

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.013

## 盐渍土与混凝土衬砌冻结强度直剪试验研究\*

孙兆辉<sup>1</sup>, 卞汉兵<sup>1,2</sup>, 鹿翔宇<sup>1</sup>, 章赛泽<sup>1</sup>, 邱秀梅<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. LEM3 CNRS 7239 洛林大学, 梅兹 法国 57045)

**摘要:** 盐渍土、冻土作为特殊土一直是岩土工程领域研究的热点,但盐渍化冻土与结构之间的相互作用却鲜有报道。为研究山东季冻区、盐碱地渠系工程破坏问题,开展了氯化钠、硫酸钠盐渍土在不同含盐量、不同法向应力条件下与混凝土衬砌冻结接触面的直剪试验研究。结果表明:冻结接触面剪切破坏的性状与含盐类型和含盐量均有关,随氯化钠含量的增加,破坏性状由脆性破坏转为塑性破坏,且氯化钠含量约为2%时是破坏性状的转折点,硫酸钠含量的增加,不会改变接触面的脆性破坏性状;初始冻结强度来源于接触面上冰晶的胶结作用,随含盐量的增大,冻结强度降低,且含盐类型对冻结强度影响不同,氯化钠比硫酸钠对初始冻结强度降低作用更显著,当氯化钠含量接近2%、硫酸钠含量超过4%时,接触面完全丧失初始冻结强度;随着含盐量的增大,内摩擦角由不变到开始减小,黏聚力由开始降低到趋于稳定。

**关键词:** 盐渍土; 接触面; 冻结强度; 直剪试验

**中图分类号:** TU443      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0236-07

## Direct Shear Tests on Frozen Strength of Interface Between Saline Soil and Concrete Lining

SUN Zhaohui<sup>1</sup>, BIAN Hanbing<sup>1,2</sup>, LU Xiangyu<sup>1</sup>, ZHANG Saize<sup>1</sup>, QIU Xiumei<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;  
2. LEM3 CNRS 7239, Université de Lorraine, Metz 57045, France)

**Abstract:** Saline soil and frozen soil have been considered as special soils and have been widely studied in geotechnical engineering. However, few studies have been done on the interface between frozen saline soil and concrete lining. In order to study the frozen damage of an irrigation canal system in Shandong Province, a series of direct shear tests on interface between frozen saline soil and concrete lining, with different salt types, different salt contents and different normal stresses, were performed to study the mechanical properties of the frozen interface. The test results show that the failure model of the frozen interface relies on the salt type and salt content. When the salt content is less than 2%, the direct shear strength of the interface decreases rapidly after the peak value. However, when the salt content is larger than 2%, the failure model is different from that with small salt content. It changes from brittle failure to plastic failure with the increase of salt content. When the content of NaCl is more than 2%, the frozen strength of the interface is completely lost. While for Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, when its content is more

\* 收稿日期:2018-03-30;修回日期:2018-04-28

基金项目:国家十二五科技支撑计划(2015BAB07B05)、山东省重点研发计划(2017GSF16104)资助

作者简介:孙兆辉(1991-),男,硕士研究生。主要从事盐渍土、冻土力学性质方面的研究。Email:Mrsunzhaohui@163.com

通讯作者:邱秀梅(1962-),女,硕士,教授。主要从事土体工程安全方面的研究。Email:qxmxr@126.com

than 4%, the initial frozen strength approaches to zero. The effect of salt content on the shear strength of the interface is as follows: as salt content increases, the internal friction angle decreases with the increase of salt content; The cohesion decreases from its initial value to a constant with the increase of salt content.

**Keywords:** saline soil; interface; frozen strength; direct shear test

## 引 言

随着国家大力发展节水农业等相关决议的提出,减少渠道工程破坏、避免输水浪费、提高输水效率显得尤为重要。我国北方地区渠系工程冻害问题也成为研究的热点和重点<sup>[1]</sup>。就渠道工程冻胀破坏问题而言,虽然其形式多样,但破坏机理基本相似:土在低温冻结过程中水分结晶,表层的冰晶通过胶结作用使土与衬砌形成一个整体,内部水分冻结结晶则导致土体体积膨胀,土体冻胀会以荷载形式通过渠道下卧土与衬砌的冻结接触面传递给上部衬砌结构,当传递的荷载超出上部衬砌结构的承载力,衬砌结构就会发生破坏。因此,研究下卧土与渠道衬砌冻结接触面的力学性能是研究渠道冻害破坏问题的关键。众所周知,含盐量的变化对孔隙水的冻结过程、冻结强度和性能有重要影响。山东地区地处黄河下游,土地盐渍化严重,含盐量及含盐类型存在明显差异,土与衬砌冻结接触面力学性能的研究不得不考虑渠基土盐渍化问题。

从20世纪起,国内外先后开展了大量关于土与结构接触面的研究。例如C. S. Desai等<sup>[2]</sup>、J. G. Potyondy<sup>[3]</sup>、Sung-gyu Ko等<sup>[4]</sup>利用直剪仪开展了土与多种材料接触面的抗剪强度试验研究,Chang-ho choi等<sup>[5]</sup>根据直剪试验结果,认为抗剪强度可以预测冻结强度,他们通过试验得出了相应的方法。国内以西北生态环境资源研究院为代表的众多科研单位在针对特殊土及接触面力学性能问题上也取得了丰硕的成果。如徐学祖等<sup>[6]</sup>对国内外大量冻土研究进行了总结,这些结论为冻土、盐渍土的研究提供了理论基础。童长江等<sup>[7]</sup>认为土与基础接触面的冰胶结力可以用抗剪强度来表示,这与国外学者<sup>[5]</sup>的研究不谋而合。董盛时等<sup>[8-9]</sup>依据低温环境下青藏粉土与玻璃钢、混凝土接触面直剪试验结果,建立了相应本构模型。温智等<sup>[10-11]</sup>分别开展了土与玻璃钢、混凝土在不同冻结温度、不同含水率条件下的直剪试验,系统的分析了接触面黏聚力、内摩

擦角与冻结温度、含水率的关系。另外部分学者通过改进试验仪器,也取得了许多成果。如陈炜韬等<sup>[12]</sup>利用扫描电镜发现盐渍土中盐晶析出位置的变化是导致黏聚力变化的主要原因。崔颖辉等<sup>[13]</sup>开发了一种低温动荷载直剪仪,指出土质的不同(如级配、盐度等)会直接影响接触面的抗剪强度<sup>[14-15]</sup>,可以用峰值抗剪强度和残余抗剪强度来描述接触面的力学特性。其它科研单位也相继研制出多种用于研究土与结构接触面力学特性的装置<sup>[16]</sup>,这些都为更加深入地开展冻结接触面地研究提供了技术条件和试验方法。虽然上述研究成果丰富,但多是集中于对盐渍土、冻土本身或是冻土与结构接触面,特别针对盐渍化冻土与混凝土结构接触面力学特性的却鲜有研究。而盐对土的冻结有着重要的影响,在低温条件下盐在土中的相态变化直接影响到盐渍土的力学特性,进而影响到土与混凝土结构接触面的力学性能。

本文以山东地区位山灌区渠系工程为背景,针对渠道工程受冻害破坏严重这一问题,通过开展不同含盐类型、不同含盐量、不同法向应力的冻结盐渍土与混凝土衬砌接触面直剪试验研究,根据试验结果总结不同含盐类型、含盐量条件下接触面破坏变形规律,并对剪切破坏过程做出合理解释;此外,通过对4组法向应力作用下接触面抗剪强度数值关系分析,将得出接触面抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角)随含盐量的变化规律,以及初始状态下冻结强度与含盐类型、含盐量的关系。研究结果对进一步探究渠道冻胀破坏原因,做好工程防治,减少因渠道破坏而造成的水资源严重浪费,提高输水效率将有重要意义。

## 1 试验设备及试验方案

### 1.1 试验材料及设备

试验用土及混凝土衬砌均选自山东(聊城)位山灌区,通过易溶盐试验将测得的具体数据见表1。试验用土先用去离子水浸泡后,采用EC电导率笔

测滤液电导率值,并依据电导率与含盐量的关系,进一步换算出土中盐分的含量,多次浸泡,直至土样的含盐量低于0.1%(含盐量低于0.1%时,认为洗盐完成)。洗盐后土样的物理性质指标见表2。本次试验选取抗冻标号为F150,抗渗标号为W8的混凝土衬砌板,其强度等级为C20,加工后的混凝土试件直径为61.8 mm,厚度为20 mm。试验主要用到的试验设备有南京宁曦土壤仪器厂生产的为ZJ(DSJ-3)型应变控制式直剪仪以及中科美菱DW-HL290型超低温冷冻储存箱。

## 1.2 试验方案

综合分析表1和山东聊城盐碱地分布规律,本文以氯化钠(氯盐渍土)及硫酸钠(硫酸盐渍土)为研究对象。盐度梯度设置为素土、0.5%、1%、2%、4%,法向应力选取100、200、300、400 kPa,含水率为最优含水率16.7%,开展共36组试验。试样的制备是先称取定量素土和分析纯的NaCl(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),掺和

均匀后,用喷水器向土中定量喷水,充分拌和后用保鲜袋密封保存24 h。然后,对试验土样进行标准击实试验,选用直径为61.8 mm,高度为40 mm内壁涂有凡士林的带边环刀,依次完成土样的钻取和混凝土装仓,试样制备好后立即用保鲜膜将环刀包裹好并置于冰箱中-10℃冻结24 h。冻结结束后,使用自制可调节土工脱模装置将试样取出,并置于预冷好的剪切盒中进行剪切速度为2.4 mm/min的快速直剪试验。剪切盒预冷后装样,可以有效降低外界温度对试样的影响,加之每次剪切过程可以在2~3 min内完成,基本可以忽略试验环境(温度)对试验结果的影响。

表1 原土样中各离子的含量

Table 1 The cations and anions content in the in-situ soil  
单位:mg/kg

成份	Na <sup>+</sup> 、 K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、 CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	含盐
含量	187.5	72.35	58.15	64.75	56.95	46.2	0.285

表2 洗盐后土的物理性质指标

Table 2 Physical properties of the soil after desalting treatment

物理指标	塑限/%	液限/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	不同粒径(mm)粒度分布/%			
				>0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
数值	21.38	27.75	1.67	7.18	37.68	46.19	8.7

## 2 氯化钠对冻结强度的影响

### 2.1 氯盐渍土剪切应力-位移特征

图1为不同法向应力条件下氯盐渍土-混凝土衬砌冻结接触面直剪过程中剪切应力 $\tau$ 与剪切位移 $\mu$ 的关系曲线(以下简称 $\tau-\mu$ 曲线)。从图中可以看出,在剪切试验初期,两者的 $\tau-\mu$ 曲线皆会出现剪应力随剪切位移成比例增加的线弹性阶段,曲线斜率(剪切模量)与法向应力正相关,随含盐量的增加而降低。对图1(a)而言,其破坏形式为脆性破坏, $\tau-\mu$ 曲线会出现明显的应力峰值,当达到峰值应力后,接触面发生破坏曲线迅速下降,并伴随着剪应力释放,而应力释放量则与法向应力和含盐量有关,与法向应力正相关,随含盐量增高释放现象逐渐减弱。应力释放结束后,曲线趋于稳定,近似为一条水平线。对图1(b)而言,其破坏形式为塑性破坏,剪切过程可以分为3个阶段,即线弹性阶段、应变硬化阶段、屈服阶段。剪切试验初期, $\tau-\mu$ 曲线

近似为一条直线;当剪应力达到某值后,应力随位移增加缓慢,曲线发生弯曲,进入应变硬化阶段,此时,法向应力越大,应变硬化阶段越明显;应变硬化结束后, $\tau-\mu$ 曲线近似为一条水平直线,应力不再随位移变化,接触面完全屈服。

试验结果表明:冻结状态下氯盐渍土与混凝土接触面在低含盐量时的破坏性状为脆性破坏,具有明显的峰值应力,且在剪切过程中存在明显的黏滞滑移现象,但随着氯化钠含量的增加,黏滑现象逐渐减弱。这是由于抗剪强度的来源是内摩擦角和黏聚力<sup>[11]</sup>,含盐量越低,对冻结温度的影响越小,接触面上冰晶数量越多,所能提供的黏聚力也就越大,剪切破坏的过程实则是接触面上冰晶破坏的过程,应力释放的多少直接取决于冰晶数量和冰胶结强度;随着氯化钠含量的增加,冻结温度降低,使得冰晶数量减少的同时,也降低冰晶的胶结强度;而黏滞滑移现象的产生则是由于剪切破坏后,接触面上已破坏的冰晶随着位移的增加,发生了低温重组,重组后的冰晶将继续抵抗剪切变形<sup>[9]</sup>。但当氯

化钠含量超过2%后,即使剪切位移不断增加,但由于接触面上的冰晶数量不足,无法再次凝结,导致黏滞滑移现象消失,剪应力直接达到屈服强度,其破坏性状表现为塑性破坏;在这一过程中,接触表面土颗粒间的重新排列,使得 $\tau-\mu$ 曲线出现短暂的应变硬化阶段。下文中对于脆性破坏,将取其峰值应力为抗剪强度;对于塑性破坏,将取屈服强度作为接触面的抗剪强度,并将试验所得的抗剪强度结果见表3。

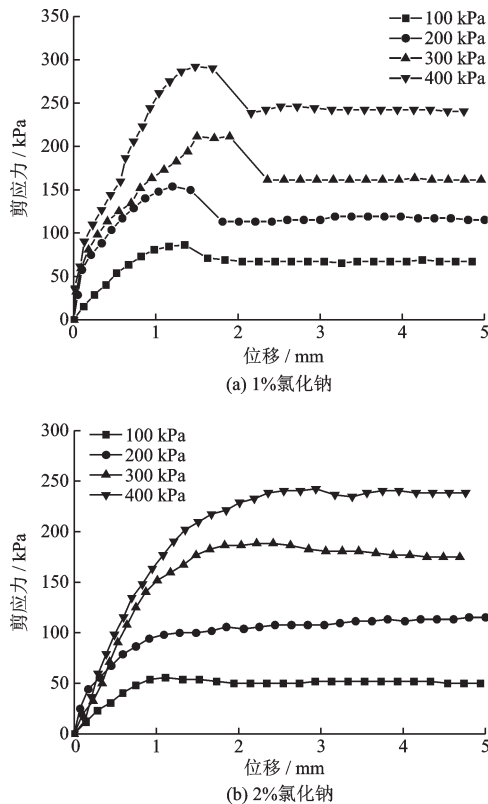


图1 氯盐渍土的剪切应力-剪切位移曲线

Fig.1 Relations between shear stress and shear displacement under different normal stresses and at NaCl contents of 1%(a) and 2%(b)

## 2.2 氯化钠含量对接触面冻结强度的影响

图2为不同含盐量条件下氯盐渍土-混凝土衬砌接触面冻结强度与法向应力的关系曲线。依据库伦公式:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, $\tau$ 为抗剪强度; $c$ 为黏聚强度; $\sigma$ 为法向应力; $\varphi$ 为内摩擦角,该式常用于计算土体的抗剪强度,且对土与混凝土的接触面冻结强度的试验结果也同样具有很强的适用性,即拟合曲线的斜率大小可以反

映接触面内摩擦角的大小,曲线与纵坐标轴的截距值可以反映了接触面黏聚力的变化<sup>[10]</sup>。

由图2可见,在各法向应力作用下,随氯化钠含量的增加,盐渍土与混凝土的抗剪强度均发生降低。这是由于 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 离子对冻结温度的影响显著,随着氯化钠含量的增加,冻结温度逐渐降低,冰晶数量减少,胶结作用减弱,致使接触面冻结强度降低。当氯化钠含量低于2%时,各曲线斜率基本相同,内摩擦角基本不变;当氯化钠含量高于2%后,在法向应力为100 kPa,含盐量为2%和4%时,接触面的抗剪强度相差3.85 kPa,而当法向应力变为400 kPa时,二者的抗剪强度相差13.46 kPa,差值明显增加,曲线斜率也开始降低,内摩擦角减小。结合图1的试验结果表明:氯化钠含量为2%是接触面由脆性破坏向塑性破坏的转折点。当氯化钠含量低于2%时,随着氯化钠含量的增加,冻结温度随之降低,接触面上的冰晶数量与冰胶结强度也随之降低,进而使得黏聚力降低,即初始状态下接触面的冻结强度降低,同时,因为氯化钠溶解度受温度影响小,即使是低温条件下,氯化钠也不容易结晶析出,所以氯化钠在土中更多的是以离子的形式存在,其含量的增加对接触面内摩擦角的影响较小;随着氯化钠的含量增大至2%时,此时 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 离子对土冻结温度的影响达到峰值,接触面上冰晶难以形成,不存在胶结作用,结合表3发现接触面的黏聚力也出现负值,此时,抗剪强度主要来自于接触面的内摩擦角。而在含水率一定的情况下,氯化钠含量的继续增加,使得土颗粒周围的离子浓度变大,土颗粒的水膜厚度增加,在接触面的剪切过程中起到了润滑的作用,使得接触面上内摩擦角降低。剪切试验结束后的观察也证实,当含盐量超过2%时,破坏后的接触面上会出现少量的未冻水。

## 3 硫酸钠对冻结强度的影响

### 3.1 硫酸盐渍土剪切应力-位移特征

图3为硫酸盐渍土 $\tau-\mu$ 曲线,其中(a)、(b)分别对应的硫酸钠含量为1%、2%。从图中可以看出,二者的破坏形式均为脆性破坏,接触面的破坏过程分为3个阶段:(1)线弹性阶段:剪应力与剪切位移呈正比,此时接触面在剪应力作用下发生弹性变形,在此阶段结束时会出现短暂的应变硬化;(2)黏

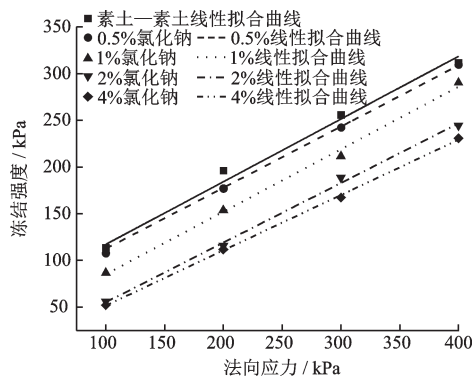


图2 氯盐渍土的冻结强度包络线

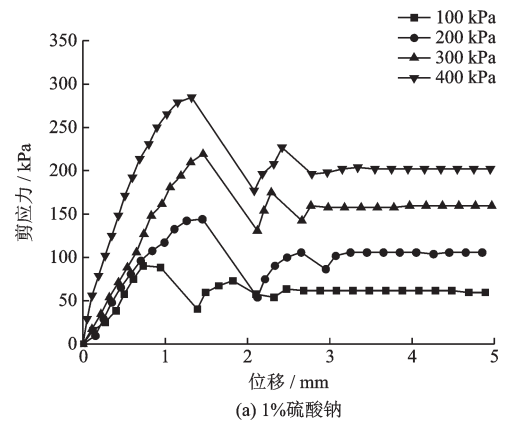
Fig.2 Frozen strength envelope of chlorine saline soil

滞滑移阶段:当剪应力达到峰值时,在听到断裂声后,剪应力与剪切位移均发生突变,剪应力下降到一定程度后,又开始随着剪切位移的增大而增大,当应力再次增大到一定程度后,又开始降低,如此循环多次,且每次转折时的应力差值减小,最终达到平衡;(3)屈服阶段:应力达到平衡,不再随剪切位移的增大而产生大的波动, $\tau-\mu$ 曲线在该阶段为一条水平线。

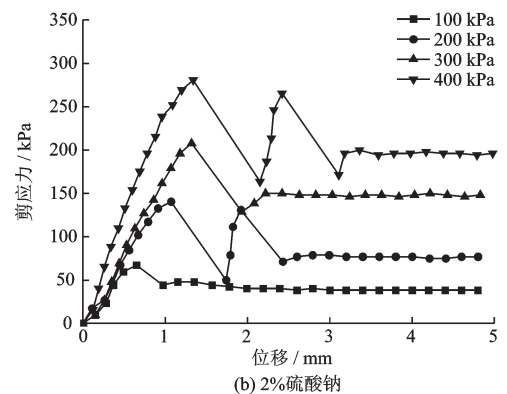
对比图1、3不难发现:二者的 $\tau-\mu$ 曲线具有很多异同点,在剪切试验初期都存在明显的线弹性阶段,且剪切模量与法向应力正相关。但在相同含盐量条件下,硫酸盐渍土接触面在发生剪切破坏后,其 $\tau-\mu$ 曲线会在多次波动后达到屈服;这是因为不同离子对土冻结温度的影响存在差异性,氯离子对土冻结温度的降低作用远大于硫酸根离子<sup>[6]</sup>。相同含盐量条件下,氯化钠通过降低冻结温度使得已冻水向未冻水转化,而未冻水含量的增大对剪切破坏起到缓冲作用,同时促使剪切变形向塑性变形发展。相对而言,硫酸盐渍土的冻结温度高于氯盐渍土,这就使得硫酸盐渍土冰晶数量较多,在剪切破坏发生后,冰晶可以发生多次重组,但每次参与重组的冰晶数量逐渐减少,最终达到平衡。根据试验结束后的观察结果显示,对于发生脆性破坏的土体表面会出现破碎冰晶。

### 3.2 硫酸钠含量对接触面冻结强度的影响

图4为不同含盐量条件下硫酸盐渍土与混凝土衬砌接触面冻结强度与法向应力的关系曲线。由图可见,在各法向应力作用下,随硫酸钠含量的增加,冻结强度逐渐降低。硫酸钠在土中以两种方式存在:一种是以离子的形式溶于未冻水中,另一种则会结合10个水分子以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体(芒



(a) 1%硫酸钠



(b) 2%硫酸钠

图3 硫酸盐渍土的剪切应力-剪切位移曲线

Fig.3 Relations between shear stress and shear displacement under different normal stresses and at  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  contents of 1%(a) and 2%(b).

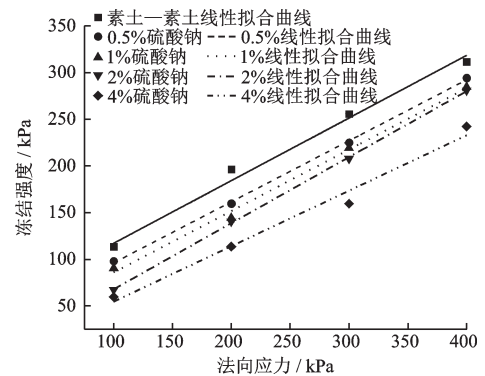


图4 硫酸盐渍土的冻结强度包络线

Fig.4 Frozen strength envelope of sulphate saline soil

硝)的形式析出<sup>[6]</sup>,使得冰晶数量减少,冻结强度降低。当硫酸钠含量低于2%时,各曲线斜率基本相同,内摩擦角基本不变;硫酸钠含量达到4%时,曲线斜率明显降低,内摩擦角减小。结合表3中数据分析:当含盐量不超过2%时, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体的析出主要是降低了冰晶的胶结作用,而对于接触面摩擦角的影响不大;随着硫酸钠含量的不断增加,土中析出的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体增多,它们会均

表3 抗剪强度试验结果

Table 3 Test results of shear strength

盐类型	含盐量/%	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
氯化钠	无盐土	113.46	196.15	255.76	311.53	33.15	55.76
	0.5	107.69	176.92	242.30	309.60	33.86	41.34
	1	86.61	153.84	211.53	290.30	33.74	18.38
	2	55.77	115.38	188.45	244.22	32.54	-8.65
	4	51.92	111.53	167.30	230.76	30.63	-7.69
硫酸钠	0.5	148.07	169.22	224.99	294.22	33.15	30.76
	1	144.23	173.07	219.22	278.8	33.07	19.23
	2	71.15	140.38	198.07	246.1	30.2	18.26
	4	59.61	119.23	153.84	236.5	29.47	0.961

匀的分布在接触表面,与冰晶一起形成一层晶体膜,起到润滑作用,降低了接触面的内摩擦角。试验结束后的观察发现,当硫酸钠含量为4%时,接触面上出现一层晶体膜。

## 4 讨论

本文以混凝土衬砌块试块和位山灌区渠基土为研究对象,开展了不同盐类型、不同含盐量、不同法向应力条件下盐渍土与混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究。

依据库伦公式,接触面的抗剪强度受黏聚强度、法向应力、内摩擦角3个因素影响,当法向应力为零时,抗剪强度等于黏聚强度,结合本试验,其代表的是接触面在无荷载作用下的初始冻结强度,通过4组法向应力与抗剪强度的关系,很容易确定接触面的初始冻结强度,进而研究不同含盐类型与不同含盐量对初始冻结强度的影响。不难发现表3中的黏聚力实际上反映的是接触面的初始冻结强度,当黏聚力为零或为负值时,表示土与混凝土未发生冻结,接触面丧失了初始冻结强度,其与含盐量关系如图5所示,可以发现氯盐渍土试样初始冻结强度在含盐量接近2%(约为1.7%)时已经为零,而硫酸盐渍土在含盐量为4%时,初始冻结强度接近零。通过研究盐对接触面初始冻结强度的影响,可总结盐渍土与衬砌接触面的力学性能变化规律,要比单纯分析抗剪强度变化更加直观。

## 5 结论

(1)盐渍土与混凝土衬砌接触面在冻结状态下

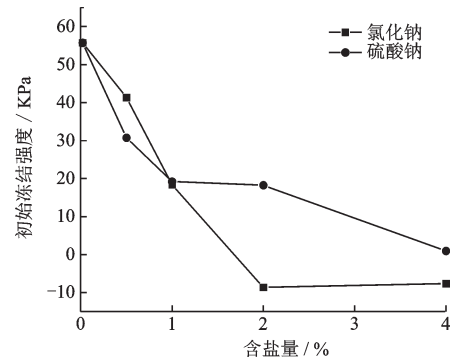


图5 初始冻结强度随含盐量的变化过程

Fig.5 Initial frozen strength versus salt contents

的应力一位移破坏性状会随含盐量的不同而改变。含盐量较低时,其破坏性状均为脆性破坏,存在明显的应力峰值;含盐量较高时,硫酸盐渍土的破坏性状仍为脆性破坏,而氯盐渍土的破坏性状变为塑性破坏,氯化钠含量为2%是脆性破坏与塑性破坏的转折点。

(2)接触面的初始冻结强度来源于接触面上起胶结作用的冰晶,同时受到含盐量和含盐类型的影响。含盐量的影响体现在随着含盐量的增加初始冻结强度逐渐降低;含盐类型对初始冻结强度的影响体现在作用机理不同:氯化钠主要通过降低土的冻结温度,加快土中已冻水向未冻水转化,进而影响冰晶数量和冰胶结强度;硫酸钠主要依靠结合土中水生成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,降低冰晶含量,使得初始冻结强度降低。

(3)含盐量对接触面抗剪强度指标的影响具有两阶段性。以氯盐渍土为例,当氯化钠含量低于2%时,随含盐量的增加,黏聚力降低,内摩擦角基本不变;当氯化钠含量超过2%时,随含盐量的增加,内摩擦角减小,黏聚力基本不变。

(4)氯化钠比硫酸钠对接触面初始冻结强度的

影响显著。当氯化钠含量为2%时,初始冻结强度已完全丧失;当硫酸钠含量为4%时,初始冻结强度才接近为零。

## 参考文献:

- [1] 田亚护, 房建宏, 许国琪. 多年冻土区道路排水渠道病害的防治现场试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(增1): 99-104.  
Tian Y H, Fang J H, Xu G Q. Field test on damage prevention measures of road drainage canal in permafrost regions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(Sup1): 99-104. (in Chinese)
- [2] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793-815.
- [3] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [4] Sung-gyu Ko, Chang-ho Choi. Experimental study on adfreeze bond strength between frozen sand and aluminum with varying freezing temperature and vertical confining pressure[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2011, 27(9): 67-76.
- [5] Chang-ho Choi, Sung-gyu Ko. A study for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen soil[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2011, 27(10): 13-23.
- [6] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Xu X Z, Wang J Ch, Zhang L X. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
Tong Ch J, Guan F N. Frost heaving and the prevention of freezing damage [M]. Beijing: China Water Power Press, 1985. (in Chinese)
- [8] 董盛时, 董兰凤, 温智, 等. 青藏冻结粉土与混凝土基础接触面本构关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1 629-1 633.  
Dong Sh Sh, Dong L F, Wen Zh, et al. Study of constitutive relation of interface between frozen Qinghai-Tibet silt and concrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1 629-1 633. (in Chinese)
- [9] 陈良致, 温智, 董盛时, 等. 青藏冻结粉土与玻璃钢接触面本构模型研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 402-408.  
Chen L Zh, Wen Zh, Dong Sh Sh, et al. Study of the constitutive model of interface between frozen Qinghai-Tibetan silt and reinforced plastic fiberglass [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 402-408. (in Chinese)
- [10] 温智, 俞祁浩, 马巍, 等. 青藏粉土-玻璃钢接触面力学特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 45-50.  
Wen Zh, Yu Q H, Ma W, et al. Direct shear tests for mechanical characteristics of interface between Qinghai-Tibetan silt and fiberglass reinforced plastics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 45-50. (in Chinese)
- [11] 温智, 俞祁浩, 张建明, 等. 青藏直流输电工程基础冻结强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2 262-2 267.  
Wen Zh, Yu Q H, Zhang J M, et al. Experimental study on adfreeze bond strength of interface between silt and foundation of Qinghai-Tibetan transmission line [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2 262-2 267. (in Chinese)
- [12] 陈炜韬, 王鹰, 王明年, 等. 冻融循环对盐渍土粘聚力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2 343-2 347.  
Chen W T, Wang Y, Wang M N, et al. Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2 343-2 347. (in Chinese)
- [13] 崔颖辉, 刘建坤, 吕鹏. 冻土动荷载直剪仪的研制[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 486-490.  
Cui Y H, Liu J K, Lyu P. Development of dynamic load direct shear apparatus for frozen soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 486-490. (in Chinese)
- [14] 吕鹏, 刘建坤. 冻土与混凝土接触面直剪试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 106-110.  
Lyu P, Liu J K. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 106-110. (in Chinese)
- [15] 章赛泽, 卞汉兵, 邱秀梅, 等. 渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 164-169.  
Zhang S Z, Bian H B, Qiu X M, et al. Direct shear tests on frozen interface between underlying soil and concrete lining of channels [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 164-169. (in Chinese)
- [16] 孙厚超, 杨平, 王国良. 冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3 636-3 643.  
Sun H Ch, Yang P, Wang G L. Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3 636-3 643. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)