

DOI: 10.11779/CJGE201705020

影响粗粒硫酸盐渍土盐胀特性的敏感因素研究

张莎莎¹, 王永威², 包卫星³, 杨晓华¹, 王龙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;

3. 新疆交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 为了明确影响典型粗粒硫酸盐渍土路基盐胀特征的敏感参数, 提出相关的敏感参数量化分析模型及其影响因素和因素间交互作用的量化指标。采用5 mm筛法的易溶盐测定方法, 基于典型粒径的粗粒硫酸盐渍土, 以单因素试验结果为基础, 采用二次回归正交设计法提出了多因素交互作用下的粗粒硫酸盐渍土的盐胀率预报模型, 同时采用SPSS软件对各敏感性因素进行逐步回归分析, 研究结果表明: 敏感因素的量化指标依次是易溶盐(46%~37%)、荷载(43%~29%)、水(12%~6%)、易溶盐与荷载的交互作用(7.6%)、易溶盐与水的交互作用(2%), 其中, 易溶盐对盐胀率为促进作用, 水会因含盐量不同而对盐胀率的作用产生变化, 荷载、易溶盐与荷载的交互、易溶盐与水的交互均对盐胀量具有一定的抑制作用; 初始压实度对盐胀率具有一定的促进作用, 但由于其特殊的级配特征, 初始压实度在89%~97%范围内对盐胀率的影响效果并不显著。

关键词: 路基填料; 粗粒盐渍土; 硫酸盐; 敏感参数

中图分类号: TU448; U416 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)05-0946-07

作者简介: 张莎莎(1982-), 女, 工学博士, 副教授, 主要从事岩土与隧道工程的教学和科研工作, E-mail: zss_lx@126.com。

Sensitive parameters of embankment deformation behavior for coarse-grained sulfate saline soil

ZHANG Sha-sha¹, WANG Yong-wei², BAO Wei-xing³, YANG Xiao-hua¹, WANG Long¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. National Enterprise Technology Center, CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 3. Xinjiang Traffic Construction Management Bureau, Urumqi 830049, China)

Abstract: In order to determine the sensitive parameters of embankment deformation behavior for coarse-grained sulfate saline soil, the quantitative analysis model for the correlation sensitive parameters is proposed, and the relevant influence factors and the quantitative indexes of the interaction between the factors of coarse-grained sulfate saline soil are investigated. Based on the single-factor salt expansion test results, the salt expansion tests under the interaction of multiple factors are performed using the orthogonal design method. And the simplified prediction models for salt expansion rate of coarse-grained sulfate saline soil are established. The sensitive parameters for the deformation behavior of coarse-grained sulfate saline soil are studied through stepwise regression analysis of SPSS. The results show that the quantitative indexes of the sensitive factors are salt (46%~37%), load (43%~29%), water (12%~6%), interaction of salt and load (7.6%), interaction of salt and water (2%) in turn. The soluble salt on salt expansion is promoted. Due to different salt contents, the water will have a change in the role of salt expansion rate. The load, interaction of salt and load, interaction of salt and water have a certain inhibitory effect on the salt expansion. The initial compaction degree has a certain effect on the salt expansion rate, but it has no significant effect on the salt expansion rate in the range of 97%~89% due to its special characteristics.

Key words: subgrade filling; coarse-grained saline soil; sulfate; sensitive parameter

0 引言

中国西北地区及“一带一路”涉及的西亚地区分布着大面积的粗粒盐渍土, 由于对其工程特性缺乏系统的理论研究, 基于现行规范, 在进行路基设计时, 大部分粗粒盐渍土常与细粒盐渍土一样被弃置不用,

由于其片面夸大了此类盐渍土的工程危害, 导致借弃土方量庞大, 造成严重的水土流失和生态环境破坏。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209006); 新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目

收稿日期: 2016-02-01

表1 砾类土颗粒级配

Table1 Gradation schemes for gravel soil

粒径/mm	$40 > d \geq 20$	$20 > d \geq 10$	$10 > d \geq 5$	$5 > d \geq 2$	$2 > d \geq 1$	$1 > d \geq 0.5$	$0.5 > d \geq 0.025$	$0.025 > d \geq 0.075$	$d < 0.075$
粒组含量/%	5	10	10	5	5	10	2.5	2.5	50

而粗粒硫酸盐渍土更是其中的典型代表, 其盐胀特性及其影响因素直接关系到此类盐渍土的合理应用和国家的战略发展, 因此开展粗粒硫酸盐渍土的路用指标及其相关盐胀影响因素研究对有效利用当地资源具有重要的工程实用价值。

目前, 在粗粒盐渍土地区的工程建设投入已逐年加大, 学者针对粗粒盐渍土的研究亦逐年增多, 华遵孟等^[1]、Wu等^[2]针对西北地区粗粒盐渍土的成因、分布和盐胀规律进行了早期的试验和理论分析。罗炳芳等^[3]、包卫星等^[4]、张莎莎等^[5]针对公路工程中粗粒盐渍土的易溶盐含量试验方法进行了研究和相关试验验证。张莎莎等^[6-8]、丁兆民等^[9]、杨晓华等^[10]通过对盐胀五要素的调节, 针对粗粒硫酸盐渍土路用填料的可用性进行了初步研究及盐胀机理的探讨。程东幸等^[11]、张莎莎等^[12]采用不同的试验方法对粗粒盐渍土的溶陷特性开展了研究。上述研究成果对于深入认识粗粒盐渍土的工程特性具有一定的推动作用, 也定性地提出了盐胀率随含盐量、含水率、初始密度及荷载的一些基本变化规律, 但依然缺乏针对粗粒盐渍土在各因素交互作用下的路基变形敏感参数的量化研究, 亦缺乏其定量分析的相关理论模型。高江平等^[13-14]、宋启卓等^[15]、顾强康等^[16]针对细粒硫酸盐渍土开展过相关的盐渍土盐胀率预报模型、敏感参数及其影响权重的研究工作。但是, 由于粗粒盐渍土与细粒盐渍土在颗粒级配特征上的巨大差别, 所以导致粗粒盐渍土的盐胀特征和相关影响因素亦与之差别较大。

针对粗粒硫酸盐渍土, 开展工程可控因素土、水、盐、力多因素交互作用下影响其路基盐胀特征的敏感参数研究是揭示粗粒硫酸盐渍土路用指标的基础。因此, 本文基于两类粗粒盐渍土—砂类和砾类硫酸盐渍土, 首先对其单因素试验进行分析, 以确定多因素交互试验的因素范围, 其次基于盐胀率预报模型, 研究盐胀率与各因素间的交互作用关系, 揭示影响粗粒硫酸盐渍土路基变形性状的敏感因素, 以完善粗粒硫酸盐渍土路基设计的控制指标。

1 试验土样的配制及其基本工程性质

基于公路土工试验规程, 试验素土样主要分为两种: 砂类土(含细粒土砂)和砾类土(细粒土质砾)。由于本文重点研究在各影响因素交互作用下, 采用粗粒盐渍土作为路基填料时的盐胀特性的敏感参数, 为

了突出敏感因素的规律特征和增加试验结果的可对比性, 采用配置易溶盐含量的试验方法开展研究。其中, 以天然素黄土作为细粒土填料, 砂类土和砾类土分别统一级配, 亦满足路基填料级配良好的要求(配土方案见表1, 2)。通过对试验素土样进行重型击实试验, 可得砂类土和砾类土的最大干密度及最佳含水率分别为 1.98 g/cm^3 , 11.0%, 2.22 g/cm^3 , 6.4%。试验土样的易溶盐含量配制方法采用过5 mm筛法^[3-5], 易溶盐均匀拌合在土样中, 并闷料养生至少24 h。

表2 砂类土颗粒级配

Table 2 Gradation scheme for sandy soil

粒径/mm	$2 > d \geq 1$	$1 > d \geq$	$0.5 > d \geq$	$0.25 > d \geq$	$d < 0.075$
		0.5	0.25	0.075	
粒组含量/%	10	30	30	15	15

2 试验方案

2.1 试验仪器

基于高低温试验箱(温控范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$, 精度 1°C), 盐胀试验仪器筒的内径为24.5 cm, 高度为25 cm。采用防水密封百分表(精度0.01 mm)测量盐胀量, 为了提高试验精度, 每组试验做2~3个平行试验。实物如图1所示。



图1 试验实物图

Fig. 1 Diagram of salt expansion tests

2.2 降温方案

温度因素对粗粒盐渍土盐胀量的影响非常复杂, 中国西北地区的环境温度变化为季节逐渐变温和昼夜交替变温的叠加。由于本文的研究重点是工程可控因素对粗粒硫酸盐渍土的盐胀影响, 所以在设定试验温度时, 旨在使易溶盐充分盐胀(安全储备), 因此采用梯度逐渐逐级降温: $25^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C} \rightarrow 15^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \rightarrow -5^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \rightarrow -15^{\circ}\text{C}$; 每级降温时间设定1 h; 降温结束后恒温设定为6 h。

2.3 单因素盐胀试验方案

以公路路基设计规范为基准,首先开展的是盐分因素单独变化的试验研究,试验土样密度采用最大干密度 $\rho_{dmax} \times 93\%$,含水率取最佳含水率 w_{op} ,无上覆荷载,硫酸盐含量分别设定为 $0.3\% \rightarrow 0.5\% \rightarrow 0.8\% \rightarrow 1.1\% \rightarrow 1.4\% \rightarrow 1.7\% \rightarrow 2\% \rightarrow 2.3\% \rightarrow 2.6\% \rightarrow 2.9\% \rightarrow 3.2\% \rightarrow 3.5\% \rightarrow 3.8\% \rightarrow 4.0\% \rightarrow 4.3\% \rightarrow 4.7\%$;其次开展水因素单独变化的试验,土样密度为 $\rho_{dmax} \times 93\%$,含水率按照 w_{op} 及 $w_{op} \pm 2.2\%$ 确定;然后开展土样初始密度条件单独改变时的试验研究,其压实度分别设定为89%,93%和97%;最后,研究附加荷载(土样按规定密度击实后上覆附加荷载)因素单独改变时对盐胀量的影响规律,依试验条件,上覆荷载分别设定为0,0.276,0.552,0.828 kPa。

2.4 多因素交互作用下的盐胀试验方案

在实际工程中,盐胀要素对粗粒硫酸盐渍土的影响并不是理想的单因素变化,而是多因素交互作用的结果。在单因素变化试验结果的基础上,采用正交设计方法,开展多因素交互作用下影响其盐胀率的数学预报模型研究,进而采用SPSS软件逐步回归分析,研究多因素交互作用下影响粗粒硫酸盐渍土盐胀变形的敏感参数。

多因素试验中的各因素水平安排原则:含盐量取值以盐胀率界限值(起胀含盐量和破坏含盐量)为准^[17],同时满足二次回归正交设计标准;含水率以 w_{op} 为设置基准;压实度以下路堤标准93%为基础;附加荷载以试验条件为准。试验因素水平安排见表3。砂类硫酸盐渍土和砾类硫酸盐渍土分别采用4个试验因素,每个因素取5个试验水平,分别需做25组试验,每组试验分别做2,3个平行试验。

表3 砂类硫酸盐渍土二次正交回归试验设计因素水平表

Table 3 Orthogonal factor levels for sandy sulfate saline soil

影响因素	含盐量/%	含水率/%	压实度/%	荷载/kPa
标记	x_1	x_2	x_3	x_4
基准水平(0)	1.496	11	93	2.21
变化间距(Δ)	0.704	1.556	2.83	1.563
上水平(+1)	2.2	12.556	95.83	3.77
下水平(-1)	0.792	9.444	90.17	0.65
上星号臂(+1.414)	2.491	13.2	97	4.42
下星号臂(-1.414)	0.5	8.8	89	0

3 盐胀试验结果及其分析

3.1 单因素作用下粗粒盐渍土盐胀试验结果

仅含盐量改变时,粗粒硫酸盐渍土的盐胀率变化规律如图2。从图2可知,随着含盐量的增加,砂类硫酸盐渍土的盐胀起胀趋势和增长比率明显大于砾类硫

酸盐渍土;由于颗粒级配良好,粗粒硫酸盐渍土的盐胀过程中,粒径较小的颗粒土样对盐胀量的增长作用较显著。同时,根据易溶盐含量的工程界限值的计算^[17],此砂类硫酸盐渍土含盐量约为0.5%(基于1 mm筛法的含盐量对应值为0.6%),而砾类硫酸盐渍土的含盐量约为2.1%(基于1 mm筛法的含盐量对应值为2.4%)。所以,在正交试验设计时,含盐量范围均包含了这些界限值(见表3,4)。

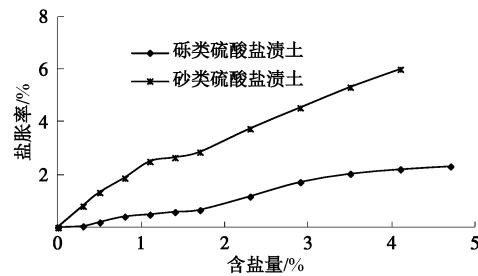


图2 粗粒硫酸盐渍土盐胀率变化规律图

Fig. 2 Variation of salt expansion rate with salt content for coarse-grained sulfate saline soil

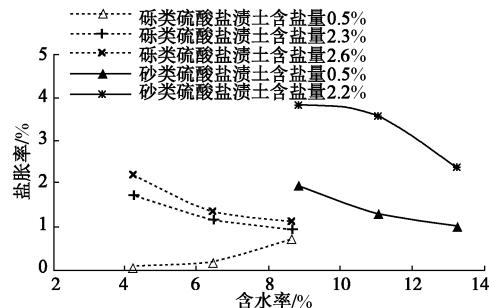


图3 粗粒硫酸盐渍土盐胀率随含水率变化规律

Fig. 3 Variation of salt expansion rate with water content for coarse-grained sulfate saline soil

表4 砾类硫酸盐渍土二次正交回归试验设计因素水平表

Table 4 Orthogonal factor levels for gravel sulfate saline soil

影响因素	含盐量/%	含水率/%	压实度/%	荷载/kPa
标记	x_1	x_2	x_3	x_4
基准水平(0)	1.555	6.4	93	2.21
变化间距(Δ)	0.746	1.556	2.83	1.563
上水平(+1)	2.3	7.956	95.83	3.77
下水平(-1)	0.8	4.844	90.17	0.65
上星号臂(+1.414)	2.61	8.6	97	4.42
下星号臂(-1.414)	0.5	4.2	89	0

仅含水率改变时,粗粒硫酸盐渍土的盐胀率变化规律如图3。从图3可知,砾类硫酸盐渍土盐胀率随含水率的变化规律随含盐量的多少而不同,当含盐量为0.5%时,盐胀率随着含水率的增加而增大;当含盐量分别为2.3%和2.6%时,盐胀率随含水率的增加而减小。该变化规律与砾类亚硫酸盐渍土的变化规律基本

一致^[17]。但该砂类硫酸盐渍土在含盐量大于0.5%以后, 盐胀率随含水率的增加均减小。

含水率对粗粒盐渍土盐胀量的影响非常复杂, 其中, 粗粒盐渍土与易溶盐之间的相互作用关系会影响粗粒盐渍土的初始压实效果(如孔隙比的大小和易溶盐在土体压实过程中的胶结作用), 进而影响其盐胀率随含水率的变化规律^[17]; 同时, 对于不同级配的粗粒土, 其不同的变化规律均有对应的界限含盐量和界限含水率。从工程可控因素和减小路基变形量角度考虑, 粗粒盐渍土应严格控制最佳含水率和注重路堤防水^[5]。

仅初始压实度变化, 粗粒硫酸盐渍土的盐胀率变化规律如图4所示。由图4可知, 粗粒硫酸盐渍土的盐胀率随初始密度的增加而增大, 这是由于土体密度增加, 土体孔隙减小, 盐胀量增大的相对明显。

仅附加荷载变化, 粗粒硫酸盐渍土的盐胀率变化规律如图5。由图5可知, 附加荷载对粗粒硫酸盐渍土的盐胀抑制效果较强。

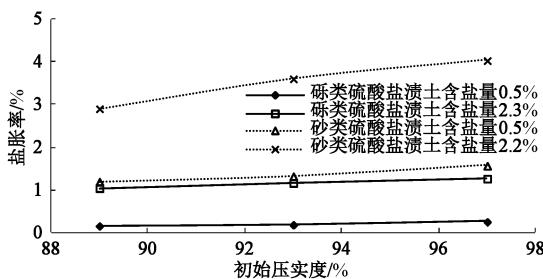


图4 粗粒硫酸盐渍土盐胀率随初始压实度变化规律

Fig. 4 Variation of salt expansion rate with initial compaction for coarse-grained sulfate saline soil

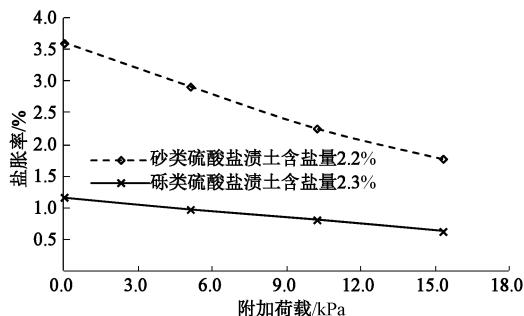


图5 粗粒硫酸盐渍土盐胀率随荷载变化规律

Fig. 5 Variation of salt expansion rate with additional load for coarse-grained sulfate saline soil

3.2 多因素交互作用下粗粒盐渍土盐胀试验结果

多因素交互作用下粗粒硫酸盐渍土的最终盐胀率试验结果如图6所示。从图6初步可知, 在试验因素水平设定条件下, 砾类硫酸盐渍土的最小盐胀率0.577%, 最大盐胀率2.156%; 砂类硫酸盐渍土的最小

盐胀率0.661%, 最大盐胀率3.944%。试验因素水平设定基本满足要求。

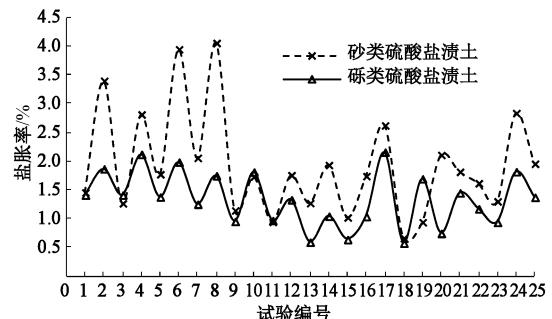


图6 多因素交互作用下粗粒硫酸盐渍土盐胀率试验结果

Fig. 6 Results of salt expansion tests

4 粗粒硫酸盐渍土盐胀率简化预报模型的建立

4.1 砾类硫酸盐渍土盐胀率简化预报模型

根据二次回归正交设计原理, 砾类硫酸盐渍土的盐胀率回归方程为

$$Y = 1.338 + 0.351x_1 + 0.177x_2 + 0.046x_3 - 0.279x_4 - 0.081x_1x_2 - 0.019x_1x_3 - 0.012x_1x_4 - 0.007x_2x_3 - 0.027x_2x_4 - 0.026x_3x_4 + 0.030x'_1 - 0.044x'_2 + 0.002x'_3 + 0.035x'_4 \quad (R^2 = 0.904), \quad (1)$$

式中, Y 为盐胀率 (%), x_1 为含盐量 (%), x_2 为含水率 (%), x_3 为压实度 (%); x_4 为荷载 (kPa), x'_i 是二次项 x_i^2 的中心变化项的编码因素, $x'_i = x_i^2 - (2^p + 2\gamma^2)/n$, $p=4$, $n=25$, $\gamma=1.414$, $i=1,2,3,4$, $k=1,2,3,4$, 下同。

为了使所得砾类硫酸盐渍土的盐胀率计算公式更具有工程应用价值, 应对回归方程式(1)进行简化分析。修正简化后的回归方程为

$$Y = 1.338 + 0.351x_1 + 0.177x_2 - 0.279x_4 \quad (R^2 = 0.864) \quad (2)$$

具体计算分析过程可参考文献[17]。

由因素水平编码值盐胀率方程式(2)可得砾类硫酸盐渍土的因素实际值盐胀率方程式:

$$\hat{Y} = 0.307 + 0.403z_1 + 0.114z_2 - 0.179z_4 \quad (R^2 = 0.864), \quad (3)$$

式中, \hat{Y} 为因素实际值盐胀率 (%), z_1 为因素实际值含盐量 (%), z_2 为因素实际值含水率 (%), z_4 为因素实际值上覆荷载 (kPa)。

盐胀率实测值与因素实际值方程(3)所得计算值之间的比较如图7。从图7可以看出计算值与实测值非常接近, 最大误差值约为±11%, 建立的预报模型是稳定的。

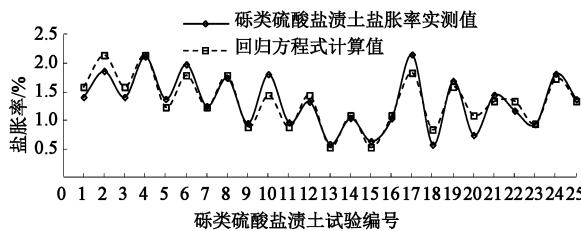


图 7 砾类硫酸盐渍土盐胀率计算值与实测值的比较

Fig. 7 Differences between theoretical values and experimental data for gravel sulfate saline soil

4.2 砂类硫酸盐渍土盐胀率简化预报模型

根据二次回归正交设计原理, 砂类硫酸盐渍土的盐胀率回归方程为

$$\begin{aligned} Y = & 1.926 + 0.599x_1 - 0.247x_2 - 0.064x_3 - 0.630x_4 - \\ & 0.157x_1x_2 - 0.015x_1x_3 - 0.304x_1x_4 + 0.056x_2x_3 + \\ & 0.041x_2x_4 - 0.018x_3x_4 + 0.043x'_1 - 0.016x'_2 + \\ & 0.080x'_3 + 0.257x'_4 \quad (R^2 = 0.970) . \end{aligned} \quad (4)$$

简化修正后的砂类硫酸盐渍土回归方程为

$$\begin{aligned} Y = & 1.926 + 0.599x_1 - 0.247x_2 - 0.630x_4 - \\ & 0.157x_1x_2 - 0.304x_1x_4 + 0.257x'_4 \quad (R^2 = 0.957) . \end{aligned} \quad (5)$$

最后建立砂类硫酸盐渍土的因素实际值盐胀率议程式为

$$\hat{Y} = 0.326 + 3.038z_1 + 0.056z_2 - 0.455z_4 - \\ 0.143z_1z_2 - 0.276z_1z_4 + 0.105z_4^2 \quad (R^2 = 0.957) . \quad (6)$$

式中 \hat{Y} 为因素实际值盐胀率 (%); z_1 为因素实际值含盐量 (%); z_2 为因素实际值含水率 (%); z_4 为因

素实际值上覆荷载 (kPa); z_1z_2 为因素实际值含盐量与其含水率的交互作用; z_1z_4 为因素实际值含盐量与上覆荷载交互作用; z_4^2 为因素实际值上覆荷载平方。

盐胀率实测值与因素实际值方程 (6) 所得计算值之间的比较如图 8。

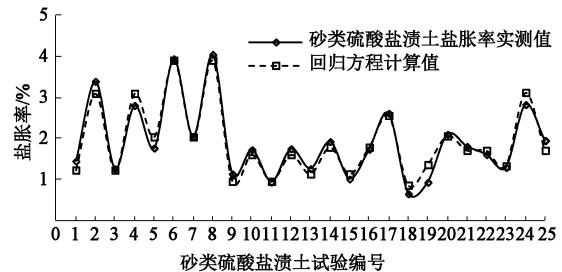


图 8 砂类硫酸盐渍土盐胀率计算值与实测值的比较

Fig. 8 Difference between theoretical values and experimental data for sandy sulfate saline soil

从图 8 可以看出计算值与实测值非常接近, 最大误差值约为 $\pm 9\%$, 建立的预报模型是稳定的。

5 影响粗粒硫酸盐渍土盐胀特性的敏感因素权重分析

由上述分析可得砾类硫酸盐渍土盐胀率预报模型式 (2) 和砂类硫酸盐渍土盐胀率预测模型式 (5), 分别通过 SPSS 软件对其进行逐步回归分析, 构建影响砾类硫酸盐渍土和砂类硫酸盐渍土盐胀率的显著性因素分析模型, 见模型汇总表 5, 6。

表 5 砾类硫酸盐渍土盐胀率影响因素汇总模型

Table 5 Model summary for gravel sulfate saline soil

模型	R	R^2	调整 R^2	估计的标准误差	更改统计量				DW 检验
					R^2 更改	F 更改	自由度 1	自由度 2	
a	0.677	0.458	0.435	0.395	0.458	19.461	1	23 ^a	0.000
b	0.865	0.748	0.725	0.248	0.290	25.288	1	22 ^b	0.000
c	0.930	0.864	0.845	0.186	0.116	118.001	1	21 ^c	0.000
									2.131

注: a 模型预测变量: 含盐量 x_1 。b 模型预测变量: 含盐量 x_1 、荷载 x_4 。c 模型预测变量: 含盐量 x_1 、荷载 x_4 、含水率 x_2 。

表 6 砂类硫酸盐渍土盐胀率影响因素汇总模型

Table 6 Model summary for sandy sulfate saline soil

模型	R	R^2	调整 R^2	估计的标准误差	更改统计量				DW 检验
					R^2 更改	F 更改	自由度 1	自由度 2	
a	0.637	0.406	0.380	0.711	0.406	15.697	1	23 ^a	0.001
b	0.879	0.772	0.752	0.450	0.367	35.456	1	22 ^b	0.000
c	0.921	0.848	0.827	0.376	0.076	10.483	1	21 ^c	0.004
d	0.954	0.910	0.892	0.296	0.062	13.889	1	20 ^d	0.001
e	0.968	0.937	0.921	0.254	0.027	8.154	1	19 ^e	0.010
f	0.978	0.957	0.943	0.215	0.020	8.514	1	18 ^f	0.009
									1.375

注: a 模型预测变量: 荷载 x_4 。b 模型预测变量: 荷载 x_4 、含盐量 x_1 。c 模型预测变量: 荷载 x_4 、含盐量 x_1 、 x_1x_4 。d 模型预测变量: 荷载 x_4 、含盐量 x_1 、 x_1x_4 、含水率 x_2 。e 模型预测变量: 荷载 x_4 、含盐量 x_1 、 x_1x_4 、含水率 x_2 、 x'_4 。f 模型预测变量: 荷载 x_4 、含盐量 x_1 、 x_1x_4 、含水率 x_2 、 x'_4 、 x_1x_2 。

从模型9可知, 对于砾类硫酸盐渍土, 由含盐量和常量构建的显著模型1, $R^2=0.458$, 调整后的 $R^2=0.435$, 则含盐量为影响该粗粒硫酸盐渍土盐胀率最主要的因素。同时, 由 R^2 更改量可知, 影响盐胀率的因素按权重大小排序依次为含盐量 $x_1>$ 荷载 $x_4>$ 含水率 x_2 , 影响权重依次为0.458, 0.290, 0.116。对于砾类硫酸盐渍土而言, 因素间的交互作用不显著。

从模型10可知, 对于砂类(含细粒土砂)硫酸盐渍土, 由荷载和常量构建的显著模型1, $R^2=0.406$, 调整后 $R^2=0.380$, 由 R^2 更改量可知, 影响盐胀率的因素按权重大小排序依次为荷载 $x_4>$ 含盐量 $x_1>$ 交互作用 $x_1x_4>$ 含水率 $x_2>$ 交互作用 x_1x_2 , 影响权重为0.433, 0.367, 0.076, 0.062, 0.020。

从权重分析结果可知, 砾类硫酸盐渍土的盐胀主要影响因素为含盐量, 其对盐胀量增大的贡献度约为50%, 其次为上覆荷载, 其对盐胀量的抑制效果接近30%, 含水率对盐胀量的贡献度接近12%。

而上覆荷载对砂类(含细粒土砂)硫酸盐渍土的盐胀量抑制效果可达43%(主要是因为含细粒土砂中 $<0.075\text{ mm}$ 的细粒土含量相对砾类土少), 其次为含盐量对其盐胀量增大的贡献度将近37%, 而含盐量与附加荷载的交互作用、含水率、含盐量与含水率的交互作用影响均相对较小, 其影响程度均小于10%。权重分析结果亦与单因素试验结果一致。

压实度作为影响盐胀率的一个因素, 在显著性模型表9, 10中均体现不明显, 其原因可能为粗粒盐渍土最大干密度相对较大, 试验设置的压实度水平89%, 93%, 97%对应的实际试验干密度差别较小, 另外据单因素试验结果可知随着压实度的增加盐胀率仅会小幅度增加, 影响亦较小。这与粗粒亚硫酸盐渍土盐胀特性影响因素规律是一致的^[17]。

6 结论与建议

(1) 基于过5mm筛法配制易溶盐, 采用二次正交回归试验设计, 建立了简化的砾类硫酸盐渍土盐胀率预报模型和简化的砂类(含细粒土砂)硫酸盐渍土的盐胀率预报模型。为预测粗粒硫酸盐渍土地区路基的盐胀率提供技术参考。

(2) 工程可控盐胀要素及其相互间的交互作用对砾类硫酸盐渍土盐胀率的影响敏感性依次为: 易溶盐含量(0.458)、荷载(0.290)、水(0.116); 对砂类(含细粒土砂)硫酸盐渍土盐胀率的影响敏感性依次为: 荷载(0.433)、易溶盐含量(0.367)、易溶盐与荷载的交互作用(0.076)、水(0.062)、易溶盐与水

的交互作用(0.020)。

(3) 在工程应用中, 上覆荷载对粗粒硫酸盐渍土盐胀量的抑制程度应该参考工程实际的颗粒级配特征, 细粒土含量对其影响权重的大小影响较显著。

参考文献:

- [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] WU Qing-bai, ZHU Yuan-lin. Experimental studies on salt expansion for coarse grain soil under constant temperature[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34: 59–65.
- [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(11): 192–193. (LUO Bing-fang, PAN Qiu-ju. Determination of soluble salt content of coarse-grained soil[J]. Highway, 2005, 11(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-me. Research on large-scale embankment model test of crude coarse grained saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 842–847. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 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))
- [9] 丁兆民, 张莎莎, 杨晓华. 粗颗粒盐渍土路用填料可用性指标研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(4): 623 - 631. (DING Zhao-min, ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua. Experimental studies of the applicability index of coarse grained salty soil as an embankment filling[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(4): 623 - 631. (in Chinese))
- [10] 杨晓华, 张莎莎, 包卫星. 天然盐渍土工程特性对比分析[J]. 工程勘察, 2010(11): 11 - 16. (YANG Xiao-hua, ZHANG Sha-sha, BAO Wei-xing. Comparison analysis on engineering properties of crude saline soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(11): 11 - 16. (in Chinese))
- [11] 程东幸, 刘志伟, 张希宏. 粗颗粒盐渍土溶陷特性试验研究[J]. 工程勘察, 2010, **12**: 11 - 16. (CHENG Dong-xin, LIU Zhi-wei, ZHANG Xi-hong. Experimental study on collapsibility characteristic of saline coarse-grained soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, **12**: 11 - 16. (in Chinese))
- [12] 杨晓华, 张志萍, 张莎莎. 高速公路盐渍土地基溶陷特性离心模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, **30**(2): 5 - 9. (YANG Xiaohua, ZHANG Zhiping, ZHANG Shasha. Centrifugalize model test on dissolve collapse of saline soil under expressway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, **30**(2): 5 - 9. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 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): 11 - 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): 11 - 15. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 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))
- [17] 张莎莎, 王永威, 杨晓华, 等. 硫类亚硫酸盐渍土盐胀率的简化预测模型研究[J]. 中国公路学报, 2015, **28**(17): 1 - 7. (ZHANG Sha-sha, WANG Yong-wei, YANG Xiao-hua, et al. Research on the simplified prediction model of salt expansion rate for gravel sulfite saline soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, **28**(17): 1 - 7. (in Chinese))