

DOI: 10.11779/CJGE201409002

含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究

蔡正银, 吴志强, 黄英豪, 曹永勇, 魏雁冰

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:为了探索冻土的力学性质,开展了不同含水率、不同 Na_2SO_4 含量条件下冻结低液限黏土的无侧限抗压强度试验,探讨了含水率、 Na_2SO_4 含量对冻土应力应变特性、强度与破坏类型的影响,以及冻土无侧限抗压强度与上述两影响因素之间的关系。试验结果表明:随着含水率的升高,冻土逐渐表现出塑性; Na_2SO_4 含量越高,脆性破坏特性越显著。冻土强度随含水率和 Na_2SO_4 含量的升高先增加,达到最大强度后迅速降低,最大强度对应的含水率为17.5%。含水率为13.5%时,最大强度对应的 Na_2SO_4 含量为4.4%,含水率为15.5%与17.5%时,最大强度对应的 Na_2SO_4 含量为5.8%。

关键词:冻土; 无侧限抗压强度; 应力应变关系; 含水率; Na_2SO_4 含量

中图分类号: TU445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)09-1580-07

作者简介: 蔡正银(1965-),男,教授级高级工程师,从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、构筑物与地基基础离心模拟技术方面的研究工作。E-mail: zyc@nhri.cn。

Influence of water and salt contents on strength of frozen soils

CAI Zheng-yin, WU Zhi-qiang, HUANG Ying-hao, CAO Yong-yong, WEI Yan-bing

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of frozen soils, a series of uniaxial compressive strength tests are conducted with water content of 9.5%, 11.5%, 13.5%, 15.5%, 17.5% and saturated conditions at -10°C , and with salt content of 0.2%, 1.6%, 3.0%, 4.4%, 5.8%, 7.2% and 8.6% at -15°C respectively. According to the test results, the stress-strain relationship, uniaxial compressive strength and destruction type are strongly affected by the water and salt contents of the soils. The test results show that the uniaxial compressive strength increases with the increasing water and salt contents firstly, then it decreases rapidly after reaching its peak. The water content corresponding to the peak strength is 17.5% regardless of the salt content and dry density of the soils. But the salt content corresponding to the peak strength varies under different water contents: under the water content of 13.5%, the strength reaches its peak under the salt content of 4.4%; under the water content of 15.5% and 17.5%, the strength reaches its peak under the salt content of 5.8%.

Key words: frozen soil; uniaxial compressive strength; stress-strain relationship; water content; Na_2SO_4 content

0 引言

冻土作为一种复杂的多相介质,强度是其力学性质的重要指标,因此冻土的强度特性是国内外学者的研究热点。1930年,Tsytovich^[1]进行了冻结砂土在不同加载速率、不同温度条件下的单轴抗压强度试验,得到了强度随加载速率的增加和温度的降低而增大的规律。之后国内学者朱元林等^[2-6]以冻结砂土、冻结粉土和冻结黏土为对象研究了冻土无侧限抗压强度与温度、加载速率、含水率等因素的关系,给出了强度与上述影响因素的预测关系。马小杰等^[7]通过对青藏高原高温高含冰量黏土的研究指出,存在一个“最不利含水率”,在该含水率水平下强度最低。王春雷等^[8]、贺俊等^[9]、吴旭平等^[10]研究表明冻土无侧限抗压强度随

含水率的增大而增加。近年来,肖海斌等^[11-14]对高含水率冻土的试验研究表明,当含水率超过某一值时,强度随着含水率的增加逐渐降低。

含盐量对冻土强度影响的试验研究始于20世纪70年代。Sayles等^[15]指出,冻结粉土的强度随着盐溶液浓度的增加而降低。Roman等^[16]、Hivon等^[17]、Biggar等^[18]等研究了永久性冻土区氯盐盐渍土的分布和其中未冻水含量的影响因素,为更好地了解盐渍土的强度特性提供了理论基础。之后Hass等^[19]选择轻砾质砂、轻砾质粉砂、亚粉质黏土和黏土开展的单轴

基金项目: 水利部公益性行业科研专项项目(201201037); 南京水利科学研究院国家重点实验室基本科研业务费项目(Y314006)

收稿日期: 2014-02-07

抗压强度试验表明, 冻结状态下土体的强度均随含盐量的增加明显降低, 同时发现, 土中的细粒含量对强度随含盐量变化的特性有显著影响。国内学者杨成松等^[20]研究了含盐量对青藏高原冻土强度的影响, 同样得到了强度随含盐量增加而降低的结论。

以上的研究揭示了冻土无侧限抗压强度与温度、加载速率、干密度等因素的关系, 但关于含水率对冻土强度特性影响的研究不够深入。此外, 含盐量对冻土强度的研究多集中于含 NaCl 盐的永久性冻土、滨海盐渍土与人工冻土, 对占中国国土面积 53.5% 的内陆季节性冻土区的硫酸盐渍土的研究较少见^[21]。鉴于此, 本文选用北疆季节性冻土区土料, 通过人工掺入水和 Na₂SO₄ 的方式, 重点研究了含水率、Na₂SO₄ 含量 (*S*) 两个因素对冻土的无侧限抗压强度的影响, 在明确含水率、Na₂SO₄ 含量 (*S*) 变化对冻土强度的影响规律的基础上, 进一步给出了不同条件下土体最大无侧限抗压强度对应的含水率和 Na₂SO₄ 含量, 加深了对季节冻土区土体的力学特性的认识。

1 试样制备及试验方法

1.1 土样和试样的制备

试验土料取自北疆地区某大型输水灌渠, 取样深度为地表 1~2 m, 密封包装后运回。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 进行土体的基本性质试验, 试验结果见下表 1。本次冻土无侧限抗压强度试验采用直径 39.1 mm, 高度 80 mm 的标准圆柱形试样, 制作过程如下: 首先将晾晒后的土样过 2 mm 筛, 然后按照设计配比向风干土样中加入一定质量的水和无水硫酸钠, 土料用塑料袋包裹闷料 24 h 后按照设计指标称取相应的重量, 采用静力压实法分五层击实至设计干密度。拆模后将试样以保鲜膜包裹放入低温恒温箱中养护, 24 h 之后取出进行无侧限抗压强度试验。

表 1 土体的基本性质

Table 1 Basic properties of test soils

粒度组成/%			<i>w_L</i>	<i>WP</i>	<i>ρ_{dmax}</i>	<i>w_{opt}</i>
>0.075 mm	0.075~0.05 mm	<0.05 mm	/%	/%	/(g·cm ⁻³)	/%
17.9	62.1	20	29.1	15.2	1.89	13.5

1.2 试验设计与方法

本次冻土无侧限抗压强度试验采用应变控制式冻土单轴抗压强度试验仪, 应变速率设定为 1%/min, 试验设计如表 2 和表 3 所示, 共进行了 45 组 135 个试样的无侧限抗压强度试验。试验过程如下: 首先打开低温单轴试验仪的冷箱, 设定制冷温度与试样养护温度

相同, 恒温 2 h 后开始试验。根据规范, 每个试验条件下均设计 3 个平行试验, 试验数据由计算机自动采集。试样的无侧限抗压强度取应力应变曲线的峰值强度或者 15% 应变对应的强度。

表 2 试验方案 1

Table 2 Test scheme 1

<i>T</i> /°C	<i>ρ_d</i> /(g·cm ⁻³)	<i>S</i> /%	w/%					
			0.2	9.5	11.5	13.5	15.5	17.5
-10	1.7	4.4	9.5	11.5	13.5	15.5	17.5	21.8
		0.2	9.5	11.5	13.5	15.5	17.5	18.5
	1.8	4.4	9.5	11.5	13.5	15.5	17.5	18.5
		0.2	9.5	11.5	13.5	15.5	17.5	18.5

表 3 试验方案 2

Table 3 Test scheme 2

<i>T</i> /°C	<i>ρ_d</i> /(g·cm ⁻³)	<i>w</i> /%	S/%						
			13.5	0.2	1.6	3.0	4.4	5.8	
-15	1.7	15.5	0.2	1.6	3.0	4.4	5.8	7.2	8.6
		17.5	0.2	1.6	3.0	4.4	5.8	7.2	8.6

2 含水率对无侧限抗压强度的影响

2.1 应力应变曲线和破坏特性

按照表 2 的试验方案, 进行了不同含水率水平冻土无侧限抗压强度试验, 试验结果如图 1。

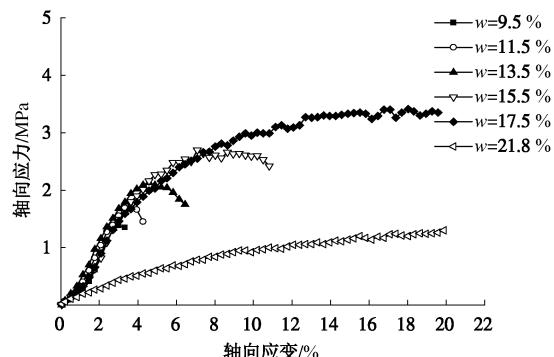


图 1 $\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$, $S=0.2\%$ 试样的应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of frozen soils with different water contents ($S=0.2\%$, $\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$)

图 1 为 -10°C, 干密度为 1.70 g/cm³, Na₂SO₄ 含量为 0.2% 条件下不同含水率水平土体无侧限抗压强度试验的应力应变曲线。从图 1 中可以看出, 当含水率在 9.5%~15.5% 范围内时, 轴向应力在达到峰值后随着应变的增加快速降低, 表现出明显的脆性破坏形式。含水率为 17.5% 的土体在发生屈服后, 轴向应力随着应变的继续增加缓慢增加直至达到破坏。含水率为 21.8% (饱和) 土体, 轴向应力随着应变的增加接近

线性增大并出现塑性硬化现象，直至达到 20%的轴向应变 ($\varepsilon=20\%$ 为试验停止条件)。

图 2 为 -10°C ，干密度为 1.70 g/cm^3 ， Na_2SO_4 含量为 4.4% 条件下不同含水率水平土体无侧限抗压强度试验的应力应变曲线。从图 2 可以看出，在含盐量为 4.4% 的条件下，不同含水率水平下土体的应力应变特性大体相同，即轴向应力随应变的增加达到峰值后下降，直至破坏。各试样在外荷载下均表现出脆性破坏特性。

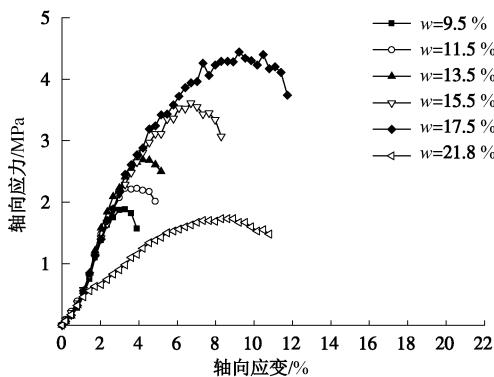


图 2 $\rho_d=1.70 \text{ g/cm}^3$, $S=4.4\%$ 试样的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of frozen soils with different water contents ($S=4.4\%$, $\rho_d=1.70 \text{ g/cm}^3$)

对比图 1 与图 2 中两种不同 Na_2SO_4 含量水平下土体的应力应变曲线可以看出，4.4%含盐量条件下土体的脆性更加明显，即含盐量的不同土体应力应变特性有较大差别，后面将具体探讨。

2.2 土体强度随含水率的变化特性及分析

图 3,4 表示在 -10°C 、 Na_2SO_4 含量为 0.2% 与 4.4% 两种水平下，干密度分别为 1.70 ， 1.80 g/cm^3 条件下冻土无侧限抗压强度随含水率变化的试验结果。

从图中可以看出，土体强度随着含水率的升高而增加且均在含水率为 17.5% ($w_{\text{opt}}=13.5\%$) 时达到最大，之后随着含水率的继续升高强度急剧降低。对比不同干密度条件下土体强度随含水率变化的试验结果还可以发现，在干密度较大条件下 (1.80 g/cm^3)，含水率每增加 1% 引起的强度增加值明显大于干密度较小的土体 (1.70 g/cm^3)。同时，在土体的强度达到最大后，随着含水率的增加干密度较大 (1.80 g/cm^3) 土体的强度下降幅度较大。

从图 3,4 还可以看出，相同的干密度水平下 Na_2SO_4 含量较高土体的无侧限抗压强度明显较高。土体无侧限抗压强度随含水率的变化可解释如下：在相同的干密度条件下，温度降低后液态水相变成冰填充于土体的孔隙。含水率越高在降温过程中形成的冰晶含量越高，随着冰晶含量的升高，冰晶逐渐从接触点处发展至土中孔隙并相互联结^[22]。当含水率达到一定

程度时，会出现一种冰晶的饱和状态，此时土体强度最高，对应着土体无侧限抗压强度的最大值。而随着含水率的继续升高，土体中液态水相变成冰所造成的体积的膨胀已不能全部被孔隙容纳，进而在土体内形成新的冻胀发展裂隙，导致土体强度的降低。

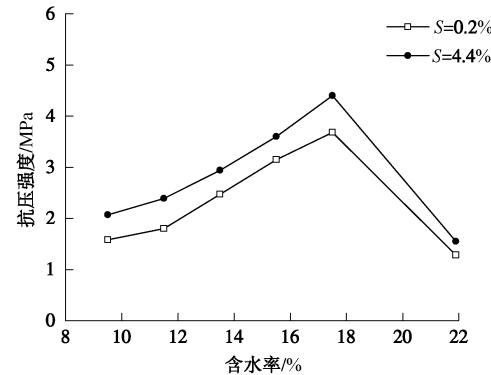


图 3 $\rho_d=1.70 \text{ g/cm}^3$ 强度随含水率的变化

Fig. 3 Compressive strength under dry density of 1.70 g/cm^3

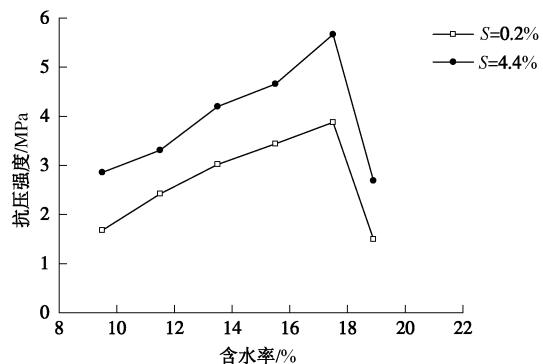


图 4 $\rho_d=1.80 \text{ g/cm}^3$ 强度随含水率的变化

Fig. 4 Compressive strength under dry density of 1.80 g/cm^3

试验说明，冻结低液限黏土的无侧限抗压强度随含水率的升高存在着先增大后减小的基本规律，强度最大值对应的含水率为 17.5%，该含水率值在试验范围内不受土体干密度和含盐量的影响。

3 Na_2SO_4 含量对无侧限抗压强度的影响

按照表 3 的试验设计，进行了不同 Na_2SO_4 含量条件下冻土无侧限抗压强度影响的试验研究，结果如下。

3.1 应力应变曲线和破坏特性

从图 5 在 -15°C 、干密度为 1.70 g/cm^3 、含水率为 15.5% 条件下，不同含盐量水平下土体无侧限抗压强度试验的应力应变曲线可以看出，在含盐量为 0.2%~5.8% 的范围内，各含盐量水平下轴向应力随着应变的增加缓慢升高后接近直线达到峰值，之后随着应变的增加逐渐降低，直至试验结束。当含盐量高于 5.8% 后，

轴向应力在达到峰值后迅速降低, 直至试验结束。从图 5 中可以看出, 在含盐量 7.2%, 8.6% 水平下土体脆性破坏特性明显。

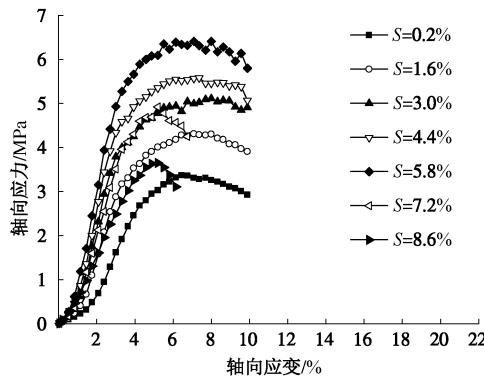


图 5 $w=15.5\%$ 不同 Na_2SO_4 含量的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves when $w=15.5\%$

3.2 土体强度随含盐量的变化特性及分析

从图 6 中在 -15°C 、干密度为 1.70 g/cm^3 、含水率为分别为 13.5%, 15.5% 和 17.5% 3 种条件下土体的无侧限抗压强度随含盐量变化的试验结果可以看出, 土体强度随着 Na_2SO_4 含量的升高先增加, 达到最大强度后随着 Na_2SO_4 含量的升高而降低。为了能更加清晰的揭示土体强度随含盐量的变化规律, 将图 6 按最大强度划分为最大强度前和最大强度后两种变化关系, 如图 7 和图 8 所示。

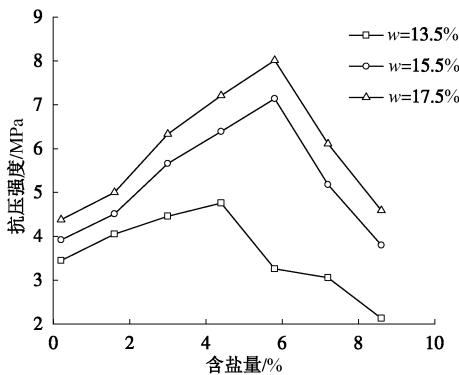


图 6 强度随 Na_2SO_4 含量的变化规律

Fig. 6 Change of compressive strength with salt content

(1) 图 7 表明: 土体在 3 种不同含水率下都表现出类似的性质, 即强度都随着 Na_2SO_4 含量的升高而增大, 直至达到最大强度。但不同含水率土体强度随含盐量的变化特性不同。相同条件下, 含水率越高最大强度越大, 并且在较高含水率水平下单位 Na_2SO_4 含量升高引起的强度增加值较大。

(2) 图 8 表明: 达到最大强度后, 3 种不同含水率的土体也都表现出相似的特征, 即强度随着 Na_2SO_4 含量的升高而降低, 且含水率水平越高, 单位 Na_2SO_4 含量引起的强度降低值越大。

(3) 图 7 和图 8 共同表明, 以最大强度为分界, 上升阶段和下降阶段的土体强度随含量的变化都近似呈现出线性变化规律, 可以用下式表示土体强度与含盐量的关系:

$$q_u = a_1 S + a_0 \quad (1)$$

式中 S 为土体 Na_2SO_4 含量 (%) ; a_0 为在上升阶段表示土体含盐量为 0 时的土体强度, 下降阶段表示含盐量为 0 时的土体强度在纵坐标轴的截距; a_1 为土体强度上升或下降程度的快慢。

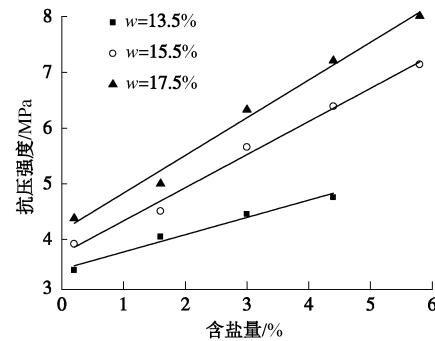


图 7 强度随 Na_2SO_4 含量而增加阶段

Fig. 7 Increase of strength with salt content

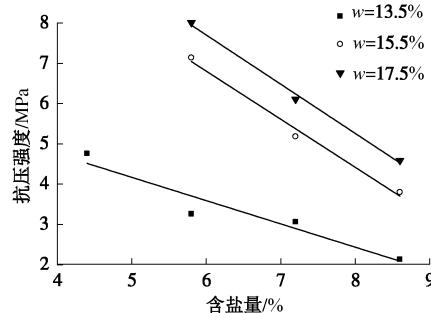


图 8 强度随 Na_2SO_4 含量增加下降阶段

Fig. 8 Decrease of strength with salt content

按照式(1)对试验数据进行回归分析, 得到不同含水率水平下的 a_0 和 a_1 的数值, 见表 4。

表 4 式(1)中的回归参数

Table 4 Regression data of a_0 and a_1 in Eq. (1)

含水率/%	阶段	a_1	a_0	R^2
13.5	上升段	0.31	3.46	0.980
	下降段	-0.58	7.06	0.919
15.5	上升段	0.59	3.74	0.992
	下降段	-1.19	12.29	0.990
17.5	上升段	0.68	4.16	0.989
	下降段	-1.22	13.32	0.996

从表 4 中土体强度随 Na_2SO_4 含量的升高而增大的阶段可知, 在含水率为 13.5%, 15.5% 和 17.5% 3 种条件下, 含盐量每增加 1% 引起的强度增加值分别为 0.31, 0.59, 0.68 MPa。达到最大强度之后, 3 种含水率下含盐量每增加 1% 引起的强度下降值分别为 0.58,

1.19, 1.22 MPa。即在含盐量低于“拐点含盐量”之前, 含水率高的土体强度随着含盐量的增加幅度较大; 在含盐量高于“拐点含盐量”之后, 含水率较高的土体强度随着含盐量的下降的幅度较大。

从上述试验数据可以看出, 冻土强度表现出随 Na_2SO_4 含量的升高先增加后降低的特点, 与含 NaCl 冻土强度随含盐量增加而下降的规律不同^[19-20, 23]。

图9硫酸钠的溶解度特性曲线表明, 低温下 Na_2SO_4 的溶解度较低, 即使原溶液的浓度较高, 也将在因降温处于过饱和状态而析出盐晶, 因此 Na_2SO_4 溶液的冰点降低不多。该推论在图10不同浓度 Na_2SO_4 与 NaCl 溶液的冻结温度试验曲线得到了证实^[24]。对于处于某一负温的含 Na_2SO_4 盐试样, 随着试样温度的降低, 土中的 Na_2SO_4 溶液逐渐处于过饱和而吸水结晶^[25], 一个 Na_2SO_4 分子吸收十个水分子形成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 。随着 Na_2SO_4 含量的升高, 结晶析出的盐分增多, 土中的盐溶液浓度降低, 因此在相同温度下土中的未冻溶液含量降低, 未冻水含量降低, 土体强度表现出随含盐量升高而增加的特性。同时, 随着结晶体含量升高, 析出的晶体逐渐填充土体孔隙, 使试样中存在的低密度区密度增大^[26], 在土中起到骨架的作用。另外, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体之间相互胶结^[27], 具有承受剪切变形的能力^[28], 这些因素对土体的强度的升高均起到了有利作用。

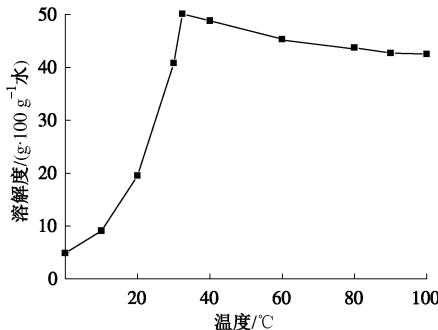


图9 硫酸钠溶解度曲线

Fig. 9 Solubility curve of Na_2SO_4

随着土中 Na_2SO_4 含量的继续升高, 降温过程中可用于无水硫酸钠结晶吸收的自由水含量降低。如对于含水率为13.5%含盐量为大于4.4%, 含水率为15.5%, 17.5%含盐量为大于5.8%的情况, 根据 Na_2SO_4 的溶解度曲线可知在30°C制样时, 上述 Na_2SO_4 含量试样中的溶液已处于过饱和状态。降温过程中由于自由水含量有限, 导致未能结晶析出的 Na_2SO_4 含量较高, 孔隙溶液浓度较大, 未冻水含量较高, 强度表现出随含盐量升高而降低的特性。

通过该次的试验研究发现, 对于处于冻结状态的

低液限黏土, 其无侧限抗压强度随着 Na_2SO_4 含量的升高而增大, 在某一含盐量时强度最大后随着含盐量的继续升高强度急剧降低, 存在“拐点含盐量”, 并且该“拐点含盐量”受土体含水率的影响。

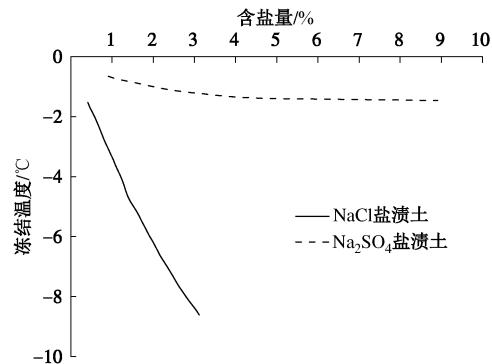


图10 盐渍土的冻结温度

Fig. 10 Freezing point of saline soils

4 结 论

通过在-10°C、-15°C条件下对北疆地区低液限土在不同含水率、不同 Na_2SO_4 含量条件下无侧限抗压强度的试验研究, 得到如下主要结论:

(1) 含水率和 Na_2SO_4 含量对冻结低液限黏土的应力应变特性都有明显影响。低 Na_2SO_4 含量(0.2%)下, 含水率较低时, 土体在外荷载下表现出脆性破坏。随着含水率的升高, 土体塑性增强, 含水率达到一定程度时, 土体塑性硬化明显; 较高 Na_2SO_4 含量(4.4%)下, 各含水率水平下试样均具有应变软化特征, 含水率越高, 破坏应变越大。

(2) 冻土无侧限抗压强度显著受到含水率和 Na_2SO_4 含量的影响。随着含水率和含盐量的升高, 土体的强度先增加后减小, 存在最大强度; 在-10°C条件下, 不同干密度、不同 Na_2SO_4 含量冻土最大强度对应的含水率相同, 均为17.5%; 在-15°C条件下, 含水率为13.5%时, 最大强度对应的含盐量为4.4%, 含水率分别为15.5%和17.5%时, 最大强度对应的含盐量为5.8%。

(3) 含 Na_2SO_4 冻土强度和含盐量的关系可以用式 $q_u = a_1 S + a_0$ 表示, 并且以最大强度为界可分为强度上升阶段和下降阶段, 式中参数都具有较明确的物理意义, 可以作为强度和 Na_2SO_4 含量关系的物理模型。

(4) 本文从冰晶对土体结构的影响、 Na_2SO_4 结晶吸水特性的角度初步分析了含水率和 Na_2SO_4 含量对土体强度的影响, 但 Na_2SO_4 含量对土体强度的影响机理还需要进一步借助微观手段进行研究, 这也正是本文后续的研究工作。

参考文献:

- [1] TSYTOVICH H A. Mechanics of frozen soils[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 160 - 161. (TSYTOVICH H A. Mechanics of frozen soils[M]. ZHANG Chang-qing, ZHU Yuan-lin, trans. Beijing: Science Press, 1985: 160 - 161. (in Chinese))
- [2] 吴紫汪, 张家懿, 朱元林. 冻土的强度与破坏特征[C]// 中国地理学会冰川冻土学会论文选集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 275 - 280. (WU Zi-wang, ZHANG Jia-yi, ZHU Yuan-lin. Strength and failure characteristics of frozen soil[C]// Proceedings of the Second National Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1983: 275 - 280. (in Chinese))
- [3] ZHU Yuan-lin, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Regions Science and Technology, 1984, 9(1): 3 - 15.
- [4] 陈湘生. 人工冻土瞬时无侧限抗压强度特征的试验研究[J]. 建井技术, 1991(6): 32 - 35. (CHEN Xiang-sheng. Experimental study on instantaneous uniaxial compressive strength characteristics of the artificial frozen soil[J]. Mine Construction Technology, 1991(6): 32 - 35. (in Chinese))
- [5] 李洪升, 杨海天, 常成, 等. 冻土抗压强度对应变速率敏感性分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 40 - 47. (LI Hong-sheng, YANG Hai-tian, CHANG Cheng, et al. The strain rate sensitivity analysis of compression strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 40 - 47. (in Chinese))
- [6] 马芹永. 人工冻土单轴抗拉、抗压强度的试验研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(3): 76 - 81. (MA Qin-yong. Tensile strength, uniaxial compressive strength test on artificially frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(3): 76 - 81. (in Chinese))
- [7] 马小杰, 张建明, 常晓晓, 等. 高温·高含冰量冻结黏土强度试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2498 - 2502. (MA Xiao-jie, ZHANG Jian-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Experimental research on strength of warm and ice-rich frozen clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2498 - 2502. (in Chinese))
- [8] 王春雷, 谢强, 姜崇喜, 等. 青藏铁路冻区盐渍土热特性及力学性能分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 836 - 839. (WANG Chun-lei, XIE Qiang, JIANG Chong-xi, et al. Analysis of thermal characteristics and mechanical properties of salty soil in frozen area of Qinghai-Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 836 - 839. (in Chinese))
- [9] 贺俊, 杨平, 董朝文. 基于BP神经网络冻土强度预测模型研究[J]. 路基工程, 2011(3): 54 - 57. (HE Jun, YANG Ping, DONG Chao-wen. Study on prediction model of frozen soil strength based on back-propagation neural network[J]. Subgrade Engineering, 2011(3): 54 - 57. (in Chinese))
- [10] 吴旭平, 丁春林. 冻结重塑黏土损伤特性及影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2038 - 2044. (WU Xu-ping, DING Chun-lin. Damage properties and influence factors of remolded frozen clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2038 - 2044. (in Chinese))
- [11] 肖海斌. 人工冻土单轴抗压强度与温度和含水率的关系[J]. 岩土工程界, 2008, 4(11): 62 - 63. (XIAO Hai-bin. The relationship of uniaxial compressive strength of artificial frozen soil between water content and temperature[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 4(11): 62 - 63. (in Chinese))
- [12] 陈锦, 李东庆, 邝慧, 等. 含水率对冻结含盐粉土单轴抗压强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 441 - 445. (CHEN Jin, LI Dong-qing, BING Hui, et al. An experimental study of influence of water content on uniaxial compressive strength of frozen salty silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 441 - 445. (in Chinese))
- [13] 尹珍珍, 陈有亮, 王鹏. 上海人工冻结黏土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 788 - 792. (YIN Zhen-zhen, CHEN You-liang, WANG Peng. Uniaxial unconfined compressive strength test on artificially frozen clay in Shanghai[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 788 - 792. (in Chinese))
- [14] XIAO XUAN G E, ZHAO HUI YANG, STILL B. Mechanical properties of naturally frozen silty soil for seismic design of pile foundations[C]// 10th International Symposium on Cold Regions Development. Reston VA: American Society of Civil Engineers, 2013: 215 - 227.
- [15] SAYLES F H, CARBEE D L. Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight[J]. Engineering Geology, 1981, 18: 55 - 66.
- [16] ROMAN L T. Effect of chemical composition of soils on the strength and deformability of frozen saline soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1994, 31(6): 205 - 210.

- [17] HIVON E, SEGO D C. Determination of unfrozen water content in saline permafrost using Time-Domain-Reflection(TDR)[C]// 5th Canadian Permafrost Conference. Quebec City, 1990: 257 - 262.
- [18] BIGGAR K W, SEGO D C. Field pile load tests in saline permafrost I: analysis of results[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**: 46 - 59.
- [19] HELMET Hass, REGINE Jagow-Klaff, RUDOLF Wernecke. Influence of salinity on the strength of various frozen soils[C]// Orono ME: American Society of Civil Engineers. Orono, 2007.
- [20] 杨成松, 何 平, 程国栋, 等. 含盐冻结粉质黏土单轴抗压强度试验研究[J]. 工程力学, 2006, **23**(1): 144 - 148. (YANG Cheng-song, HE Ping, CHENG Guo-dong, et al. Uniaxial compressive strength study of frozen saline silt clay[J]. Engineering Mechanics, 2006, **23**(1): 144 - 148. (in Chinese))
- [21] 马 巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50 a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 625 - 640. (MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 625 - 640. (in Chinese))
- [22] 王文华. 吉林省西部地区盐渍土水分迁移及冻胀特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003. (WANG Wen-hua. A study on the moisture content migration and characteristics of frost heaving of saline soil in the western of Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2003. (in Chinese))
- [23] HIVON E G, SEGO D C. Strength of frozen saline soils[J]. Can Geotech J, 1995, **32**: 336 - 354.
- [24] 冯 挺. 盐渍土的冻胀特性及其对渠道的危害[J]. 水利水电技术, 1989(6): 57 - 61. (FENG Ting. The frost heaving properties of saline soil and its damage to channels[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989(6): 57 - 61. (in Chinese))
- [25] 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 - 2095. (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 - 2095. (in Chinese))
- [26] 刘增利, 李洪升, 朱元林. 冻土单轴压缩损伤特征与微观损伤测试[J]. 大连理工大学学报, 2002, **42**(2): 223 - 227. (LIU Zeng-li, LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin. Damage characteristics and micro-crack damage of frozen soil under uniaxial compression[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, **42**(2): 223 - 227. (in Chinese))
- [27] 李宁远, 李 斌, 吴家慧. 硫酸盐渍土及膨胀特性研究[J]. 西安公路学院学报, 1989, **7**(3): 81 - 90. (LI Ning-yuan, LI Bin, WU Jia-hui. Swelling characteristics of sulfate saline soil[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1989, **7**(3): 81 - 90. (in Chinese))
- [28] MARCIN K. Modeling the phase change of salt dissolved in pore water: equilibrium and non-equilibrium approach[J]. Construction and Building Materials, 2010, **24**(7): 1119 - 1128.