	0.000 0	中	0.639	0.763	0.774	弱

第 32 组土样的中等胀缩性和弱胀缩性的聚类系数的数值非常接近,分别为 0.800 和 0.805、0.763 和 0.774,所以这两组土样究竟该判为中等胀缩性土还是弱(低)膨胀性土还有待商榷。同时,分类结果不同的 3 组土样中主要就包括了这两组。

3 结 语

本文主要基于膨胀土“胀缩性高低”划分属于模糊概念这一特性,将模糊信息优化处理方法中的有关理论应用于膨胀土分类,从而解决了以往用模糊方法判定膨胀土类别时需要人为规定隶属函数的问题,并通过该方法在应用于工程实例过程中与其他分类方法的对比,证明该方法分类效果良好,精度较高,可以为膨胀土的分类及其工程治理设计提供一种更加快速和准确的分类方法。此外,还可以将粘粒含量、自由膨胀率、胀缩总率等影响因素加以考虑,进行多因素综合评价以提高其分类精度。

参考文献:

References:

[1] 杨和平,郑健龙. 云南楚大公路膨胀土的土性试验研究[J]. 中国公路学报,2002,15(1):10-14.
YANG He-ping, ZHENG Jian-long. Experimental research on properties of expansive soil on Chu-da expressway in Yunnan[J]. China Journal of Highway and

Transport, 2002,15(1):10-14.

[2] 李生林. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992.
LI Sheng-lin. Engineering geological research for expansive soil of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
[3] 肖荣久. 陕南膨胀土及其灾害地质研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1995.
XIAO Rong-jiu. Research for expansive soil and its hazard geology of south Shaanxi[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1995.
[4] 陈守煜. 模糊判定模型及其在膨胀土等级判定中的应用[J]. 工程勘察,1993,(6):13-17.
CHEN Shou-yu. Fuzzy model and its application in grade determination of expansive soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1993, (6):13-17.
[5] 高志亮. 基于 MATLAB 神经网络对膨胀土潜势的分类和判别[J]. 工程地质学报,2002,(增刊):482-484.
GAO Zhi-liang. Estimate and classification which are based on matlab natural network toolbox to the potential of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, (Sup.):482-484.
[6] 郭志勇. 膨胀土改性试验及动力特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2003,23(4):18-21.
GUO Zhi-yong. Experiment and dynamic properties of improved expansive soil[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003,23(4):18-21.

(上接 14 页)

参考文献:

References:

[1] 交通部重庆公路科学研究所. 美国公路战略研究计划(SHRP)沥青研究项目[Z]. 重庆:交通部重庆公路科学研究所,1995.
Dept of Communication, American Strategic Highway Research Planning (SHRP), Asphalt Research Project [Z]. Chongqing:Chongqing Highway Science Research Institute,1995.
[2] 石油化工科学研究院. 道路沥青聚合物改性技术文献汇编(下册)[Z]. 北京:石油化工科学研究院,1993.
Oil Chemical Technology Science Institute. Compilation of road asphalt polymer modified technique (Volume 2) [Z]. Beijing: Oil Chemical Technology Science,1993.
[3] JTJ032-98. 公路改性沥青路面施工技术规范[S]. 1999.

JTJ032-98. Construction technology specifications of modified asphalt highway surface[S]. 1999.
[4] JTJ052-2000. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 2000.
JTJ052-2000. Test specifications of asphalt and butimen in highway engineering[S]. 2000.
[5] Xiaohu Lu, Ulf I, Jonas E. Phase separation of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumens [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,1999,(1):51-57.
[6] 梁乃兴,李明国. SBS 改性沥青路用性能及机理研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2002,22(2):17-20.
LIANG Nai-xing, LI Ming-guo. Performance and mechanism of modified asphalt with SBS[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(2):17-20.
[7] Yvonne B, Maryro P M, Yajaira R. Polymer modified asphalt[J]. Vision Tecnologica, 2001, 9(1):39-50.