

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0039  
GAO Juan, LIAO Mengke, CHANG Dan, et al. Sensitivity analysis of the factors affecting the volumetric deformation of frozen sandy soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 346–354. [高娟, 廖孟柯, 常丹, 等. 冻结砂土体积变形影响因素的敏感性分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 346–354.]

# 冻结砂土体积变形影响因素的敏感性分析

高娟<sup>1,2</sup>, 廖孟柯<sup>3</sup>, 常丹<sup>1,4</sup>, 白瑞强<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国网新疆电力公司 经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 北京交通大学, 北京 100044)

**摘要:** 为了分析三轴试验中冻土体积变形影响因素的敏感性, 选定包括内因和外因在内的6种影响因素, 选用青海省德令哈的砂土按照正交试验方案进行常规三轴试验, 并采用灰色关联分析法对试验结果进行分析, 给出各影响因素的敏感性排序。结果表明, 在选定的6种影响因素中, 含水率、加载速率及温度的敏感性超过70%, 需重点考虑。在较小含水率条件下, 冻结砂土先体缩再体胀, 且应力峰值点和应变峰值点所对应的轴向应变基本一致, 而在饱和条件下仅发生体积膨胀。加载速率对冻土的影响主要表现为对其力学特性和破坏形态的改变, 随着加载速率的增加冻土的体缩量、切线模量和峰值强度增加, 但峰值应变却表现为减小趋势, 冻结砂土性质趋近脆性。土样温度降低, 土颗粒间的黏结力增加, 孔隙压力转变为有效应力, 从而导致冻结砂土的强度增加、体积膨胀量增加。分析结果可为相关试验及工程优化设计提供一定的参考。

**关键词:** 冻结砂土; 体积变形; 灰色关联分析; 敏感性分析

**中图分类号:** TU411.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2018)02-0346-09

## 0 引言

我国盐渍土分布极为广泛, 其面积为  $1.908 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 1.99%<sup>[1]</sup>。而这些盐渍土的主要分布区域多为北方及西北的季节冻土和多年冻土区<sup>[2]</sup>。冻土在外荷载作用下将随荷载作用时间、大小及性质的不同而产生不同形式的变形, 冻结盐渍土作为一种土粒骨架、冰、未冻水、气体以及盐晶体组成的多组分、分散相体系, 在受力过程中体积应变随载荷的变化会出现“体缩”和“体胀”现象, 从体积变形的量级上来讲, 无论体积收缩量还是体积膨胀量, 均是一个不可忽略的因素<sup>[3-7]</sup>。研究冻土的变形特征不仅可以丰富和发展冻土力学理论, 而且对准确预报工程中冻土地基及冻土结构物的稳定性具有十分重要的意义, 因此, 关于冻土变形特征的研究一直是广大科技人员致力解决的重要问题之一<sup>[8]</sup>。

由于冻土的变形与围压、温度、作用时间、加载速率等因素密切相关, 国内大量学者从不同的角度开展了各种研究。早在1940年, 崔托维奇<sup>[3]</sup>就研究了冻土的弹性变形特性, 他指出冻土的弹性变形取决于矿物颗粒及冰的结晶晶格的纯可逆变化、未冻水薄膜的弹性等因素。Parameswaran 等<sup>[9-10]</sup>研究了-10℃的冻结渥太华砂在不同围压下的初始切线模量, 认为冻土中冰的压融对冻土的变形存在一定影响。Bragg 等<sup>[11]</sup>、Haynes 等<sup>[12-13]</sup>、朱元林等<sup>[14]</sup>、何平等<sup>[15]</sup>分别应用单轴压缩试验考察了温度、加载速率、土质对冻土的变形特征的影响。Zhu 等<sup>[16]</sup>对冻结粉土试样进行了不同温度、应变速率和干密度下的单轴压缩试验, 分析了温度和应变速率对冻土变形的影响。马巍等<sup>[17-18]</sup>、孙星亮等<sup>[19]</sup>也分别通过常规三轴压缩试验研究了不同土质、围压、加载速率条件下冻土的变形特性。徐湘田等<sup>[20]</sup>通过三轴循环加卸载试验对冻土的体积变

收稿日期: 2018-01-01; 修订日期: 2018-03-02  
基金项目: 国家自然科学基金项目(41230630; 41701068); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-DQC015)资助  
作者简介: 高娟(1988-), 女, 甘肃静宁人, 2014年在中国矿业大学(徐州)获硕士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事冻土力学研究。E-mail: gaojuan2611261@lzb.ac.cn.

形进行了分析。Zhang 等<sup>[21]</sup>、Lai 等<sup>[22]</sup>通过常规三轴压缩试验研究了冻结粉土的变形特性，发现在初始弹性阶段，轴向应变小于 1% 时，应力与应变近似呈线性关系；在峰前塑性变形阶段，应力与应变呈非线性变化特征，在出现峰值应力前，应力随应变的增加而增大；在峰后软化阶段，应力随着应变的增加而减小。

目前对于冻土变形及其影响因素的研究主要基于单轴或常规三轴室内试验，且试验多按照排除法进行设计，即在探究多个因素对试验的影响时，仅改变一个因素，而保持其他因素不变，分析中虽给出了一些相关的经验公式，但各种因素对冻土变形的贡献程度以及各个影响因素之间的敏感性大小关系并没有直观呈现。鉴于此，本文运用正交试验方法进行多组不同影响因素正交下的冻结砂土常规三轴试验，并采用灰色关联分析法分析试验结果，对影响冻结砂土变形特征的 6 个因素(干密度、含水率、温度、围压、固结时间、加载速率)进行敏感性分析，从而评定出各个因素对冻结德令哈砂土变形

影响的权重，结果可为开展冻土工程室内试验提供参考依据。

1 常规三轴试验

1.1 试验方案

常规三轴试验体积应变影响因素主要包括土样本身的因素和外部因素两类，本文选取 6 种因素进行分析，三轴试验采用正交试验方法进行设计，即按 6 因素 3 水平安排试验，6 种因素分别为：干密度、含水率、温度、围压、固结时间、加载速率。其中，干密度分别为  $1.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.85\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，含水率为 11%、12%、15.99% (饱和)，温度为  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，围压为 1 MPa、5 MPa、8 MPa，固结时间为 1 min、5 min、30 min，加载速率为  $0.005\text{ min}^{-1}$ 、 $0.010\text{ min}^{-1}$ 、 $0.020\text{ min}^{-1}$ 。

1.2 试样制备

所用土样为取自青海省德令哈的砂土，其粒径级配分布如表 1 所示。通过土样溶液的离子分析可

表 1 土样粒径级配分布  
Table 1 Particles gradation of the specimen

粒径范围/mm	≥0.25	0.1 ~ <0.25	0.075 ~ <0.1	0.01 ~ <0.075	0.005 ~ <0.01	<0.005
质量占比/%	8.73	29.62	20.35	31.52	4.68	5.10

知土样中主要盐分为 NaCl，含量(质量分数)为 1.77%，其他盐分( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 等)总含量约为 0.14%。土样制备过程依据《冻土工程地质勘察规范》<sup>[23]</sup>，将所采集的土样过 2 mm 筛后加蒸馏水配制成相应含水率的散体土，在限制蒸发的条件下保持约 6 h，使水分在土体中充分均匀，然后按照其编号对应的干密度进行计算，称取相应质量的土体装入圆柱形模具中，在制样机上制成直径为 61.8 mm、高度为 125 mm 的圆柱形试样。对于要求饱和的试样，进一步抽气饱和，完成后连模具一起放入制冷箱，在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境中迅速单向冻结 48 h 后将冻结土样脱模。脱模后在试样两端垫上环氧树脂垫片并套上乳胶套，随后放入恒温箱内在编号对应的试验温度下恒温 24 h，使试样内部温度均匀。取抽气饱和后的土样置于低温环境中，让土样与环境间进行缓慢的热交换，定时测定土温并绘制土温随时间变化曲线(图 1)，可得到其冻结温度为  $-8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

采用的试验设备是由 MTS-810 材料试验机改造而成的低温三轴仪，如图 2 所示。该低温三轴仪能在常围压下的三轴试验中测算冻土试样的最大主

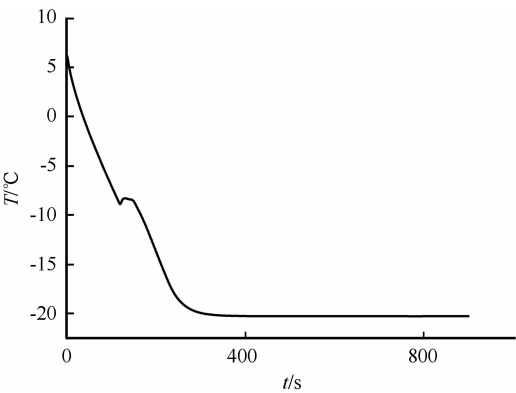


图 1 土体温度随时间变化曲线  
Fig. 1 Curve of soil temperature changing with time

应力以及体积应变。本文试验方式为常规三轴剪切试验，加载方式为应变控制。

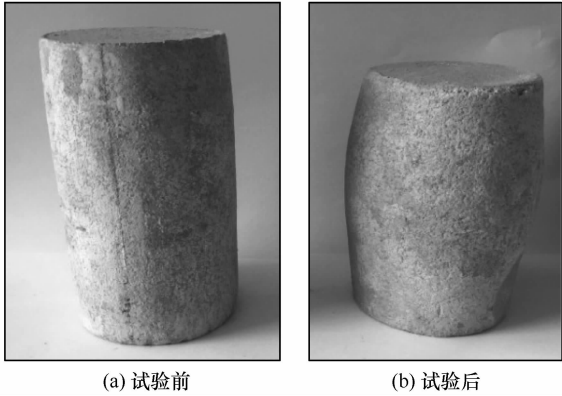
1.3 试验结果

图 3 为试验前后试样对比。可以看出，三轴剪切试验之后，试样由圆柱体变为“鼓状”，沿着试样高度方向上各个截面面积发生改变，其中试样中间部位面积最大。通过常规三轴试验，得到各试样对应的体积应变随轴向应变的变化规律，如图 4 所



图2 MTS-810 低温三轴试验系统

Fig. 2 MTS-810 triaxial test system for frozen soil



(a) 试验前

(b) 试验后

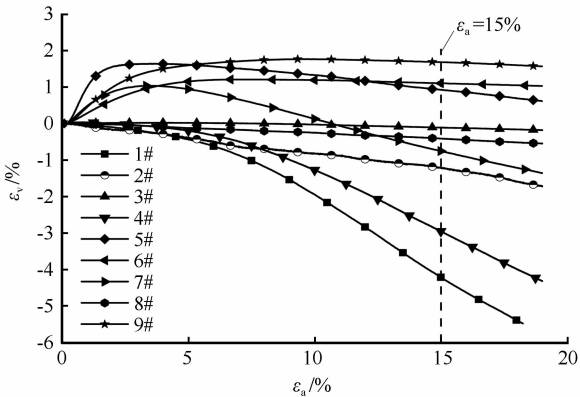
图3 试验前后试样对比

Fig. 3 Specimen's shape before (a) and after (b) experiment

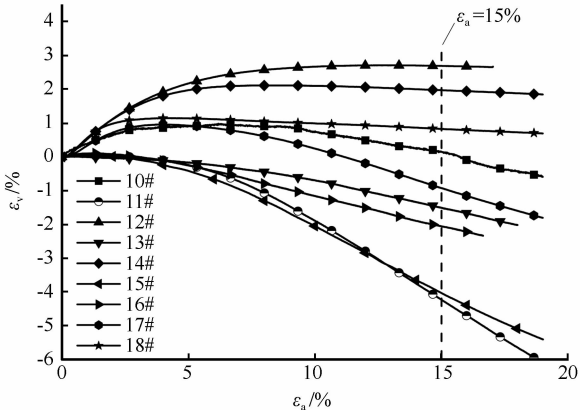
示。可以看出，不同条件下试验测得的冻结砂土体积应变存在正值也存在负值，分别对应土样的体积收缩和膨胀，且随着轴向应变的增加，不同条件下体积应变可能先增后减，也可能一直保持减小趋势，因此基于正交试验方法得到的试验结果无法直观地反映出各个因素对冻结砂土体积应变的影响大小。为了便于分析，取轴向应变为15%时对应的体积应变的绝对值作为参考序列，采用灰色关联分析法研究上述各因素对于冻结砂土体积变形的敏感性。各试样的影响因素、水平分配、相应的体积应变及其绝对值如表2所示。

2 基于灰色关联分析法的敏感性分析

灰色关联分析法本质是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密，曲线越接近，相应序列之间的关联度就越大，反之就越小。因此采用灰色关联分析法可以对影响某个复杂系统的诸多因素进行定量分析，给出各个因素的关联度，得



(a) 1#~9#试样的试验结果



(b) 10#~18#试样的试验结果

图4 体积应变随轴向应变的变化规律

Fig. 4 Relationships between axial strain and volumetric strain for Specimen 1# to Specimen 9# (a) and for Specimen 10# to Specimen 18# (b)

出哪些为主要因素，哪些为次要因素<sup>[24]</sup>。其具体思路是将评价指标原始观测数据进行无量纲化处理，计算关联系数、关联度，最后根据关联度的大小对待评指标进行排序。

2.1 序列确定及无量纲化

在对试验结果进行灰色关联分析之前，需要确定能够反映系统行为特征的参考序列以及影响系统行为的比较序列，本文取轴向应变达到15%时对应的体积应变的绝对值作为参考序列，即

$$Y = \{Y(k), k = 1, 2, \dots, n\}$$
 (1)

取表2中给出的各因素构成比较序列，即

$$X_i = \{X_i(k), k = 1, 2, \dots, n\}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$
 (2)

式中： $k$ 为水平数； $i$ 为因素序列数；本文中 $n = 18$ ， $m = 6$ 。

由于选取的各个因素的物理意义不尽相同，数据的量纲也不一致，这不利于各个因素之间的比较，因此在进行灰色关联分析时都需要对参考序列和比较序列进行无量纲化处理。通常采用的方法包

表2 体积变形影响因素的水平分配及试验结果

Table 2 Level distribution of factors affecting volumetric strain and corresponding experimental results of the 18 specimens								
试样编号	影响因素						试验结果	
	干密度 $\rho_d$ /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水率 $w$ /%	温度 $T$ / $^{\circ}\text{C}$	围压 $\sigma_3$ /MPa	固结时间 $t$ /min	加载速率 $\dot{\varepsilon}$ / $\text{min}^{-1}$	$\varepsilon_v$ /%	$ \varepsilon_v $ /%
1#	1.80	11.00	-6	1	5	0.020	-4.228	4.228
2#	1.85	12.00	-10	5	1	0.010	-1.220	1.220
3#	1.90	15.99	-15	8	30	0.005	-0.112	0.112
4#	1.80	15.99	-15	1	30	0.010	-2.659	2.659
5#	1.85	11.00	-6	5	5	0.005	0.926	0.926
6#	1.90	12.00	-10	8	1	0.020	1.103	1.103
7#	1.80	11.00	-10	1	1	0.005	-0.756	0.756
8#	1.85	15.99	-15	8	30	0.010	-0.413	0.413
9#	1.90	12.00	-6	5	5	0.020	1.682	1.682
10#	1.80	12.00	-10	8	1	0.010	0.150	0.150
11#	1.85	15.99	-15	1	30	0.020	-4.213	4.213
12#	1.90	11.00	-6	5	5	0.005	2.698	2.698
13#	1.80	12.00	-10	8	1	0.005	-1.510	1.510
14#	1.90	11.00	-15	5	30	0.010	2.754	2.754
15#	1.85	15.99	-6	1	5	0.020	-4.040	4.040
16#	1.80	15.99	-10	1	30	0.010	-2.059	2.095
17#	1.85	12.00	-15	5	1	0.005	-0.928	0.928
18#	1.90	11.00	-6	8	5	0.020	0.830	0.830
平均值							-0.668	1.795

括均值化、初值化、倒数化等<sup>[25]</sup>，本文采用均值化对冻结砂土体积应变的影响因素进行分析，给出初始化后的参考序列  $y(k)$  和初始化后的比较序列  $x_i(k)$ 。即

$$y(k) = \frac{Y(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

$$x_i(k) = \frac{X_i(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \tag{4}$$

2.2 灰色关联度计算

依据试验结果求得绝对差序列，即  $\Delta_i(k) = |y(k) - x_i(k)|$ ， $k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$  (5)  
同时求得  $\Delta_i(k)$  的最大值  $M$  和最小值  $m$ ，则  $y(k)$  和  $x_i(k)$  的灰色关联系数可表示为

$$\xi_i(k) = \frac{m + \rho M}{\Delta_i(k) + \rho M} \tag{6}$$

式中： $M = \max_i \max_k \Delta_i(k)$ ； $m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$ ； $\rho$  为分辨系数，取值范围为(0, 1)，本文考虑正交试验均匀分

散的特点，取  $\rho$  为 0.5 进行计算<sup>[26]</sup>。比较数列  $X_i$  对参考数列  $Y$  的灰色关联度  $r_i$  可表示为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{7}$$

$r_i$  值越接近 1，说明相关性越好。

2.3 影响因素敏感性分析

本文中  $i = 1$  对应干密度， $i = 2$  对应含水率， $i = 3$  对应温度， $i = 4$  对应围压， $i = 5$  对应固结时间， $i = 6$  对应加载速率。

对表 2 进行无量纲处理后，由式(3)~(6)求得各序列关联系数，并采用式(7)求得各序列的关联度，结果如表 3 所示。

3 主要影响因素对体积变形的影响机理

由表 3 可知，本文所选的 6 种影响因素的关联度均大于 0.5(50%)，这说明上述因素对冻结砂土体积应变影响较大。依据所求关联度大小，可对 6 种因素敏感性大小进行排序：含水率 > 加载速率 > 温度 > 干密度 > 固结时间 > 围压，其中含水率、加

表 3 各因素关联系数及关联度  
Table 3 Relation coefficient and relation degree of various factors of the 18 specimens

试样编号	$\xi_1(k)$	$\xi_2(k)$	$\xi_3(k)$	$\xi_4(k)$	$\xi_5(k)$	$\xi_6(k)$
1#	0.468 718	0.446 961	0.407 280	0.362 864	0.386 126	0.655 584
2#	0.791 938	0.833 461	0.808 890	0.756 819	0.671 640	0.872 955
3#	0.558 300	0.510 748	0.467 410	0.424 641	0.333 392	0.769 100
4#	0.705 922	0.829 544	0.976 615	0.490 446	0.544 743	0.661 548
5#	0.715 791	0.786 764	0.949 625	0.686 978	0.924 968	0.933 400
6#	0.747 186	0.797 909	0.775 362	0.525 726	0.696 653	0.525 726
7#	0.688 440	0.741 453	0.690 480	0.855 094	0.783 155	0.994 065
8#	0.612 952	0.549 334	0.499 520	0.450 979	0.349 413	0.660 388
9#	0.931 269	0.989 194	0.773 979	0.900 716	0.700 996	0.610 656
10#	0.578 220	0.592 168	0.579 658	0.427 795	1.000 000	0.611 835
11#	0.475 183	0.522 052	0.576 708	0.363 769	0.888 344	0.658 543
12#	0.719 391	0.650 084	0.569 397	0.738 749	0.528 888	0.531 634
13#	0.902 486	0.936 932	0.905 995	0.582 693	0.616 752	0.747 280
14#	0.706 389	0.639 448	0.936 899	0.725 044	0.557 936	0.643 082
15#	0.493 728	0.544 522	0.422 045	0.374 539	0.399 372	0.694 706
16#	0.862 894	0.950 693	0.859 711	0.561 399	0.477 687	0.797 506
17#	0.716 259	0.750 056	0.566 055	0.687 409	0.737 749	0.932 604
18#	0.683 485	0.760 518	0.911 652	0.493 372	0.964 083	0.493 372
平均值(关联度)	0.686 586	0.712 880	0.704 293	0.578 280	0.642 328	0.710 777

载速率、温度的关联度均超过 0.7(70%)，说明这 3 个因素是影响冻结砂土体积应变的重要影响因素，在诸多影响因素不能全部满足试验条件时，应首先确保敏感性较大因素的误差，从而减小试验结果误差。

基于以上结果优化试验方案，重点分析关联度超过 70% 的 3 个因素(含水率、加载速率、温度)对土样强度及体积变形的影响，并分析其机理。

3.1 含水率

冻结砂土中含水率的大小主要反映了土颗粒与冰结合的程度以及孔隙中盐溶液的浓度等。图 5 展示了围压为 5 MPa，温度为 -15 ℃，含水率分别为 11%、12%、13% 及饱和情况(15.99%)下冻结砂土体积应变随轴向应变的变化规律；图 6 展示了对应条件下的应力-应变曲线。可以看出，在较小含水率下，冻结砂土在加载初期出现体缩，应力-应变曲线近似直线，随着轴向应变增加，体缩量达到峰值之后发生体积膨胀，同样应力-应变曲线达到峰值之后发生应变软化，即应力峰值点和应变峰值点所对应的轴向应变基本一致，应变曲线上的体缩

段对应于应力-应变曲线上的应变软化段；含水率越小，应力峰值和体缩峰值越高。而在饱和条件下，三轴加载过程中只发生体胀，且应力-应变曲线表现为应变硬化。因此，随着含水率的变化，冻结砂土应力和体积变形规律完全不同，也就是说含水率对冻结砂土的力学性能影响显著，在试验和工程施工中需重点考虑。

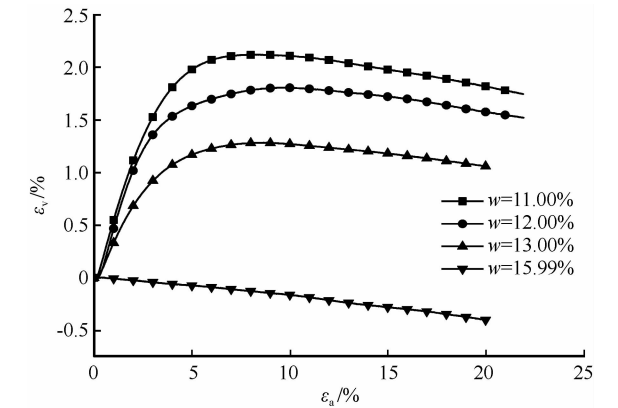


图 5 不同含水率下冻土体积应变随轴向应变的变化  
Fig. 5 Change of volumetric strain with axial strain under water contents of 11%, 12%, 13% and 15.99%

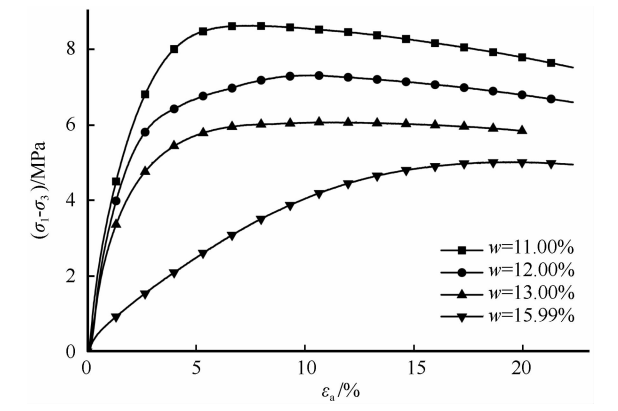


图6 不同含水率下应力-应变关系曲线

Fig.6 Stress-strain curves of frozen sandy soil under water contents of 11%, 12%, 13% and 15.99%

3.2 加载速率

本文对冻结德令哈砂土进行了围压为 1 MPa，温度为 -15 ℃，加载速率分别为 0.005 min<sup>-1</sup>、0.010 min<sup>-1</sup>、0.015 min<sup>-1</sup>、0.020 min<sup>-1</sup>的常规三轴剪切试验，得到不同加载速率下冻土体积应变随轴向应变的变化规律，如图 7 所示。可以看出，随着加载速率的增加冻土的体胀量逐渐增加，且随着轴向应变增加加载速率影响越来越明显。图 8 为不同加载速率下应力-应变关系曲线。可以看出，冻结砂土在变形初期，应力-应变关系呈线性关系。将此段斜率定义为其切线模量，表 4 为不同加载速率下的切线模量、峰值强度及峰值应变。通过分析可知，随着加载速率的增加，切线模量和峰值强度也随之增加，但峰值应变却随之减小，土样到达峰值前的非弹性变形量随着加载速率的增加而减小。这一趋势说明随着加载速率的增加，冻结砂土越显

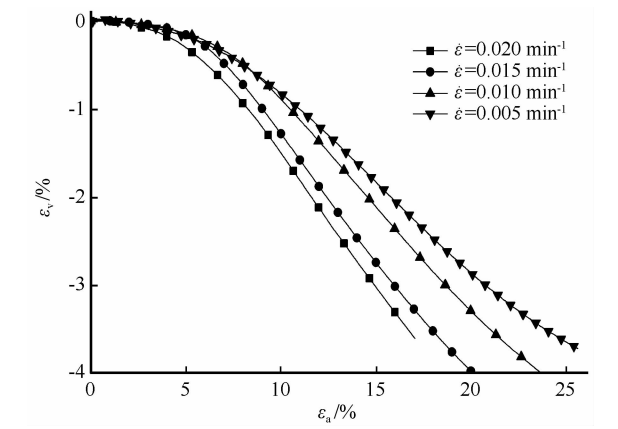


图7 不同加载速率下冻土体积应变随轴向应变的变化

Fig.7 Change of volumetric strain with axial strain under loading rates of 0.005 min<sup>-1</sup>, 0.010 min<sup>-1</sup>, 0.015 min<sup>-1</sup> and 0.020 min<sup>-1</sup>

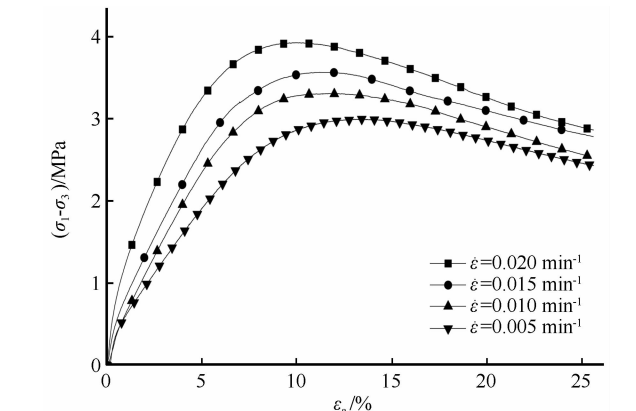


图8 不同加载速率下应力-应变关系曲线

Fig.8 Stress-strain curves of frozen sandy soil under loading rates of 0.005 min<sup>-1</sup>, 0.010 min<sup>-1</sup>, 0.015 min<sup>-1</sup> and 0.020 min<sup>-1</sup>

表4 冻结砂土在不同加载速率下的强度及变形指标

Table 4 Strength and deformation indexes of frozen sandy soil under different loading rates

加载速率 $\dot{\epsilon}/\text{min}^{-1}$	切线模量/MPa	峰值强度/MPa	峰值应变/%
0.005	46.55	3.00	12.879
0.010	55.11	3.31	11.679
0.015	72.36	3.58	10.968
0.020	132.40	3.92	9.509

脆性，此类冻结砂土是应变速率敏感性材料，随着加载速率的增加冻结砂土会表现出不同的力学特性和破坏形态。

3.3 温度

如图 9 所示，本文对冻结砂土进行了围压为 1 MPa，加载速率为 0.015 min<sup>-1</sup>，温度分别为 -6、-10、-15 ℃情况下的常规三轴剪切试验，得到不

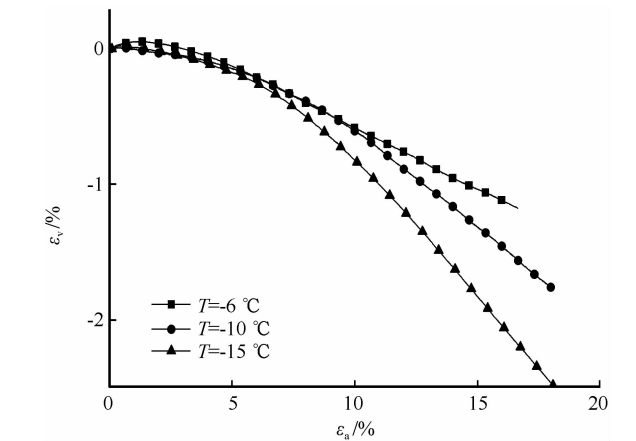


图9 不同温度下冻土体积应变随轴向应变的变化

Fig.9 Change of volumetric strain with axial strain under -6, -10 and -15 ℃

同温度下冻土体积应变随轴向应变的变化规律；图 10 为与之对应的应力-应变关系曲线。对照二图可以看出，同一围压下，随着温度的降低，冻结砂土的强度增加、体积膨胀量增加，且随着轴向应变的增加，温度对体积变形的影响越来越明显。这是由于温度主要通过影响冻土中冰和液态水的动态平衡来影响冻土的力学性质<sup>[27]</sup>。当冻土中的孔隙水随着温度的降低而从液态变成固态冰时，增加了颗粒间的黏结力，此过程中孔隙水压力过渡成为有效应力，从而导致冻土强度提高。

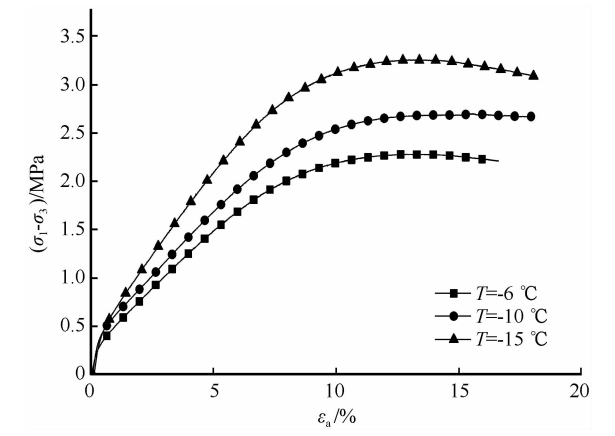


图 10 不同温度下应力-应变关系曲线  
Fig. 10 Stress-strain curves of frozen sandy soil under -6, -10 and -15 °C

4 结论

冻结砂土作为复杂的多组分、分散相体系，无论体积收缩量还是膨胀量，均是冻土力学研究中不可忽略的因素。为分析三轴试验中冻土体积变形影响因素的敏感性，选定包括内部因素和外部因素在内的 6 种因素，按照正交试验方案进行常规三轴试验，并采用灰色关联分析法对试验结果进行分析，给出各影响因素的敏感性排序。重点分析了关联度超过 70% 的 3 个因素对冻结砂土体积应变，以及应力-应变关系的影响，得到以下结论：

- (1) 6 种影响因素的关联度均超过 50%，均属于比较重要的影响因素，为保证试验结果准确可靠，在以后的冻土试验过程中应严格控制。按照关联度大小对 6 种因素敏感性进行排序为：含水率 > 加载速率 > 温度 > 干密度 > 固结时间 > 围压，其中含水率、温度及加载速率 3 种因素的敏感性均超过 70%，因此在试验及相应区域施工过程中应首先保证此 3 种因素的误差范围。
- (2) 冻结砂土中含水率的大小主要反映了土颗

粒与冰结合的程度以及孔隙中盐溶液的浓度等。在较小含水率下，冻结砂土在加载初期出现近似线性的体缩，随着轴向应变增加，体缩量达到峰值之后发生体积膨胀，且应力峰值点和应变峰值点所对应的轴向应变基本一致，含水率越小，应力峰值和体缩峰值越高；而在饱和条件下，三轴加载过程中只发生体胀，应力-应变曲线表现为应变硬化。

(3) 加载速率对冻土的影响主要表现为改变其力学特性和破坏形态。随着加载速率的增加冻土的体缩量逐渐增大，切线模量和峰值强度也随之增加，但峰值应变却表现为减小趋势，因此随着加载速率的增加，冻结砂土性质趋近脆性。

(4) 温度主要通过影响冻土中冰和液态水的动态平衡来影响冻土的力学性质。随着温度降低，冻结砂土的强度增加、体积膨胀量增加，且随着轴向应变增加温度对体积变形的影响越来越明显。这是由于随着温度降低土样中孔隙水从液态变成固态冰，增加了颗粒间的黏结力，将孔隙水压力过渡成为有效应力，从而导致冻土强度提高。

参考文献 (References) :

[1] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin, et al. Mechanisms of frost heaving and salt expansion of soils[J]. Beijing: Science Press, 1995. [徐敦祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体的冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]

[2] Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei. Salty soil in China [M]. Beijing: Science Press, 1993. [王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.]

[3] Tsytoovich N A. The mechanics of frozen ground[M]. Zhang Changqing, Zhu Yuanlin, trans. Beijing: Science Press, 1985. [崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985.]

[4] Chen Xiaobai, Liu Jiankun, Liu Hongxu, et al. Frost action of soil and foundation engineering [M]. Beijing: Science Press, 2006. [陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]

[5] Ma Wei, Zhu Yuanlin, Ma Wenting, et al. Analyses of deformation in frozen clayey soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 43 - 47. [马巍, 朱元林, 马文婷, 等. 冻结粘性土的变形分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 43 - 47.]

[6] Ma Wei, Wang Dayan. Mechanics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2014. [马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]

[7] Zhang Xiyin, Zhang Mingyi, Lu Jianguo, et al. Study of the freezing and thawing features of soil: current situation and outlook[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1644 - 1657. [张熙胤, 张明义, 路建国, 等. 土体冻融特征研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1644 - 1657.]

[8] Yin Nan, Li Shuangyang, Shi Yehui, et al. Discrete analysis of cemented behavior of frozen loess under different confining pressure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4):

- 858–867. [尹楠, 李双洋, 施焯辉, 等. 不同围压下冻结黄土胶结行为的离散元分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 858–867.]
- [9] Parameswaran V R. Deformation behaviour and strength of frozen sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(1): 74–88.
- [10] Parameswaran V R, Jones S J. Triaxial testing of frozen sand[J]. Journal of Glaciology, 1981, 27(95): 147–155.
- [11] Bragg R A, Andersland O B. Strain rate, temperature, and sample size effects on compression and tensile properties of frozen soil[J]. Engineering Geology, 1981, 18: 35–46.
- [12] Haynes F D, Karalius J A. Effect of temperature on the strength of frozen silt; CRREL report 77-3[R]. Hanover, NH, USA; US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1977.
- [13] Haynes F D, Karalius J A, Kalafut J. Strain rate effect on the strength of frozen silt; CRREL research report 350[R]. Hanover, NH, USA; US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1975.
- [14] Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi. Elastic and compressive deformation of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 29–39. [朱元林, 张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29–39.]
- [15] He Ping, Zhu Yuanlin, Chang Xiaoxiao. Deformability and Poisson's ratio of frozen soil[J]. Underground Space, 1999, 19(5): 504–507. [何平, 朱元林, 常小晓. 冻土的变形性能和泊松比[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 504–507.]
- [16] Zhu Yuanlin, Carbee D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Regions Science and Technology, 1984, 9: 3–15.
- [17] Ma Wei, Wu Ziwang, Chang Xiaoxiao, et al. Strength characteristics of frozen sandy soil under high confining pressure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(3): 268–272. [马巍, 吴紫汪, 常小晓, 等. 高围压下冻结砂土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 268–272.]
- [18] Ma Wei, Wu Ziwang, Chang Xiaoxiao, et al. The influence of shear stress and average normal stress on the deformation of frozen soil[J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(1): 77–81. [马巍, 吴紫汪, 常小晓, 等. 剪应力强度和平均法向应力对冻土变形的相互影响[J]. 自然科学进展, 1998, 8(1): 77–81.]
- [19] Sun Xingliang, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Triaxial strength and deformation properties of frozen silty clay under low confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1623–1627. [孙星亮, 汪稔, 胡明鉴, 等. 低围压下冻结粉质粘土的三轴强度及变形分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1623–1627.]
- [20] Xu Xiangtian, Lai Yuanming, Zhou Zhiwei, et al. Laboratory investigation on the deformation and damage characteristics of frozen loess under triaxial cyclic and monotonic loading conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1185–1191. [徐湘田, 赖远明, 周志伟, 等. 循环与单调加载作用下冻结黄土的变形与损伤特性[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1185–1191.]
- [21] Zhang Shujuan, Lai Yuanming, Sun Zhizhong, et al. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 47: 263–270.
- [22] Lai Yuanming, Yang Yugui, Chang Xiaoxiao, et al. Strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen silt in generalized plastic mechanics[J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26: 1461–1484.
- [23] Code for engineering geological investigation of frozen ground; GB 50324–2001[S]. Beijing: China Planning Press, 2001. [冻土工程地质勘察规范: GB 50324–2001[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.]
- [24] 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. [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.]
- [25] Tan Xuerui, Deng Julong. Grey relational analysis: a new method of multi factor statistical analysis[J]. Statistical Research, 1995, 65(3): 46–48. [谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法[J]. 统计研究, 1995, 65(3): 46–48.]
- [26] Huang Daoliang, Lin Bin. Sensitivity analysis of factors affecting mechanical properties of artificial freezing soil[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(4): 63–66. [黄道良, 林斌. 人工冻土力学性能影响因素敏感性分析[J]. 力学与实践, 2012, 34(4): 63–66.]
- [27] Kang Feng, Liu Zhiwei. Study on the influence of temperature on the strength of frozen soil[J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2015(4): 22–25. [亢锋, 刘志伟. 温度对冻土强度的影响研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2015(4): 22–25.]



Sensitivity analysis of the factors affecting the volumetric deformation of frozen sandy soil

GAO Juan<sup>1,2</sup>, LIAO Mengke<sup>3</sup>, CHANG Dan<sup>1,4</sup>, BAI Ruiqiang<sup>1,2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Economic and Technological Research Institute, State Grid Electric Power of Xingjiang, Ürümqi 830002, China; 4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China )

**Abstract:** In order to analyze the sensitivity of the factors affecting volumetric strain of frozen sandy soil, six internal and external affecting factors have been selected in this paper. According to the method of orthogonal experiment design, using the sandy soil from Delingha of Qinghai Province, a number of triaxial compression tests were conducted. The results were analyzed by using the grey relational analysis ( GRA ), the magnitude of the sensitivity of all the selected influencing factors and the sequence of them was given. The results showed that the sensitivity of water content, loading rate and temperature are more than 70% , so these factors need to be considered during the later experiments. With small water content, the volumetric strain of frozen sandy soil shows contraction first and then expansion; the axial strains corresponding to the peak stress and the peak strain are basically the same, while in saturated condition, the volumetric strain only shows volume expansion; the major influence of loading rate on frozen sandy soil was the change of the mechanical properties and failure forms. With the increase of loading rate, the amount of volumetric strain decreases, tangent modulus and peak strength increase, while the peak strain shows a decreasing tendency, the properties of frozen sandy soil approach brittleness. When temperature decreases, the cohesive force between particles increases and the pore pressure transforms into effective stress, which will increase strength and volume expansion. The results of this paper will be useful for optimal design of laboratory test and engineering application.

**Key words:** frozen sandy soil; volumetric deformation; grey relational analysis ( GRA ); sensitivity analysis

( 本文编辑：武俊杰 )