DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.004
巩丽丽, 刘德仁, 杨楠, 等. 季节性冻土区路基土体冻胀影响因素灰色关联分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 28-34. (GONG Lili, LIU Deren, YANG Nan, et al. Comprehensive analysis on frost heave factors of subgrade soil in seasonally frozen ground region[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 28-34. (in Chinese))

季节性冻土区路基土体冻胀影响因素灰色关联分析

巩丽丽[1], 刘德仁[1], 杨 楠[2], 王跃武[2], 张延杰[1]
(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 青藏铁路公司西宁工务段, 青海 西宁 810006)

摘要: 以整治青藏铁路环青海湖段季节性冻土区路基冻害为背景,通过现场采集典型分布的粉质黏土,考虑温度、含水率、含盐量(质量分数)、压实度四个因素,进行室内冻胀正交试验,测试了不同温度环境下路基土体的冻胀率,进行正交试验的极差分析和方差分析,建立灰色关联度分析模型,分析各因素对冻胀影响的主次关系。结果表明,正交试验分析和灰色关联度分析所得规律一致,影响冻胀因素由主到次依次为温度、含盐量、含水率和压实度,因素之间的交互作用影响较小可以忽略;温度和含盐量对冻胀影响非常显著,含水率对冻胀有显著影响,压实度和其他 3 个因素之间的交互作用对冻胀没有显著影响。

关 键 词: 铁路路基; 路基冻害; 冻胀; 正交试验; 灰色关联度
中图分类号: TU43 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-640X(2019)01-0028-07

在季节性冻土区修建铁路时,路基土体冻害会使其发生不均匀冻胀,造成路基土体融沉或翻浆冒泥,造成上部建筑发生严重变形甚至大量损毁,给铁路运营埋下重大隐患。因此,为了减少或避免路基冻害问题的出现,在现场考察和监测数据的基础上,国内外学者进行了大量的室内试验及模型模拟、数值分析。

影响冻胀的因素主要有土体含水量、外部温度、土体压实度和干密度、土体中的有机盐含量等。由于土质、温度和含水率等条件的差异,前人依据各地不同情况分别进行了试验研究,得到了大量关于不同季冻区冻害的研究成果。葛建锐等[1]取东北黑龙江北安二龙山灌渠土样进行正交试验,得出影响冻胀力的主次因素依次为平均冻胀温度、初始含水率、土样孔隙率、预加轴向压力。王青志等[2]选取最大粒径不超过 30 mm 的级配碎石作为研究材料,在不同含水率、细颗粒含量、温度和压实度条件下进行正交试验,并进行灰色关联度分析,认为对级配碎石冻胀影响最大的因素是含水率。张远芳等[3]取天山达坂乔尔玛至那拉提公路沿线冻土为样,进行正交试验并通过灰色关联度分析得到:对冻胀系数影响程度由高到低的因素依次为含水率、有机质、含盐量、土质和干密度;对融沉系数的影响程度由高到低依次为含盐量、含水量、有机质、土质和干密度。本文在以上研究的基础上,设计正交冻胀试验,采用灰色关联度方法,综合分析影响青藏铁路环青海湖段季节性冻胀的因素。

1 冻胀试验

1.1 试样制备

青藏铁路穿越地区分布着广泛的冻土,由此引发的冻害问题给铁路养护造成了很大困难。针对青藏铁路西格段环青海湖地区的典型冻害断面 DK224,现场挖探取样,并进行室内土工试验,得到土样的基本物理

收稿日期: 2018-03-06
基金项目: 青藏铁路公司科技研究开发计划课题(QZ2015-G01); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201607)
作者简介: 巩丽丽(1991—),女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 2823638498@qq.com
通信作者: 刘德仁(E-mail: liuderen@mail.lzjtu.cn)

指标如表 1 所示。根据冻胀影响因素和当地特殊的气候条件，考虑温度、含水率、含盐量(质量分数，下同)、压实度 4 个因素的作用，将重塑土样击入内径 5 cm，高 10 cm，厚 1 cm 的圆形有机玻璃管内制备试样。为给土样留有膨胀余地，土样实际高度为 8 cm。制好的土样统一编号，并将土样上下用保鲜膜密封，防止水分散失。由于破坏了原装土样，对土体的结构性有一定的影响，因此尽量保持土体参数与原状土样一致。

表 1　土样基本物理指标

Tab. 1　Basic physical indicators of soil

颗粒组成/%						最优含水率/%	最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	土质
2.000 ~ 0.500 mm	0.500 ~ 0.075mm	0.075 ~ 0.050 mm	0.050 ~ 0.010 mm	0.010 ~ 0.005 mm	0.005 ~ 0.002 mm							
21.3	20.0	34.0	17.3	6.2	1.2	19.26	1.79	32.78	21.08	11.73	1.51	粉质黏土

1.2　正交试验设计

正交试验是研究多因素问题比较常用的方法，不仅可减少试验次数，而且也极大简化了统计分析计算。青藏铁路沿线含盐量状况调查显示，土中含盐量最大为 1.55%，鉴于拟采用注盐法整治该段路基冻害，盐化之后土体含盐量会增加，故分别选取 0，2.0% 和 4.0% 共 3 种含盐量，盐的种类为工业氯盐(六水氯化镁)。根据室内土工试验，土体最大干密度为 1.79 g/cm^3，蜡封法测得现场天然干密度为 1.40 ~ 1.50 g/cm^3，因此控制压实度为 75%，85%，95%，含水率取 20%，25%，30%，分别观测试样在 −2，−6 和 −10 ℃下土样的冻胀变形。选择温度(A)、含盐量(B)、压实度(C)和含水率(D)4 个因素作为室内冻胀试验主要考虑的因素，每个因素取 3 个水平，见表 2。

表 2　因素及水平设置

Tab. 2　Factors and level settings

水平	温度(A)/℃	含盐量(B)/%	压实度(C)/%	含水率(D)/%
1	−2	0	75	20
2	−6	2	85	25
3	−10	4	95	30

1.3　试验方法

试验所用仪器包含提供恒温环境的恒温箱和控温装置冷浴。高低温控制器为 XT5701LTB − 450 型，外形尺寸为 730 mm × 750 mm × 1 100 mm，该装置温度可控范围在 − 40 ~ 90 ℃，温度波动度在 ± (0.05 ~ 0.10)℃。试验过程中温度可通过显示面板进行调节控制。

试验前先将试样在恒温环境中稳定 24 h，土体含盐量含量较大时，温度越高，含盐量在土体中的均匀化程度越高，故含盐量小于 1.5% 的试样，稳定温度为 5 ℃，别的试样稳定温度为 20 ℃，然后将试样放入恒温箱内，架设百分表和观测装置后逐级降温，降温速率为 1 ℃/h，每级温度定 8 h，分别观测 −2，−6 和 −10 ℃温度下的冻胀量，降温曲线见图 1。

将试样放置在恒温环境箱内，在土样上部架设百分表，然后在试验要求温度下观测百分表读数，确定冻胀量，反算出冻胀率。试验过程中，为了避免人为因素的干扰，将试样置于试验台上，试样左右用沙袋固定，见图 2。

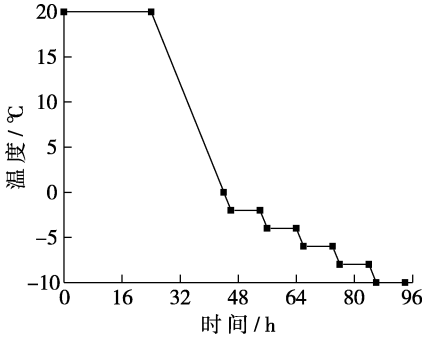


图 1　降温曲线

Fig. 1　Cooling curve



图 2　试验照片

Fig. 2　Test photos

试验方案和试验结果如表 3 所示,本试验为 4 因素 3 水平,考虑因素之间交互作用,选择 L27(3^{13})正交表,因素列各占一列,交互作用 6 列,误差 3 列,共进行 27 组试验,把正交表中安排各因素列中的每个水平数字换成该因素的实际值,便形成了正交试验方案。

表 3 冻胀试验方案及结果

Tab. 3 Frost heaving test program and results

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	冻胀率/%
	A	B	(A*B)1	(A*B)2	C	(A*C)1	(A*C)2	(A*D)2	D	(A*D)1	误差 1	误差 2	误差 3	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.09
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.19
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.40
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	-0.02
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	3	-0.04
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	3	3	1	0
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	3	0.01
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	2	2	1	0.01
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	2	-0.01
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	2	3	1	0.38
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	3	1	2	0.42
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	1	2	3	0.46
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	2	3	2	0.07
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	3	1	3	0
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	1	2	1	0.01
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	3	0.12
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	1	0.12
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	2	0.01
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	3	2	1	0.86
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	0.49
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	2	1	3	0.63
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	2	0.28
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	3	0.26
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	1	0.54
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	3	2	3	0.29
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	1	3	1	0.24
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	2	0.09

2 正交试验结果分析

由 27 组试样冻胀率可知,对于不同含盐量的试样,冻胀率随含水率增加逐渐增大,随着压实度的增加逐渐减小。在试验过程中,监测每组试样开始产生冻胀点的温度,分析可得,随着含盐量的增加,土体的起胀温度逐渐降低,即含盐量的增加,可有效降低土体的冰点,随着温度的逐渐降低,冻胀率呈增大趋势。

2.1　极差分析

对各因素进行极差分析，结果见表 4。由表 4 可得：温度的极差为 1.02，含盐量的极差为 1.01，压实度的极差为 0.15，含水率的极差为 0.32，温度与含盐量、压实度、含水率之间相互影响的极差分别为 0.17，0.17，0.23，因此影响冻胀的因素主次为温度 > 含盐量 > 含水率 > 温度与含水率交互 > 温度与含盐量交互 = 温度与压实度交互 > 压实度。由极差大小的对比可知，温度和含盐量对冻胀率的影响较大，含水率次之，其余因素影响较小。将误差列的影响系数进行比较，误差列极差平均值为 0.19，说明除了本次考虑的 3 种因素之间的交互作用外，其他因素之间有可能也存在交互影响，但是极差相对较小，在试验分析过程中可以忽略。

表 4　极差分析

Tab. 4　Extreme analysis

项目	因素及水平						
	A	B	C	D	(A * B)	(A * C)	(A * D)
K1	0.63	3.92	2.08	1.54	1.72	1.72	2.02
K2	1.59	1.10	1.69	1.85	2.03	2.03	1.95
K3	3.68	0.88	2.13	2.51	2.16	2.16	1.94
k1	0.21	1.31	0.69	0.51	0.57	0.57	0.67
k2	0.53	0.37	0.56	0.62	0.68	0.68	0.65
k3	1.23	0.29	0.71	0.84	0.72	0.72	0.65
极值 R	1.02	1.01	0.15	0.32	0.17	0.17	0.23

注：K 表示对应不同因素相同水平下试验结果的累计值；k 表示对应不同因素相同水平下试验结果累计值的平均值。

2.2　方差分析

对各因素进行方差分析，结果见表 5。由表 5 可知，给定显著性水平 $\alpha = 0.05$，因素 A，B 对试验结果都有非常显著的影响，因素 D 对试验结果有显著影响，C 和其他因素之间的交互作用对试验结果没有显著影响，即温度和含盐量对冻胀影响非常显著，含水率对冻胀有显著影响，压实度和因素之间的交互作用对冻胀没有显著影响。误差列的均方差都小于其余因素，说明其他因素之间的交互作用影响较小，可以忽略。

表 5　方差分析

Tab. 5　Variance analysis

差异源	离均差平方和	自由度	均方差	F 值	显著性
A	0.541	2	0.271	47.976	非常显著
B	0.639	2	0.320	56.666	非常显著
C	0.013	2	0.007	1.153	不显著
D	0.055	2	0.028	4.877	显著
A * B	0.063	4	0.016	2.814	不显著
A * C	0.039	4	0.010	1.734	不显著
A * D	0.063	4	0.016	2.799	不显著
误差 e	0.034	6	0.006		

2.3　单因素验证

根据极差分析和方差分析，温度和含盐量对冻胀的影响最为显著，为了进一步分析这两种因素对冻胀的影响，设置两组单因素验证试验。

通过控制 30% 的含水率、85% 压实度，分别监测试样在 0，−2，−4，−6，−8，−10，−12，−15 和 −20 ℃下的冻胀率，降温速率为 1 ℃/h，每级温度定 8 h。测试结果如图 3 所示，可见，随着温度的降低，冻胀率逐渐增大，温度低于 −8 ℃时，冻胀率增长缓慢，随着温度的降低，冻胀率剧烈变化；当温度低于 −15 ℃时，冻胀率趋于稳定，说明不同温度下路基土体起胀温度不同，冻胀在一定的温度区间发展迅速，当温度达到某一值之后，冻胀发展趋于平稳，不再增加。

通过控制 30% 的含水率、85% 压实度和 −10 ℃温度，分别监测试样在 0，0.5%，1.0%，2.0%，3.0% 和 4.0% 含盐量下的冻胀率。测试结果如图 3 所示，由图 3 可知，随着含盐量的增加，冻胀率逐渐减小，当含盐量达到一定程度，冻胀率保持稳定。

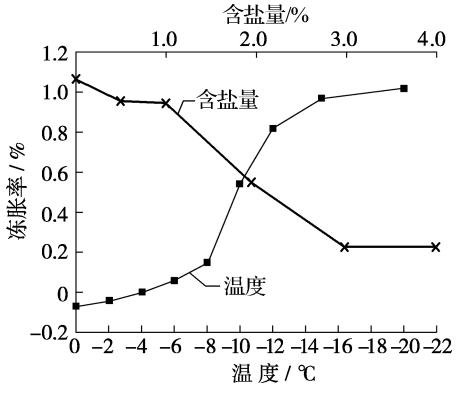


图 3　温度及含盐量与冻胀率之间的关系

Fig. 3　Relationship between temperature and salt and frost heave rate

3 灰色关联度分析

在研究影响因素时,若单一研究某一因素往往缺乏对比性,难以得出具有说服力的结果,故经常取多因素同时进行试验研究,得出较多数据进行分析对比,进而得出各影响因素对冻胀影响程度的大小。因此,除了进行正交试验和方差对比分析外,还大量使用灰色关联度来进行分析,并且该方法所需的观测数据少、计算量小、对样本量的多少和样本有无规律都同样适用、不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况[4]。灰色关联度分析是根据因素间发展趋势的相近或相反程度进行对比分析的一种分析方法,在进行关联度分析时,两个或多个因素间变化发展趋势越相似,同步变化程度越高,即其关联程度越高,反之即关联程度越低。

设有参考序列 $X_0 = \{x_0(k), k = 1,2,\cdots,n\}$ 和比较序列 $X_i = \{x_i(k), k = 1,2,\cdots,n\}$,式(1)中 ξ_k 称为 X_0 和 X_i 在 k 点的关联度系数。

$$\xi_k = \frac{\min_i \min_k |x_i(k) - x_0(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_0(k)|}{|x_i(k) - x_0(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_0(k)|} \tag{1}$$

式中:ρ 为分辨系数,取值 0.5。

比较序列对参考序列的关联度定义见式(2):

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \xi_i(k) \tag{2}$$

对表 3 中路基土体冻胀率统计结果做灰色关联度计算,以冻胀率为参考序列,以因素 A(温度)、因素 B(含盐量)、因素 C(压实度)和因素 D(含水率)作为比较序列,首先用式(3)做标准化处理,然后用式(4)计算接近度,用式(5)计算关联系数,最后用式(6)计算关联度。

$$\widetilde{X}_i = x_i(k)/x_i(1) \tag{3}$$

$$\Delta_i(k) = |x_i(k) - x_0(k)| \tag{4}$$

$$\xi_i(k) = (\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max})/(\Delta_i(k) + \rho\Delta_{\max}) \tag{5}$$

式中:$\Delta_{\min} = 0$, $\Delta_{\max} = 3.920\ 5$。

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \xi_i(k) \tag{6}$$

计算得到关联系数分别为 $\gamma_1 = 0.700\ 1$, $\gamma_2 = 0.698\ 6$, $\gamma_3 = 0.589\ 5$, $\gamma_4 = 0.594\ 6$。根据关联度分析原理,关联系数越大,影响程度越高,因此影响冻胀的因素 γ_1 温度(A)、γ_2 含盐量(B)、γ_3 压实度(C)、γ_4 含水率(D)的主次排序是 A > B > D > C,即温度和含盐量的影响程度最大,含水率次之,压实度影响程度最小,这与前面正交试验结果分析是一致的。

4 结 语

(1)利用正交试验设计的方法,进行温度、含盐量、水分、压实度 4 个因素对冻胀影响的室内冻胀试验,对冻胀试验数据进行极差分析和方差分析,得到影响冻胀的因素主次排序为温度 > 含盐量 > 含水率 > 压实度,因素之间的交互作用影响较小,可以忽略。温度和含盐量对冻胀影响非常显著,含水率对冻胀有显著影响,压实度和因素之间的交互作用对冻胀没有显著影响。

(2)灰色关联度分析结果表明,虽然温度对冻胀的影响最大,但其他因素关联度较接近,在进行实际冻胀问题分析时,应综合考虑温度、含盐量、水分和压实度对冻胀的影响,灰色关联分析方法所得的结果与正交试验中的观测规律一致。

(3)通过两组单因素验证试验可以得出,温度和含盐量是影响冻胀的主要因素,随着温度的降低和含盐量的增加,路基土体冻胀发展快速,但是当温度降低且含盐量增加到一定程度之后,冻胀发展趋于稳定。

(4)在整治青藏铁路环青海湖段路基冻害时,可从控制温度、含盐量、水分 3 个方面着手,采用热棒等增加路基土体温度、注盐法等增加路基土体含盐量、增加排水设施等降低路基土体的水分,以上方法都可以有效减轻季节性冻土区路基冻害。

参　考　文　献:

[1] 葛建锐，郑鑫，刘少东，等. 东北季冻区灌渠渠底土冻胀力影响因素分析[J]. 人民黄河，2015，37(8)：145-148.（GE Jianrui，ZHENG Xin，LIU Shaodong，et al. Analysis of impacting factors of frost heaving force of soil under canal in seasonal frost region in Northeast China[J]. Yellow River，2015，37(8)：145-148.（in Chinese））

[2] 王青志，刘建坤，田亚护，等. 寒区级配碎石冻胀正交试验研究[J]. 岩土力学，2015，36(10)：2825-2830，2836.（WANG Qingzhi，LIU Jiankun，TIAN Yahu，et al. A study of orthogonal design tests on frost-heaving characteristics of graded crushed rock[J]. Rock and Soil Mechanics，2015，36(10)：2825-2830，2836.（in Chinese））

[3] 张远芳，慈军，肖俊. 灰色关联优势分析在冻土中的应用[J]. 水利与建筑工程学报，2006，4(1)：12-14.（ZHANG Yuanfang，CI Jun，XIAO Jun. Application of grey link advantage analysis in frozen soil[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering，2006，4(1)：12-14.（in Chinese））

[4] 鲍俊安，杨平，陈成. 基于灰色关联优势分析冻胀融沉影响因素研究[J]. 路基工程，2012(1)：21-23.（BAO Jun'an，YANG Ping，CHEN Cheng. Research on factors influencing frost heaving and thaw collapsing based on grey relational preponderance analysis[J]. Subgrade Engineering，2012(1)：21-23.（in Chinese））

[5] 王社. 影响路面基层强度因素的灰关联度分析[J]. 华东公路，1996(1)：28-30.（WANG She. Gray correlative degree analysis of factors affecting pavement strength[J]. East China Highway，1996(1)：28-30.（in Chinese））

[6] 张莎莎，王永威，杨晓华，等. 砂类亚硫酸盐渍土盐胀率预报模型[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2016，36(6)：10-16.（ZHANG Shasha，WANG Yongwei，YANG Xiaohua，et al. Salt expansion rate prediction model of sand sulfite saline soil[J]. Journal of Chang'an University (Nature Science Edition)，2016，36(6)：10-16.（in Chinese））

[7] 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)：39-42.（GAO Jiangping，WU Jiahui. 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)：39-42.（in Chinese））

[8] 万旭升，廖孟柯，杜立群. 温度对硫酸钠盐渍土盐胀影响的试验研究[J]. 公路交通科技，2016，33(8)：44-50.（WAN Xusheng，LIAO Mengke，DU Liqun. Experimental study on influence of temperature on salt expansion of sodium sulfate saline soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2016，33(8)：44-50.（in Chinese））

[9] 鲍硕超. 吉林西部季冻区盐渍土冻胀特性及三维颗粒流数值模拟[D]. 吉林：吉林大学，2015.（BAO Shuochao. Frost heaving characteristics and three-dimensional particle flow numerical simulation of saline soil in seasonal frozen area of Western Jilin[D]. Jilin：Jilin University，2015.（in Chinese））

[10] 包卫星，杨晓华，谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循试验研究[J]. 岩土工程学报，2006，28(11)：1991-1995.（BAO Weixing，YANG Xiaohua，XIE Yongli. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2006，28(11)：1991-1995.（in Chinese））

[11] 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 Qiangkang，WU Aihong，LI Ning. Experimental researches and analysis of expansion characteristics of sulphate salty soil[J]. Journal of Xi'an University of Technology，2009，25(3)：283-287.（in Chinese））

[12] 武立波，祁伟，牛富俊，等. 我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J]. 冰川冻土，2015，37(5)：1283-1293.（WU Libo，QI Wei，NIU Fujun，et al. A review of studies on roadbed frozen damage and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，2015，37(5)：1283-1293.（in Chinese））

[13] 张玉芝，杜彦良，孙宝臣，等. 季节性冻土地区高速铁路路基冻融变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(12)：2546-2553.（ZHANG Yuzhi，DU Yanliang，SUN Baochen，et al. Study on the freezing and thawing deformation law of high speed railway subgrade in seasonally frozen soil area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(12)：2546-2553.（in Chinese））

[14] 赵安平, 王清, 车茜, 等. 季冻区土冻胀量影响因素的灰关联度分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 28-30. (ZHAO Anping, WANG Qing, CHE Qian, et al. Grey relation analysis on frost heaving susceptibility of soil in seasonal frost regions[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2007, 24(4): 28-30. (in Chinese))

Comprehensive analysis on frost heave factors of subgrade soil in seasonally frozen ground region

GONG Lili[1], LIU Deren[1], YANG Nan[2], WANG Yuewu[2], ZHANG Yanjie[1]

(1. *School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Xining Railway Section of Qinghai Tibet Railway Company, Xining* 810006, *China*)

Abstract: Aiming at the roadbed frost damage of the seasonal frozen soil area around the Qinghai Lake section of Qinghai Tibet Railway, the typical distributed silty clay is collected focusing attention on the four factors: temperature, moisture, salinity, and compaction so as to conduct the indoor frost heave orthogonal test. The frost heave rates of subgrade soil under different temperatures have been tested, and the gray correlation degree analysis model is established to carry out the range analysis and variance analysis of orthogonal experiment. Then the influence of various factors on the frost heave is analyzed. The results show that the orthogonal test analysis and gray correlation analysis have the same law, and that the factors affecting the frost heaving are mainly temperature, salt content, water content, and compaction. The interaction between the factors is negligibly tiny, but the effect of temperature, salinity and water content on the frost heave is very significant. On the contrary, the interaction between compaction and factors has no significant effect on frost heave.

Key words: railway subgrade; roadbed frost damage; frost heave; orthogonal test; gray correlation degree