

文章编号:1671-8879(2016)06-0010-07

砂类亚硫酸盐渍土盐胀率预报模型

张莎莎¹,王永威²,杨晓华¹,刘伟¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中交第二航务工程局有限公司技术中心,湖北 武汉 430040)

摘 要:中国西北及中亚、西亚地区存在着广泛的砂类亚硫酸盐渍土,如何对其加以有效利用关系着本地区生态环境、经济和工程建设的健康发展。为了充分和有效地利用当地资源,明确路用砂类亚硫酸盐渍土的盐胀率预报模式及其盐胀五要素的影响权重,以细粒土质砂亚硫酸盐渍土为例,基于过 5 mm 筛的易溶盐试验方法,依据二次正交回归设计原理安排试验和设置试验因素水平,通过 25 组盐胀试验,建立细粒土质砂亚硫酸盐渍土盐胀率回归方程;同时进行相关系数的方差分析,检验回归方程和回归系数的显著性,建立砂类亚硫酸盐渍土简化的盐胀率预报模型,并对简化的盐胀率预报模型所得计算值与实际测试值进行对比验证,并通过 SPSS 软件对所得数学模型开展逐步回归分析,确定砂类亚硫酸盐渍土盐胀率影响因素的权重关系。研究结果表明:砂类亚硫酸盐渍土盐胀率影响因素的权重为易溶盐(0.612)、荷载(0.12)、水(0.116)、易溶盐与水的交互作用(0.107)、易溶盐与荷载的交互作用(0.025)、水与荷载的交互作用(0.006);易溶盐含量对砂类亚硫酸盐渍土盐胀率的贡献量超过 50%;上覆荷载对砂类亚硫酸盐渍土盐胀率的抑制作用不大;砂类亚硫酸盐渍土盐胀四要素中的交互作用主要体现在易溶盐与水之间和易溶盐与上覆荷载之间;研究结果可以为在砂类亚硫酸盐渍土地区进行工程设计与施工提供技术参考。

关键词:道路工程;砂类亚硫酸盐渍土;预报模型;正交设计;方差分析

中图分类号:U416.1;TU448

文献标志码:A

Salt expansion rate prediction model of sandy sulfite saline soil

ZHANG Sha-sha¹, WANG Yong-wei², YANG Xiao-hua¹, LIU Wei¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC Second Harbour Engineering Co. Ltd., National Enterprise Technology Center, Wuhan 430040, Hubei, China)

Abstract: In northwest China, central Asia and west Asia, there is a large number of sandy sulfite saline soil. How to effectively use it relates to the healthy development of the ecological environment, economy and construction in these regions. In order to make full and effective use of the regional resources and clarify salt expansion rate prediction model and effect weight of salt expansion five elements for sandy sulfite saline soil, based on fine sandy sulfite saline soil and the soluble salt content experimental method of screening method of 5 mm, using quadratic regression orthogonal design to determine test factors level, through 25 groups of salt-heaving experiments, salt-heaving rate regressive equation was established. Then the equation and regression coefficients' significance were verified by the analysis of variance. Moreover, the

收稿日期:2016-05-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51209006);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1211008);新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目(2014-08)

作者简介:张莎莎(1982-),女,山西运城人,副教授,工学博士,E-mail:zss_lx@126.com。

simplified salt expansion rate prediction model of sandy sulfite saline soil was established. The calculated values were compared and verified with the actual values. The primary and secondary relations of affecting factors of sandy sulfite-saline soil salt-heaving rate were determined by SPSS stepwise regression analysis. The results show that the sensitive parameters of sandy sulfite saline soil effects on the salt heaving rate sequentially are salinity (0.612), load (0.12), water (0.116), interaction of salinity and moisture (0.107), interaction of salinity and load (0.025), interaction of water and load (0.006). The contribution of the soluble salt to the salt heaving rate of sandy sulfite saline soil is more than 50%. The overlying load is relatively little inhibitory effect on the salt expansion rate of sandy sulfite saline soil. The interaction of four factors of salt expansion for sandy sulfite saline soil is mainly reflected in the soluble salt and water, the soluble salt and the overlying load. The research results can provide technical reference for engineering design and construction in the sandy sulfite saline soil area. 8 tabs, 2 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; sand sulfite salty soil; prediction model; orthogonal design; analysis of variance

0 引 言

随着中国高速公路及铁路在西部地区的迅速发展,越来越多的特殊土工程问题需要合理解决。其中西部地区尤以粗粒盐渍土分布最为广泛,由于盐渍土特殊的物质结构组成使其在温度变化过程中会出现盐分相态方面的变化,从而表现出土体体积的改变。土、水、盐、温、力是影响粗粒盐渍土路基变形的主要因素,开展多因素交互作用下影响粗粒盐渍土路基变形性状的敏感参数研究是揭示粗粒盐渍土路用指标的基础。

21 世纪初,许多学者开始针对粗粒盐渍土开展研究工作。华遵孟等通过大量工程实践经验,总结了西北内陆盆地的粗粒硫酸盐渍土成因、分布及盐胀变形规律^[1];吴青柏等开始针对恒温下粗粒硫酸盐渍土的盐胀过程进行分析^[2];随着公路行业的兴起,罗炳芳等开始针对公路工程中粗粒盐渍土的易溶盐试验方法开展研究^[3-4];张莎莎等针对西北典型天然粗粒盐渍土的工程特性、盐胀机理及强度特性开展研究^[5-9];高江平等针对盐渍土盐胀敏感性参数开展了关于细粒硫酸盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用的规律分析,而粗粒盐渍土的相关研究成果未见相关报道^[10-15]。上述研究成果对于明确盐渍土的工程特性及其应用起到了良好的推动作用,但针对分布较为广泛的亚硫酸盐渍土研究相对较少,尤其是针对粗粒亚硫酸盐渍土的盐胀特性敏感参数研究几乎空白。

为了揭示粗粒亚硫酸盐渍土的盐胀特性及其敏感参数,本文以细粒土含量取 50% 极限值的砂类亚

硫酸盐渍土为例,考虑影响盐渍土盐胀的 4 个主要因素:含盐量、含水率、压实度、上覆荷载,以建立砂类亚硫酸盐渍土的盐胀率预报模型并分析其盐胀敏感参数。

1 试验方案设计

1.1 温度控制仪

本试验采用 DW-40 型高低温试验箱,可控温度为-40℃~60℃,精度为 1℃。可以实现在预定时间内的降温,即控制降温速率。

1.2 试样容器

为了减小颗粒尺寸效应和实现可视化,采用有机玻璃制作圆柱筒,其内径 24 cm,高 25 cm,试样与容器间涂敷凡士林,以减少土与内壁间的摩擦力,侧向箍紧,减小横向变形。试验时,将整个容器置于高低温试验箱内,使容器中的试样整体降温。

1.3 试验土样制备

洗盐烘干后的砂类土和细粒黄土配制细粒土质砂亚硫酸盐渍土(CL^- 与 SO_4^{2-} 质量比为 0.5)作为试验土样,粒度成分见表 1,物理状态指标见下页表 2,其中含盐量、含水率和干密度见下页表 3^[16]。盐分配制按照 5 mm 筛法,即过 5 mm 筛的土体的含盐量(质量法)^[3-5]。在 25℃左右温度中养生 24 h 以上,以利于水分和盐分的均匀分布。

表 1 粒度成分

Tab. 1 Particle size distribution

粒径 <i>d</i> /mm	2> <i>d</i> ≥	1> <i>d</i> ≥	0.5> <i>d</i> ≥	0.25> <i>d</i> ≥	<i>d</i> <0.075
	1	0.5	0.25	0.075	
含量/%	10	15	15	10	50

表 2 物理指标

Tab. 2 Physical property indices

最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	CL ⁻ /SO ₄ ²⁻ (质量比)
8.8	2.126	0.5

1.4 试验方案

在回归设计中,各试验因素的量纲是不同的,其取值范围亦不相同,为了处理试验数据简单方便,对各因素做线性变换,使其取值范围都转化为以原点的一个“立方体”中,对因素水平进行编码。这种标准化度量,更容易实质性地比较不同自变量系数的大小。将各因素实际值 z_i ($i=1,2,3,4,5$)按式(1)换算成与其相应的 x_i 值, x_i 为量纲一的量^[17-18]

$$x_i=(z_i-z_{0i})/\Delta_i \tag{1}$$

其中

$$z_{0i}=(z_{1i}+z_{2i})/2$$
$$\Delta_i=(z_{2i}-z_{1i})/(2\gamma)$$

式中:[z_{1i},z_{2i}]为第 i 个因素的变化范围; z_{0i} 为第 i 个因素的上下界平均值; Δ_i 为第 i 个因素的变化区间;根据二次回归正交设计确定 γ 值, $\gamma=1.414$ 。

按回归正交设计要求列出因素水平,因素水平取值原则参见文献[16],具体取值见表 3。

表 3 试验因素水平设置

Tab. 3 Orthogonal factor level

影响因素	含盐量/%	含水率/%	压实度/%	荷载/kPa
记号	x_1	x_2	x_3	x_4
基准水平(0)	1.73	8.80	93.00	2.21
变化间距(Δ)	0.870	1.556	2.830	1.563
上水平(+1)	2.60	10.36	95.83	3.77
下水平(-1)	0.86	7.24	90.17	0.65
上星号臂(+1.414)	2.96	11.00	97.00	4.42
下星号臂(-1.414)	0.5	6.6	89.0	0.0

每个因素取 5 个水平,若水平组合全部开展试验,则需 $5^4=625$ 组试验,若采用正交组合设计,只需 25 组试验,为保证试验数据的有效性和稳定性,减小试验误差,每个水平组合做 2 或 3 个相同试验,共计 60 组试验。

2 试验结果及盐胀率预报模型

2.1 试验过程及其结果

试样制备好后放入高低温试验箱(设定常温为 25℃),恒温 24 h,由于易溶盐溶解度最小时的温度为-15℃,为了使易溶盐充分结晶,试样整体置于降温箱中,并采用梯度降温,从 25℃逐渐降至-15℃,每 5℃为 1 级,每级降温后稳定 1 h,记录数据,再进

行下一级降温,-15℃降温稳定后再稳定 6 h,记录最终盐胀量^[19]。试验装置实物如图 1 所示。



图 1 试验装置实物

Fig. 1 Expansion test device

二次回归正交试验中的具体因素水平和试验结果见表 4。

表 4 二次回归正交设计试验安排及试验结果

Tab. 4 Trial arrangement and results based on quadratic regression orthogonal design

试验编号	试验设计因素水平				盐胀率/%
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	2.60	10.36	95.83	3.77	0.231
2	2.60	10.36	95.83	0.65	1.144
3	2.60	10.36	90.17	3.77	0.230
4	2.60	10.36	90.17	0.65	1.099
5	2.60	7.24	95.83	3.77	1.322
6	2.60	7.24	95.83	0.65	1.783
7	2.60	7.24	90.17	3.77	1.426
8	2.60	7.24	90.17	0.65	1.881
9	0.86	10.36	95.83	3.77	-0.022
10	0.86	10.36	95.83	0.65	0.279
11	0.86	10.36	90.17	3.77	0.078
12	0.86	10.36	90.17	0.65	0.202
13	0.86	7.24	95.83	3.77	0.014
14	0.86	7.24	95.83	0.65	0.178
15	0.86	7.24	90.17	3.77	-0.054
16	0.86	7.24	90.17	0.65	0.123
17	2.96	8.80	93.00	2.21	1.658
18	0.50	8.80	93.00	2.21	0.002
19	1.73	11.00	93.00	2.21	0.307
20	1.73	6.60	93.00	2.21	0.962
21	1.73	8.80	97.00	2.21	0.884
22	1.73	8.80	89.00	2.21	0.920
23	1.73	8.80	93.00	4.42	0.320
24	1.73	8.80	93.00	0.00	1.126
25	1.73	8.80	93.00	2.21	0.736

2.2 盐胀率预报模型的建立

假设砂类亚硫酸盐渍土在多因素交互作用下盐胀率的计算公式为

$$Y=b_0+\sum_{i=1}^pb_ix_i+\sum_{k=1}^{p-1}\sum_{i=k+1}^pb_{ki}x_kx_i+\sum_{i=1}^pb_{ii}x_i' \tag{2}$$

式中: x_i 、 x_kx_i 、 x_i' 分别为一次项、一次交互作用项与二次项 x_i^2 的中心变化项的编码因素, $x_i' = x_i^2 - (2^p + 2\gamma^2)/n$, $p=4$, $n=25$; b_0 、 b_i 、 b_{ki} 、 b_{ii} 分别为与之相对应的回归系数,回归系数的个数为 15 个。

由二次回归正交设计计算表(表 5)可得回归方程为

$$Y=0.673+0.533x_1-0.218x_2-0.005x_3-0.230x_4-0.249x_1x_2-0.016x_1x_3-0.121x_1x_4+0.006x_2x_3-0.059x_2x_4-0.013x_3x_4-0.029x_1'-0.126x_2'+0.007x_3'-0.082x_4', R^2=0.989 \quad (3)$$

式中: R^2 为判定系数。

取显著性水平 $\alpha=0.05$, $F_{0.05}(14,10)=2.87$, $F_{0.05}(1,10)=4.96$,由二次回归方差分析表(下页表 6)可得:① $F=61.460>F_{0.05}(14,10)=2.87$,方程达到显著性水平,方程有意义;② $x_1, x_2, x_4, x_1x_2, x_1x_4$,

x_2x_4, x_2', x_4' 回归系数均大于 $F_{0.05}(1,10)=4.96$,则这 8 个因素达到显著性水平;③ $x_3, x_1x_3, x_2x_3, x_3x_4, x_1', x_3'$ 回归系数均小于 $F_{0.05}(1,10)=4.96$,则这 6 个因素未达到显著性水平,方程需进行简化修正。

3 盐胀率预报模型的简化修正分析

3.1 盐胀率预报方程的简化修正

由试验设计的正交特性可知,当各个试验回归系数不相关时,可以直接删除该变量而不会影响到其他变量的回归系数,所以将不显著变量的偏回归平方和加到残差平方和后,进行第 2 次方差分析,从而可将式(3)修正为

$$Y=0.673+0.533x_1-0.218x_2-0.230x_4-0.249x_1x_2-0.121x_1x_4-0.059x_2x_4-0.126x_2'-0.082x_4', R^2=0.987 \quad (4)$$

表 5 二次回归正交设计计算

Tab. 5 Quadratic regression orthogonal design calculation

变量 试验号	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_1'	x_2'	x_3'	x_4'	盐胀率/%
1	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1	1	1	1	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.231
2	1	1.000	1.000	1.000	-1.000	1	1	-1	1	-1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.144
3	1	1.000	1.000	-1.000	1.000	1	-1	1	-1	1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.230
4	1	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1	-1	-1	-1	-1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.099
5	1	1.000	-1.000	1.000	1.000	-1	1	1	-1	-1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.322
6	1	1.000	-1.000	1.000	-1.000	-1	1	-1	-1	1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.783
7	1	1.000	-1.000	-1.000	1.000	-1	-1	1	1	-1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.426
8	1	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1	-1	-1	1	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.881
9	1	-1.000	1.000	1.000	1.000	-1	-1	-1	1	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.022
10	1	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1	-1	1	1	-1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.279
11	1	-1.000	1.000	-1.000	1.000	-1	1	-1	-1	1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.078
12	1	-1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1	1	1	-1	-1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.202
13	1	-1.000	-1.000	1.000	1.000	1	-1	-1	-1	-1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.014
14	1	-1.000	-1.000	1.000	-1.000	1	-1	1	-1	1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.178
15	1	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1	1	-1	1	-1	-1	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.054
16	1	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1	1	1	1	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.123
17	1	1.414	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	1.2	-0.8	-0.8	-0.8	1.658
18	1	-1.414	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	1.2	-0.8	-0.8	-0.8	0.002
19	1	0.000	1.414	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	-0.8	1.2	-0.8	-0.8	0.307
20	1	0.000	-1.414	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	-0.8	1.2	-0.8	-0.8	0.962
21	1	0.000	0.000	1.414	0.000	0	0	0	0	0	0	-0.8	-0.8	1.2	-0.8	0.884
22	1	0.000	0.000	-1.414	0.000	0	0	0	0	0	0	-0.8	-0.8	1.2	-0.8	0.920
23	1	0.000	0.000	0.000	1.414	0	0	0	0	0	0	-0.8	-0.8	-0.8	1.2	0.320
24	1	0.000	0.000	0.000	-1.414	0	0	0	0	0	0	-0.8	-0.8	-0.8	1.2	1.126
25	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	0.736

表 6 二次回归方差分析

Tab. 6 Quadratic regression analysis of variance

来源	偏回归平方和	自由度	均方和	F 值
x_1	5.681	1	5.681	533.168
x_2	0.949	1	0.949	89.086
x_3	0.001	1	0.001	0.053
x_4	1.060	1	1.060	99.490
x_1x_2	0.991	1	0.991	93.029
x_1x_3	0.004	1	0.004	0.389
x_1x_4	0.233	1	0.233	21.913
x_2x_3	0.001	1	0.001	0.060
x_2x_4	0.056	1	0.056	5.298
x_3x_4	0.003	1	0.003	0.270
x_1'	0.007	1	0.007	0.618
x_2'	0.128	1	0.128	11.992
x_3'	0.000	1	0.000	0.040
x_4'	0.054	1	0.054	5.071
回归平方和	9.168	14	0.655	61.460
残差平方和	0.107	10	0.011	
总平方和	9.275	24	0.386	

取显著性水平 $\alpha=0.05$, $F_{0.05}(8,16)=2.59$, $F_{0.05}(1,16)=4.49$,第 2 次回归方差分析如表 7 所示。

表 7 二次回归方差分析

Tab. 7 Quadratic regression analysis of variance

来源	偏回归平方和	自由度	均方和	F 值
x_1	5.681	1	5.681	710.114
x_2	0.949	1	0.949	118.651
x_4	1.060	1	1.060	132.508
x_1x_2	0.991	1	0.991	123.902
x_1x_4	0.233	1	0.233	29.185
x_2x_4	0.056	1	0.056	7.057
x_2'	0.128	1	0.128	15.972
x_4'	0.054	1	0.054	6.754
回归平方和	9.153	8	1.144	143.016
残差平方和	0.122	16	0.008	
总平方和	9.275	24	0.386	

由表 7 可知:① $F=143.016>F_{0.05}(8,16)=2.59$,所得到的二次回归方程已达到显著水平,方程具有意义;②所得到的各个回归系数的显著性都大于 $F_{0.05}(1,16)$,即二次回归系数均达到显著水平;③构造新的 F 统计量,即

$$F=\frac{(R_1^2-R_2^2)/(k_1-k_2)}{(1-R_1^2)/(n-k_1-1)}$$

式中: R_1 、 R_2 分别为式(3)、式(4)的复相关系数; k_1 、 k_2 分别为式(3)、式(4)的自变量数目; n 为样本总量,且 $n=25$, F 值服从 k_1-k_2 和 $n-k_1-1$ 个自由

度的 F 分布。

计算可得 $F=0.303<F_{0.05}(6,10)=3.22$,即删除 6 个不显著因素之后,对方程未产生显著性的影响。

最后建立细粒土质砂亚硫酸盐渍土的因素实际值盐胀率公式为

$$\hat{Y}=-6.469+2.430z_1+1.148z_2+0.369z_4-0.184z_1z_2-0.089z_1z_4-0.024z_2z_4-0.052z_2^2-0.034z_4^2, R^2=0.987 \quad (5)$$

式中: \hat{Y} 为实际盐胀率(%); z_1 为实际含盐量(%); z_2 为实际含水率(%); z_4 为实际上覆荷载值(kPa)。

试验所得盐胀率实际值与方程计算所得值的差值如下页图 2 所示。

由图 2 可得,盐胀率试验实测值与方程计算值的最大差值出现在第 6 组试样,其差值是 -0.140% ,差值较小,且 21 组盐胀率差值均小于 0.1% ,可见盐胀率预报模型式(5)是良好的。

3.2 盐胀率影响因素重要性分析

式(4)包含 8 个显著因素,采用 SPSS 软件对其进行逐步回归分析,构建所有显著性模型,模型汇总见下页表 8。

表 8 中 R 为相关系数, R^2 为判定系数, F 为 F 检验, df_1 、 df_2 分别为分子和分母自由度,Sig 值为显著性 P 值,Durbin-Watson 为残差独立检验。

盐胀率影响因素的权重为该因素对 R^2 的贡献量, x_i 与 x_i' (x_i 的平方项)在进行逐步回归分析时,作为单因素分析,在分析盐胀率影响因素权值时,从工程实用性考虑,权重 $\omega_{x_i}=\omega(x_i)+\omega(x_i')$ 。由表 8 可知:①由含盐量和常量构建的显著模型 1, $R^2=0.612$,调整后的 $R^2=0.596$,则含盐量即易溶盐为影响盐胀率最主要的因素。②水对盐胀率的影响及其与其他因素的交互作用分析时,从试验及工程应用性角度,土样的配制采用含水率这个概念;而对研究结果分析时,根据含水率的工程概念,其在土体中的总量并未发生变化,但实际土体中的一部分自由水已参与了易溶盐的结晶膨胀,水量发生了变化,所以在结论分析中直接采用水这个名词。③由 R^2 更改量可知,影响盐胀率的因素按权重大小依次为:易溶盐 x_1 、荷载 x_4 、水 x_2 、易溶盐与水的交互作用 x_1x_2 、易溶盐与荷载的交互作用 x_1x_4 、水与荷载的交互作用 x_2x_4 ,影响权重依次为 0.612、0.120、0.116、0.107、0.025、0.006。④在仅考虑含盐量 x_1 、荷载 x_4 、含盐量与水的交互项 x_1x_2 、水 x_2 、含盐量与荷载的交互项 x_1x_4 (即模型 5)5 个因素时,

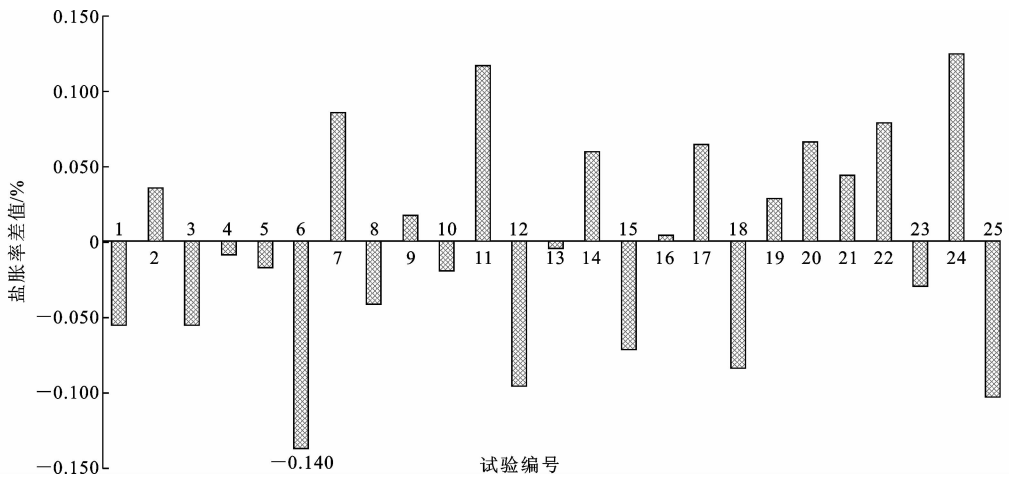


图 2 细粒土质砂亚硫酸盐渍土计算与实测盐胀率差值

Fig. 2 Error between the theoretical values and the experimental data of fine-grained-soil sand sulfurous saline soil

表 8 模型汇总

Tab. 8 Model summary

模型	R	R ²	调整 R ²	估计的 标准误差	更改统计量					Durbin- Watson
					R ² 更改	F 更改	df ₁	df ₂	Sig. F 更改	
1	0.783 ^a	0.612	0.596	0.395	0.612	36.355	1	23 ^a	0.000	
2	0.852 ^b	0.727	0.702	0.339	0.114	9.198	1	22 ^b	0.006	
3	0.913 ^c	0.834	0.810	0.271	0.107	13.503	1	21 ^c	0.001	
4	0.968 ^d	0.936	0.923	0.172	0.102	32.030	1	20 ^d	0.000	
5	0.980 ^e	0.961	0.951	0.138	0.025	12.321	1	19 ^e	0.002	
6	0.987 ^f	0.975	0.967	0.114	0.014	9.920	1	18 ^f	0.006	
7	0.990 ^g	0.981	0.973	0.102	0.006	5.463	1	17 ^g	0.032	
8	0.993 ^h	0.987	0.980	0.087	0.006	7.108	1	16 ^h	0.017	2.776

注:a. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ;b. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 ;c. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 , x_1x_2 ;d. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 , x_1x_2 ,含水率 x_2 ;e. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 , x_1x_2 ,含水率 x_2 , x_1x_4 ;f. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 , x_1x_2 ,含水率 x_2 , x_1x_4 , x_2' ;g. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 , x_1x_2 ,含水率 x_2 , x_1x_4 , x_2' , x_2x_4 ;h. 预测变量:(常量),含盐量 x_1 ,荷载 x_4 , x_1x_2 ,含水率 x_2 , x_1x_4 , x_2' , x_2x_4 , x_4' 。

$R^2=0.961$,调整后 $R^2=0.951$,可见在因素变化范围内,二次方项对盐胀率的影响虽然达到显著性水平,但是影响很小。⑤压实度作为影响盐胀率的因素,在显著性模型中并未体现,原因为:一是细粒土质砂亚硫酸盐渍土由于土质原因,对压实度因素不敏感;二是土样制备过程中,由于人为原因对压实度控制不准确,导致模型中压实度因素不能体现^[20-23]。

4 结 语

(1)影响砂类亚硫酸盐渍土盐胀率的因素按重要性大小排序依次为:易溶盐、上覆荷载、水、易溶盐与水的交互作用、易溶盐与上覆荷载的交互作用、水与荷载的交互作用,影响权重依次为 0.612、0.120、0.116、0.107、0.025、0.006。

(2)砂类亚硫酸盐渍土盐胀四要素中的交互作

用主要体现在易溶盐与水之间和易溶盐与上覆荷载之间。

(3)简化的盐胀率计算模型可作为砂类亚硫酸盐渍土在一定变化范围内的预测模型,为盐渍土地地区路基盐胀率的预测提供了一种简便、有效的方法。

(4)本文以细粒土含量取 50%极限值的砂类亚硫酸盐渍土为例,建立了基于 5 mm 筛法易溶盐配比的盐胀率预报模型。今后将进一步开展复杂环境作用下的大型模型试验和现场实测,对本预报模型进行检验和修正。

参考文献:

References:

[1] 华遵孟,沈秋武. 西北内陆盆地粗颗粒盐渍土研究[J]. 工程勘察,2001(1):28-31.

- HUA Zun-meng, SHEN Qiu-wu. Study on saline coarse-grained soil of northwestern inland basin in China[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1):28-31. (in Chinese)
- [2] 吴青柏,孙涛,陶兆祥,等. 恒温下含硫酸钠盐粗颗粒土盐胀特征及过程研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3):238-243.
- WU Qing-bai, SUN Tao, TAO Zhao-xiang, et al. Experimental studies on the salt expansion of coarse grain saline soils under constant temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3):238-243. (in Chinese)
- [3] 罗炳芳,潘菊英. 粗粒土易溶盐含盐量测定方法的研究[J]. 公路, 2005(11):192-193.
- LUO Bing-fang, PAN Ju-ying. Determination of soluble salt content of coarse-grained soil[J]. Highway, 2005(11):192-193. (in Chinese)
- [4] 包卫星,李志农,罗炳芳. 公路工程粗粒盐渍土易溶盐试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5):792-797.
- BAO Wei-xing, LI Zhi-nong, LUO Bing-fang. Test method for soluble salt in saline soil in highway engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5):792-797. (in Chinese)
- [5] 张莎莎,杨晓华,张秋美. 天然粗粒盐渍土大型路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5):842-847.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, ZHANG Qiu-mei. Large-scale model tests on embankment of crude coarse grained saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5):842-847. (in Chinese)
- [6] 张莎莎,杨晓华,谢永利,等. 路用粗粒盐渍土盐胀特性[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(1):20-25.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1):20-25. (in Chinese)
- [7] 张莎莎,谢永利,杨晓华,等. 典型天然粗粒盐渍土盐胀微观机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1):123-127.
- ZHANG Sha-sha, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Research on microstructure of crude coarse grain saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):123-127. (in Chinese)
- [8] 张莎莎,杨晓华,戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环盐胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4):28-32.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, DAI Zhi-ren. Freezing-thawing cycles and salt expansion test of crude coarse grain clay salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4):28-32. (in Chinese)
- [9] 张莎莎,杨晓华. 粗粒盐渍土大型冻融循环剪切试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2012, 32(3):11-16.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua. Large shear test on coarse saline soil with freeze-thaw cycle[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(3):11-16. (in Chinese)
- [10] 高江平,吴家惠. 硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1):37-42.
- GAO Jiang-ping, WU Jia-hui. Study on laws of the single factor effect upon heaving properties of the sulphated salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1):37-42. (in Chinese)
- [11] 高江平,吴家惠,杨荣尚. 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, 10(1):10-15.
- GAO Jiang-ping, WU Jia-hui, YANG Rong-shang. Analysis of the interaction laws of all influencing factors upon salt heaving properties of the sulphate salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(1):10-15. (in Chinese)
- [12] 顾强康,吴爱红,李 宁. 硫酸盐渍土的盐胀特性试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3):283-287.
- GU Qiang-kang, WU Ai-hong, LI Ning. The experiment study of salt heaving behaviors of sulphate saline soil[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3):283-287. (in Chinese)
- [13] 宋启卓,陈龙珠. 人工神经网络在盐渍土盐胀特性研究中的应用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4):607-612.
- SONG Qi-zhuo, CHEN Long-zhu. Application of artificial neural network to studying salt expansion properties of saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4):607-612. (in Chinese)
- [14] 李世芳. 冰冻盐渍土地区公路盐胀和冻胀综合病害[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(2):60-63.
- LI Shi-fang. Salt and frost heaving composite diseases of frozen saline soil area[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(2):60-63. (in Chinese)
- [15] 蒋春阳. 盐渍土路基防治措施与选择标准[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(2):46-48.
- JIANG Chun-yang. Preventive measures and selection criteria of saline soil subgrade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(2):46-48. (in Chinese)