DOI：10.11779/CJGE2019S1055

基于温度变化的路基盐渍土动强度参数试验研究

赵福堂，常立君*，张吾渝
（青海大学土木工程学院，青海 西宁 810016）

摘 要：基于英国GDS动三轴试验系统，对青海西部地区的路基盐渍土进行动三轴试验，在温度变化条件下探讨其破坏动应力、动黏聚力及动内摩擦角等相关参数随围压、频率的变化规律，建立了不同动载频率下破坏动应力–围压–温度关系曲面，得到了与温度相关的曲面拟合方程。试验结果表明：土–冰–盐的胶结作用对温度变化极其敏感，随着温度降低，盐渍土的破坏动应力明显增大；动黏聚力和动内摩擦角随温度的降低而增大。

关键词：盐渍土；动三轴试验；破坏动应力；动黏聚力；动内摩擦角
中图分类号：TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2019)S1－0217－04

作者简介：赵福堂(1990—)，男，硕士，主要从事寒区盐渍土力学方面的研究。E-mail: zhaofutangQH@163.com。

Experimental study on dynamic strength parameters of subgrade saline soil under temperature variation

ZHAO Fu-tang, CHANG Li-jun, ZHANG Wu-yu
（School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China）

Abstract: Based on the British GDS dynamic triaxial test instrument, the triaxial dynamic load tests on subgrade saline soil in western areas of Qinghai Province are performed. Under temperature change, the variation laws of parameters of dynamic stress of failure, dynamic cohesion and dynamic internal friction angle with confining pressure and frequency are discussed. The destructive dynamic stress-confining pressure-temperature relational surface at different dynamic load frequencies is established, and the equation for fitting the surface with temperature is obtained. The test results show that the temperature change is extremely sensitive to the cementation of soil-ice-salt, and with the decrease of temperature, the destructive dynamic stress of saline soil obviously increases. The dynamic cohesion and internal friction angle increase with the decrease of temperature.

Key words: saline soil; dynamic triaxial test; dynamic stress of failure; dynamic cohesion; dynamic internal friction angle

0 引 言

路基是路面及其上受荷的支撑体，路基土体的力学特性对整个路基和路面结构的强度和刚度影响很大，青海西部地区修筑的公路、铁路多通过盐渍土发育地区。青海西部地区含盐量平均在3.0296%左右[1]，属于高含盐盐渍土地区。尤其是青海省西部柴达木盆地以西茫崖坳陷地区，地质构造复杂，含盐土层厚度通常大于20 m，随剖面深度不同，含盐量变化规律不一。

在以往的研究中，对盐渍土强度以静荷载作用下的抗剪强度与含盐量、含水率、围压、频率、黏聚力、内摩擦角等之间的相互关系研究较多，而对盐渍土基于温度变化条件下的动强度参数研究较少，考虑温度影响的多以冻土和黄土（冻结粉土、冻结黄土、压实黄土、原状黄土）为主[2-6]。影响土体的动强度参数的因素较多，盐渍土作为一种特殊土，研究其在各试验条件下动强度特性及其相关参数也是必要的，可对特殊土动力学研究进一步补充和完善。

由于青海西部地区丰富的油田、天然气、矿产和盐湖资源，要开采和运输这些资源，推动当地经济发展，基础交通设施建设必不可少。但是，受当地极端气候变化的影响，该区域内的道路工程及附属设施病害众多（冻胀、冻融沉陷，盐胀、腐蚀、溶陷、叠加效应的病害），难以治理。对该地区路基而言，其力学响应不仅与土的性质、含水率、密度等有关，还与路基土含盐量、含盐种类等有关，而且路基所处的水分场、盐分场、温度场、应力场随外界因素是动态变化的[7]。因此，研究温度变化条件下盐渍土的动力学特性，对于减少该地区道路病害，提高养护效率具有现实意义，从而可为该特殊土地区道路的设计、施工和

基金项目：青海省科技厅项目(2017-ZJ-791)；青海省创新服务平台建设专项项目（2018-ZJ-T01）；国家自然科学基金项目（51768060）
收稿日期：2019－04－28
*通讯作者（changlijun2008@163.com）

养护提供理论依据。

1 试样制备和试验方法

1.1 试样制备

试验土样取自花土沟，根据《公路土工试验规程》（JTG E40－2007）[8]，测得该土样基本物理参数（表 1）和颗粒级配累计曲线（图 1），由试验结果可知此土样属于级配不均匀粉砂。使用离子色谱仪测得盐渍土 100 g 浸润过滤透明液（3 组试验取其平均值）中各离子含盐量分析，Cl^-与 SO_4^{2-}的比值为 0.0375＜1，即该土样为硫酸盐盐渍土。

表 1 盐渍土土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical indices of test saline soil

天然含水率 w/%	塑限 w_P/%	液限 w_L/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%
4.93	12.44	18.22	1.73	14.17

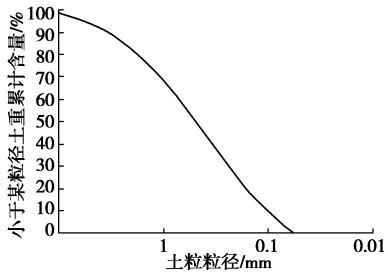


图 1 盐渍土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of salt-soil particles

试验土样按照规范和考虑试验条件，控制压实度为 93%，即干密度为 1.61 g/cm^3，含水率 14.17%，试样制备完成后放入 GDS 动三轴试验系统，在设定的温度条件下使试样恒温 24 h 后施加循环动荷载。

1.2 试验方案

试验设定了 3℃，0℃，−5℃，−10℃，−15℃5 个温度梯度，加载频率分别设定为 1，2，5 Hz，围压为 100，200，300 kPa。循环加载振幅设定从 0.02 MPa 逐级递增，具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案及条件设定

Table 2 Test plans and setting conditions

试验编号	YZ1-YZ9	YZ10-YZ18	YZ19-YZ27	YZ28-YZ36	YZ37-YZ45
试验温度 T/℃	3	0	−5	−10	−15
动载频率 f/Hz	1，2，5				
围压 σ_{3d} /kPa	100，200，300				
加载控制方式	使用荷载控制模块				

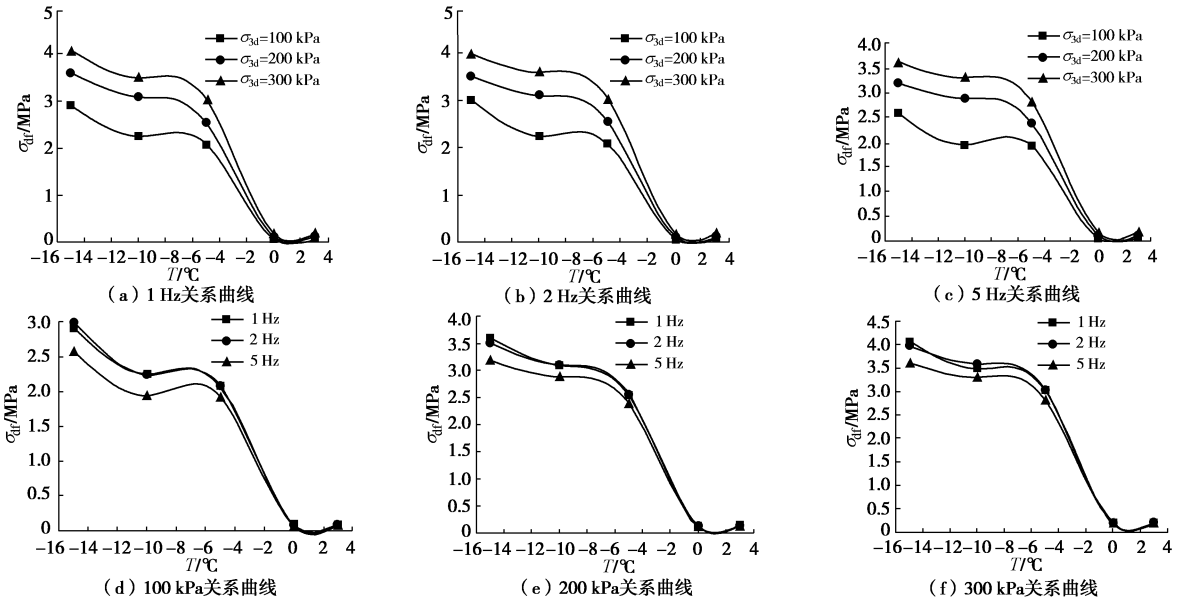
2 试验结果与分析

试验得到动强度参数中，动黏聚力和动内摩擦角由莫尔应力圆得到，破坏动应力为破坏大主应力和小主应力的差值，能综合反映动强度破坏整体特性。

2.1 温度与破坏动应力的关系

在温度变化条件下，破坏动应力的增减趋势有所差异，当动载频率一定时（图 2（a），（b），（c）），随温度的升高，破坏动应力逐渐减小，其减小趋势在 0℃以下较为明显，0℃以上变化不明显，同时，随着围压的增大，破坏动应力也有明显增大。当围压一定时（图 2（d），（e），（f）），破坏动应力随温度的升高亦逐渐减小。当温度、围压相同时破坏动应力随频率增大反而有减小的趋势。

当土体温度在 0℃以上时，土孔隙中的一部分水逐渐与硫酸盐结合，形成硫酸盐结晶，填充在土颗粒孔隙间，当土体有循环动荷载作用时，被硫酸盐结晶



（a）1 Hz关系曲线 （b）2 Hz关系曲线 （c）5 Hz关系曲线

（d）100 kPa关系曲线 （e）200 kPa关系曲线 （f）300 kPa关系曲线

图 2 温度变化与破坏动应力关系曲线

Fig. 2 Relationship between temperature change and destructive dynamic stress

填充孔隙的土体更容易出现裂隙发展，孔隙被结晶填充的越多，土体破坏越容易。当温度在 0℃以下变化时，随着温度的降低土中水会逐渐冻结成冰，此时冻胀作用占主导地位，土的孔隙中会有大量的冰晶产生[3-5]，造成破坏动应力增加。

2.2　温度－围压－破坏动应力关系拟合

综合考虑温度、围压及破坏动应力的变化趋势，使用 MATLAB 曲面函数模块对三者进行拟合，结果见图 3，根据拟合结果可得该盐渍土温度相关的破坏动应力曲面方程式为

$$\sigma_{\mathrm{df}} = a\cdot\sigma_{3\mathrm{d}} - b\cdot T - c\cdot\sigma_{3\mathrm{d}}^2 - d\cdot T^2 - e\cdot T\sigma_{3\mathrm{d}} + k \quad , \tag{1}$$

式中，a，b，c，d，e，k 为试验参数，不同频率下参数值见表 3，从曲面方程各变量参数变化可知，b，d 反映了温度对破坏动应力的响应，a，c 反映了围压对破坏动应力的响应。拟合公式计算结果与试验所得结果相当接近，拟合结果理想，对一定温度范围内破坏动应力的分析具有参考意义。

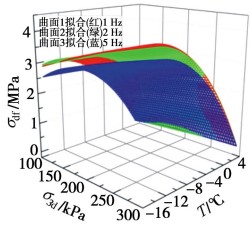


图 3　破坏动应力－温度－围压关系拟合曲面

Fig. 3 Fitting surface of destructive dynamic stress-temperature-confining pressure

表 3　温度相关的破坏动应力曲面拟合参数

Table 3 Fitting parameters of relationship between temperature dependent and damage dynamic stress surface

f/Hz	a	b	c /(10^{-6})	d	e /(10^{-4})	k	R^2
1	0.004	0.275	4.711	0.012	2.895	0.659	0.991
2	0.003	0.288	1.606	0.013	2.399	0.765	0.986
5	0.004	0.263	5.214	0.012	2.551	0.579	0.987

从图 3 曲面变化可知，随着温度的降低，3 个曲面都出现了屈服，并没有持续扩增。这与试样在循环动荷载作用下产生的有效能量使土体局部升温，改变原有土样中盐溶液浓度和含冰量的分布有关，频率越大同一时间产生的有效能越多，温度升高越明显，土中溶液浓度和含量变化导致土颗粒、冰晶体、盐结晶体的粒间咬合力及自由分子力减弱，且试验温度越低这一现象越明显[6-7]。

2.3　温度与动黏聚力的关系

温度与动黏聚力的关系曲线见图 4，随温度的降低动黏聚力明显增大，但上升一定阶段后趋于平稳，且随着频率的增大动黏聚力增大趋势明显。其关系可用 Logistic 曲线进行拟合：

$$c_{\mathrm{d}} = \frac{a}{1+e^{-k(T-T_{\mathrm{C}})}} \quad , \tag{2}$$

式中，a，k，T_{C} 为试验参数，与土样试验温度和本身性质有关。a 为与温度有关的动黏聚力终值（最大值）（kPa）；k 为从数值大小体现曲线整体变化快慢的趋势；T_{C} 为拟合曲线的纵向对称中心及动黏聚力增长速度最快的温度拐点（℃）。各拟合参数值见表 4。该函数很好地建立了动黏聚力与温度变化的回归模型，可预测动黏聚力随温度的变化情况。

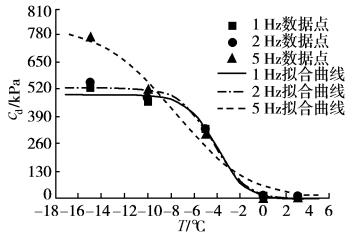


图 4　温度变化与动黏聚力关系曲线

Fig. 4 Relation curves of temperature change and dynamic cohesion

表 4　温度与动黏聚力变化关系拟合参数

Tab 4 Fitting parameters of relationship between temperature and dynamic cohesion

f/Hz	a/(10^2)	k	T_{C}	R^2
1	4.9651	−0.7715	−4.1013	0.9827
2	5.2618	−0.7069	−4.3172	0.9822
5	8.2429	−0.3183	−7.6362	0.9571

由于温度降低，冻结土中对动强度有弱化作用的未冻水逐渐结成冰，冰胶结作用增强，同时，生成的部分硫酸盐结晶微粒对土骨架颗粒也具有胶结作用，集聚于冰晶土颗粒形成的孔隙间或表面，从而导致其动黏聚力大大提高[9-10]。试验中水–冰–盐之间的相态转化也是引起动黏聚力改变的主要原因之一。

2.4　温度与动内摩擦角的关系

内摩擦角随温度的变化曲线见图 5，温度降低会引起动内摩擦角增大，0℃～−5℃范围内动内摩擦角增加幅度最大。0℃以上动内摩擦角基本保持不变，−5℃以后随温度的降低动内摩擦角变化趋势又有所不同，频率 1，2 Hz 时较稳定，频率 5 Hz 时明显降低。这可能与土体中未冻结含水率和结晶硫酸盐有关，在含水率一定时，振动频率增大，同一时间内产生的能

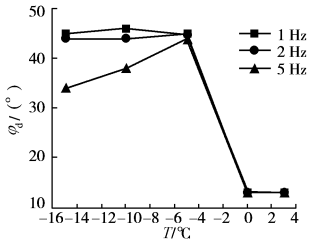


图 5　温度变化与动内摩擦角关系曲线

Fig. 5 Relation curves of temperature and dynamic internal friction angle

量越多，随着土体结构被破坏，试样内部吸收的有效能量也逐渐增加，使土体局部处于融化状态[6, 11]，导致土体中未冻含水率增加，硫酸钠结晶微粒与未冻水形成混合液，对土颗粒表面起到润滑作用，从而使其动内摩擦角减小。

3 结 论

（1）破坏动应力整体随温度降低而增大，随围压增大而增大，且呈较好线性关系；破坏动应力在同一围压下随频率的增大而减小，得到的破坏动应力－围压－温度曲面方程能很好地反映三者之间的相互关系。破坏动应力的改变与土中水结成冰晶和硫酸盐结晶填充与土骨架间隙有很大关系。

（2）动黏聚力随温度（3～−15℃）的降低而增大，在频率较低时（1，2 Hz）其增加趋势随温度的降低而逐渐趋于稳定，但加载频率较高时（5 Hz）增加趋势明显。动黏聚力变化与水–冰–盐之间的相态相互转化有关。

（3）动内摩擦角整体随温度的降低有所增大，加载频率对−5℃以上土样动内摩擦角影响不大，−5℃以下随频率的增大其有明显减小趋势。动内摩擦角变化与土在振动过程中未冻水和盐类混合溶液的润滑作用有关。

参考文献：

[1] 杨成松, 何 平, 程国栋, 等. 含盐冻结粉质黏土应力－应变关系及强度特性研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3282－3286. (YANG Cheng-song, HE Ping, CHENG Guo-dong, et al. Study of stress-strain relationships and strength characteristics of saturated saline frozen silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3282－3286. (in Chinese))

[2] 王丽霞, 凌贤长, 徐学燕, 等. 青藏铁路冻结粉质粘土动静三轴试验对比[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 202－205. (WANG Li-xia, LING Xian-zhang, XU Xue-yan, et al. Comparison of dynamic and static triaxial test on frozen silty clay of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 202－205. (in Chinese))

[3] 沈忠言, 张家懿. 冻结粉土的动强度特性及其破坏准则[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(2): 47－54. (SHEN Zhong-yan, ZHANG Jia-yi. Dynamic strength characteristic and failure criterion of frozen silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(2): 47－54. (in Chinese))

[4] 吴志坚, 马 巍, 王兰民, 等. 地震荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(6): 648－652. (WU Zhi-jian, MA Wei, WANG Lan-min, et al. Laboratory study on the effect of temperature and confining pressure on strength of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(6): 648－652. (in Chinese))

[5] 李 焱, 骆亚生, 谭东岳, 等. 振动频率对压实黄土动强度特性的影响[J]. 水土保持通报, 2009, **29**(4): 130－133. (LI Yan, LUO Ya-sheng, TAN Dong-yue, et al. Effects of Vibration Frequency on Dynamic Strength Properties of Compacted Loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, **29**(4): 130－133. (in Chinese))

[6] 黄大维, 杨有海, 赖国泉, 等. 高速铁路路基动态变形模量分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(5): 1402－1408. (HUANG Da-wei1, YANG You-hai, LAI Guo-quan, et al. Analysis of dynamic deformation modulus for high-speed railway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1402－1408. (in Chinese))

[7] 包卫星, 谢永利, 杨晓华. 天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J]. 工程地质学报, 2006, **14**(3): 380－385. (BAO Wei-xing, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. A laboratory test study on water and salt migration natural saline soils and associated shear strength changes under freezing and thawing cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, **14**(3): 380－385. (in Chinese))

[8] JTG E40－2007 公路土工试验规程[S]. 2007. (JTG E40－2007 The methods of soils for highway engineering[S]. 2007. (in Chinese))

[9] 陈炜韬, 王 鹰, 王明年, 等. 冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(11): 2343－2347. (CHEN Wei-tao, WANG Ying, WANG Ming-nian, et al. Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(11): 2343－2347. (in Chinese))

[10] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2090－2096. (WAN Xu-sheng, LAI Yuan-ming. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate solution and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2090－2096. (in Chinese))

[11] 高 娟, 赖远明. 冻结盐渍土三轴剪切试验过程中的损伤及压融分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 707－715. (GAO Juan, LAI Yuan-ming. Damage and pressure melting analysis of frozen saline soil in the process of triaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 707－715. (in Chinese))

（责编：胡海霞）