

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0060

SUN Zhaohui, BIAN Hanbing, LU Xiangyu, et al. Direct shear tests of interface between salinized frozen soil and concrete lining[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 556-562. [孙兆辉, 卞汉兵, 鹿翔宇, 等. 盐渍化冻土-混凝土衬砌接触面直剪试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 556-562.]

盐渍化冻土-混凝土衬砌接触面直剪试验研究

孙兆辉¹, 卞汉兵^{1,2}, 鹿翔宇¹, 章赛泽¹, 邱秀梅¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 洛林大学 微观结构与材料力学实验室, 法国 梅兹 57045)

摘要: 土与结构接触面的研究一直以来是岩土工程研究的热点之一。为研究位山灌区渠系工程冻害破坏问题, 开展了不同盐类型、不同含盐量、不同含水率条件下渠道下卧盐渍土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究。结果表明: 冻结状态下接触面的应力-位移破坏性状呈脆性破坏, 存在明显的峰值应力; 剪切变形包括线性变形和非线性变形, 线性变形随含水率和含盐量的增大而减小, 非线性变形随含盐量的增大而增加; 剪切模量随含水率的增加而提高; 随含盐量的增加而降低; 抗剪强度随含水率的增加而增大, 随 NaCl 含盐量增加而降低, 随 Na₂SO₄ 含盐量增加先降低后升高; 通过对变形能的分析发现, 含水率 $w = 14.7\%$ 和 $w = 16.7\%$ 时具有相似特征, 即 NaCl 含量为 0.5% 时, 曲线存在极(最)小值。

关键词: 盐渍土; 混凝土衬砌; 冻结; 接触面; 抗剪强度

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)03-0556-07

0 引言

近年来, 随着国家大力发展节水农业等相关决议的提出, 减少灌溉渠道破坏, 提高使用寿命和输水效率变得尤为重要。就渠道工程破坏问题而言, 虽然其形式多种多样, 但破坏机理基本相似, 土体中的孔隙水在低温条件下结晶, 导致土体体积膨胀, 其以荷载形式通过下卧土与渠道衬砌冻结接触面传递到上部衬砌结构, 当传递的荷载超出上部衬砌结构的承载力, 衬砌结构破坏。因此, 下卧土与渠道衬砌冻结接触面的力学性能直接决定其承受荷载的能力, 是渠道冻害破坏的关键问题。

早期学者通过室内试验、理论推导等在土与结构接触面方面取得了许多有价值的成果。Desai 等^[1]、Potyondy^[2] 利用直剪仪开展了多种土与结构材料接触问题的研究。Clough 等^[3] 在试验的基础上, 提出了双曲线模型, 因模型简单而被广泛使用。Brandt 等^[4] 通过对室内及现场试验分析, 提出

刚塑性模型, 用两折线图来描绘应力-位移关系。国内学者也在接触面的力学性能研究方面取得了重要成果^[5-6]。一些学者依托冻土工程国家重点实验室, 开展直剪试验研究, 温智等^[7]、陈良致等^[8] 研究了负温环境下青藏粉土与玻璃钢以及混凝土接触面的力学性能, 并建立了相应的本构模型。董盛时等^[9] 给出了青藏冻结粉土与混凝土基础接触面之间的本构关系。还有学者通过改进试验仪器取得了许多优秀成果, 崔颖辉等^[10]、吕鹏等^[11-12] 开发了一种低温动荷载直剪仪, 并用峰值抗剪强度和残余抗剪强度来描述冻土与混凝土抗剪强度, 他们认为土的含水率以及土质变化(如级配和盐度)会影响接触面的抗剪强度。

盐分对土壤冻结有重要影响。冻结接触面的力学及变形性能不仅与土的类型, 法向应力, 冻结温度, 冻结时间有关, 还会受到土中盐分的影响^[13], 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

收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2018-02-22

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目“南水北调平原水库运行期健康诊断及防护技术与示范”(2015BAB07B05); 山东省重点研发计划项目“渠道衬砌冻融破坏机理与工程防治措施研究”(2017GSF16104)资助

作者简介: 孙兆辉(1991-), 男, 山东泰安人, 2015年在中南林业科技大学获学士学位, 现为山东农业大学在读硕士研究生, 从事盐渍土、冻土力学性质方面的研究。E-mail: Msrnzhaohui@163.com

通信作者: 邱秀梅, E-mail: qxmxr@126.com.

的力学性能^[14]。然而,多数学者对盐渍土的研究或集中在冻胀及盐胀性分析^[15],或集中于常温条件下含盐量及含水率对抗剪强度参数的影响^[16-17],特别针对盐渍化冻土与混凝土结构接触面力学特性的研究却鲜有涉及。

山东地区盐渍土广布,含盐量及含盐类型具有明显差异性^[18],渠道工程多直接修筑在盐渍土上,不可避免地受到盐渍土的影响。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,开展多条件下(含水率、含盐量、含盐类型)渠基盐渍土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究,其结果对于探究渠道破坏原因,做好工程防护,减少因渠道破坏而造成的水资源严重浪费,提高输水效率具有重要意义。

1 试验设备及试验方案

1.1 试验材料及设备

试验所用渠基盐渍土与混凝土衬砌均取自黄河

下游最大的引黄灌区——山东位山灌区,从研究盐渍土的工程性质入手,首先进行土体易溶盐分析,具体测试结果整理在表 1 中。然后,对试验所用盐渍土用去离子水进行洗盐处理。洗盐时,向含有定量盐渍土的桶中按照 1:10 的质量关系注入去离子水,充分搅拌后静置 24 h,待上部土样浸出液澄清后,抽取上部土样浸出液,并使用 EC 电导率测试其电导率值,依据电导率与含盐量的关系换算得出土样中盐分的含量,当土样中的含盐量低于 0.1% 时,认为土样洗盐完成,否则重复上述操作。将洗盐后的土样置于烘箱,在 105 ℃ 条件下烘 24 h 后碾碎,过 2 mm 分析筛,并用保鲜袋密封后储存于干燥器内备用,经洗盐处理土样的物理性质指标列于表 2。渠道衬砌为混凝土板,其抗冻标号为 F150,抗渗标号为 W8,混凝土强度等级为 C20,将混凝土衬砌板加工成直径 61.8 mm,厚度 20 mm 的试件,并保证混凝土与土样接触面为原衬砌板下底面使试件下底面与土接触。

表 1 原土样中各离子的含量

Table 1 Concentrations of cations and anions in the in-situ soil

阳离子/(mg·kg ⁻¹)			阴离子/(mg·kg ⁻¹)			总含盐量/%
Na ⁺ 、K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ 、CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	
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 The physical properties of the soil after desalting treatment

土类	塑限 /%	液限 /%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	不同粒径粒度分布/%			
				>0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
粉质黏土	21.38	33.53	1.67	7.18	37.68	46.19	8.7

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及中科美菱 DW-HL290 型超低温冷冻储存箱。直剪仪最大垂直荷载为 400 kPa,剪切速率为 2.4、0.8、0.1、0.02 mm·min⁻¹,量力环精度为 0.01 mm。超低温冷冻储存箱存储温度 -87 ~ -5 ℃,温度控制精度为 ±0.5 ℃。

1.2 试验方案

本试验根据山东聊城盐碱地分布规律^[18]及原土样中各离子含量表,综合分析后选取氯化钠和硫酸钠作为主要的研究对象,试验含盐量($m_{\text{盐}}/m_{\text{土}}$)分别为 0.02% (无盐土)、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%,含水率在最优含水率 16.7% 基础上,增设 14.7% 和 18.7%,共计 27 组。本试验中对同一控

制参数的试验采用同一混凝土衬砌。不同试样试验数值对比列于表 3。

不同含盐量、不同含水率土样的制备是按照试验设计含盐量和含水率,先配置相应浓度的盐溶液,然后称取定量无盐干土,用喷水器向土中定量喷洒盐溶液,充分拌和后置于保鲜袋中密封保存 24 h。然后对试验土样进行标准击实试验,用环刀切取直径 61.8 mm,高度 20 mm 的土样。为避免土样与衬砌试样接触时水分流失,将衬砌试件饱和和处理后置于下剪切盒中,插入固定销,然后将土样压入上剪切盒,施加 50 kPa 竖向荷载压实 1 h,使土与衬砌充分接触,最后,将剪切盒整体放入冷冻储存箱,在 -10 ℃ 环境下冻结 24 h。采用剪切速度为 0.8 mm·min⁻¹,考虑实际工程中荷载较小,

表3 不同试样试验数值对比
Table 3 Sodium chloride or sodium sulfate contents and water contents of the specimens

编号	氯化钠含量 /%	含水率 /%	编号	硫酸钠含量 /%	含水率 /%
1-1	0.02	14.7	-	-	-
1-2a	0.25	14.7	1-2b	0.25	14.7
1-3a	0.50	14.7	1-3b	0.50	14.7
1-4a	0.75	14.7	1-4b	0.75	14.7
1-5a	1	14.7	1-5b	1	14.7
2-1	0.02	16.7	-	-	-
2-2a	0.25	16.7	2-2b	0.25	16.7
2-3a	0.50	16.7	2-3b	0.50	16.7
2-4a	0.75	16.7	2-4b	0.75	16.7
2-5a	1	16.7	2-5b	1	16.7
3-1	0.02	18.7	-	-	-
3-2a	0.25	18.7	3-2b	0.25	18.7
3-3a	0.50	18.7	3-3b	0.50	18.7
3-4a	0.75	18.7	3-4b	0.75	18.7
3-5a	1	18.7	3-5b	1	18.7

选取竖向荷载为 50 kPa 的快速剪切试验, 保证试验基本可以在 1~3 min 内完成, 试验以听到断裂声, 或测力计指针不再前进甚至倒退作为试样已发生剪切破坏的标志。整个试验过程参照土工试验规程 (SL237-1999) 和土工试验方法标准 (GB/T 50123-1999)。

2 试验结果分析

2.1 盐渍土-混凝土衬砌冻结接触面剪切应力-位移特征

图 1 为氯盐渍土与混凝土衬砌接触面剪切过程中剪切应力 τ 与剪切位移 μ 的关系曲线 (以下简称 $\tau-\mu$ 曲线), 土体的含水率 w 分别为 14.7%、

16.7%、18.7%。从图 1 中可以看出, 无盐土、0.25% 含盐量试样的 $\tau-\mu$ 曲线形态相似, 在剪切试验开始后短时间内呈单调递增, 增速较大, 曲线较陡, 之后 $\tau-\mu$ 曲线趋于平缓, 增速减慢直至试样破坏, 其 $\tau-\mu$ 曲线增长可以归结为先快-后慢型; 含盐量为 0.75% 和 1.00% 试样剪切应力在试验过程持续增长, 但增速逐渐降低, $\tau-\mu$ 曲线趋于平缓直至试样破坏, 其 $\tau-\mu$ 曲线增长可以归结为缓慢增长型。对于 $w = 14.7\%$ 的试样最大剪切位移 μ_{\max} 随含盐量的增加呈现先减后增的趋势, 当含盐量为 0.50% 时, 其 μ_{\max} 最小; 对于 $w = 16.7\%$ 的试样在 NaCl 含量低于 0.50% 时, μ_{\max} 无明显变化, 当 NaCl 含量超过 0.50% 时, μ_{\max} 随含盐量的大而增加; 对于 $w = 18.7\%$ 的试样, 随着含盐量的增加, 其 μ_{\max} 逐渐增大, 但增幅逐渐减小。

对于先快-再慢型曲线, 会出现应力随位移成比例增加的线性阶段, 以无盐土为例, 初步判断图 1(a)、1(b)、1(c) 中无盐土 $\tau-\mu$ 曲线线性区段依次为 0~0.45 mm、0~0.4 mm、0~0.35 mm, 随含水率的增加, 线性区段减小; 对于先快-后慢型曲线, 无明显的线性关系, 在剪切试验初期, 曲线的切线斜率最大, 随着剪切试验的进行, 斜率逐渐降低, 直至试样发生破坏。

试验结果表明, 试样冻结状态下发生破坏时, 测力计指针发生明显倒退甚至归零, 表明盐渍土与混凝土接触面破坏性状为脆性破坏型, 存在明显的峰值应力。对于 $\tau-\mu$ 曲线增长为先快-后慢型, 由于初始氯化钠含量较低, 接触面处冰晶含量较多, 胶结作用较强, 抗剪切变形能力较强, 因抗剪强度主要受冰胶结作用影响, 所以剪切位移与剪切应力之间具有明显的线性关系。当试样的含水率不变时, 随含盐量增加, 其剪切模量减小 (曲线斜率减

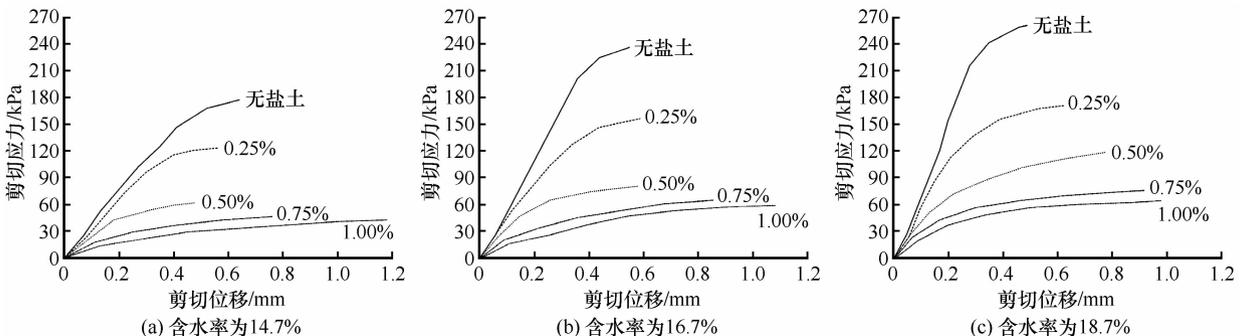


图 1 剪切位移与剪切应力曲线

Fig. 1 The shear stress vs. the direct shear displacement for the specimens with various salt contents and water contents of 14.7% (a), 16.7% (b) and 18.7% (c)

小), 线性区段减少, 非线性区段增加; 当含盐量相同时, 随含水率增高, 其剪切模量增大, 但线性区段减少。对于 $\tau-\mu$ 曲线增长为缓慢型, 由于初始氯化钠含量较高, 冰点降低较大, 接触面处冰晶含量较少, 胶结作用较弱, 抗剪切变形能力较弱, 抗剪强度受冰胶结力、黏聚力与摩擦力共同作用, 其剪切过程无明显的线性区间, 其应力应变关系以非线性关系为主。当含水率不变时, 剪切位移随含盐量的增大而增加, 但增速减慢。

2.2 含盐量与含盐类型对冻结接触面抗剪强度的影响

图 2 为不同含水率条件下抗剪强度与含盐量关系曲线。图 2(a) 的土样的含盐类型为氯化钠, 可以看出, 在含水率为 14.7%、16.7%、18.7% 条件下, 其抗剪强度随含盐量变化的拟合曲线具有明显的相似性。当含盐量不超过 0.5% 时, 随含盐量的增大, 抗剪强度迅速降低, 曲线较陡; 当含盐量超过 0.5% 后, 其抗剪强度随含盐量的增大继续降低, 但减速变慢, 曲线趋于平缓。通过对其拟合曲线分析, 得出在 $\bar{T} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 50\text{ kPa}$, $h = 24\text{ h}$, $14.7\% \leq w \leq 18.7\%$, $0.02\% \leq S \leq 1\%$ 范围内 τ_{\max} 为:

$$\tau_{\max} = 200S^2 - 370S + C_1 \quad (1)$$

式中: \bar{T} 为冻结试验平均温度 ($^{\circ}\text{C}$); σ 为法向应力 (kPa); h 为冻结时间 (h); S 为含盐量 (%); C_1 为常数项 (C_1 的大小与含水率有关, 以 $w = 16.7\%$ 为

例, C_1 的取值为 230)。

图 2(b) 的土样的含盐类型为硫酸钠, 可以看出, 在含水率为 14.7%、16.7%、18.7% 条件下, 其抗剪强度随含盐量的变化具有一定的相似性。当含盐量低于 0.75% 时, 其抗剪强度随含盐量的增加而降低, 当含盐量高于 0.75% 时, 抗剪强度会随含盐量的增大而增大。

通过对其拟合曲线分析, 得出在 $\bar{T} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 50\text{ kPa}$, $h = 24\text{ h}$, $14.7\% \leq w \leq 16.7\%$, $0.02\% \leq S \leq 1\%$ 范围内 τ_{\max} 为:

$$\tau_{\max} = 190S^2 - 260S + C_2 \quad (2)$$

式中: C_2 是常数项, 以 $w = 18.7\%$ 为例, C_2 的取值为 260。

试验结果表明, 不同的含盐类型对盐渍土-混凝土衬砌冻结接触面抗剪强度影响不同。盐渍土的冰点会随盐离子含量的增加而降低, 进而造成冰晶含量降低, 胶结作用减弱, 其冻结接触面的抗剪强度降低。而冻结过程中, 土中自由水含量的减少则会导致盐晶析出, 使得试样中的盐离子数量相对稳定, 因此氯盐渍土冻结接触面的抗剪强度随 NaCl 含量的增大先降低之后趋于稳定。与 NaCl 晶体不同, Na_2SO_4 晶体会以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在, 且体积较大, 盐晶填充空隙, 起骨架作用, 对抗剪强度的提升能起到积极作用。因此硫酸盐渍土冻结接触面的抗剪强度随 Na_2SO_4 含量的增大先降低后升高。

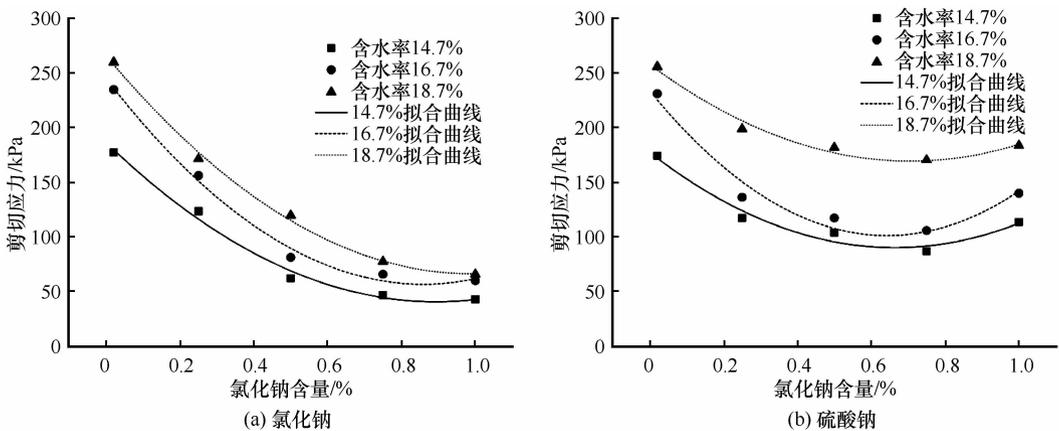


图 2 抗剪强度随含盐量变化过程

Fig. 2 Shear strength changing with sodium chloride content (a) and sodium sulfate content (b)

2.3 含盐量与含水率对变形能的影响

由于对接触面破坏的评估不仅需要考虑到抗剪强度, 还需要考虑到剪切变形, 因此, 引入材料力学中的变形能概念, 试样破坏前可以视为一整体, 在剪切作用下, 其抵抗剪切破坏的能力便可以用变形能

来表示, 变形能越大, 反映其接触面抵抗破坏的能力越强。对图 1 中 $\tau-\mu$ 曲线的实测数据进行处理, 得到不同含水率、不同含盐量下的应力-位移拟合曲线, 并对拟合后曲线进行定积分求解, 进而得出冻结接触面直剪试验的变形能列于表 4。

表4 不同含盐量、含水率条件下的变形能
Table 4 Deformation energy changing with salt content and water content

含盐量 /%	含水率 /%	峰值剪应力 /kPa	最大剪位移 /mm	变形能 / $\times 10^{-3}$ J
0.02	14.70	176.92	0.64	207.51
	16.70	234.61	0.56	231.54
	18.70	259.61	0.49	249.96
0.25	14.70	123.07	0.56	128.94
	16.70	155.76	0.69	175.38
	18.70	171.15	0.63	230.67
0.50	14.70	61.54	0.48	60.51
	16.70	80.77	0.58	105.87
	18.70	119.23	0.78	198.36
0.75	14.70	46.15	0.76	74.19
	16.70	65.38	0.86	119.67
	18.70	76.92	0.92	160.56
1.00	14.70	42.31	1.18	103.62
	16.70	59.61	1.09	136.41
	18.70	65.38	0.98	144.75

图3为变形能随含盐量和含水率的变化过程,可见,当氯化钠的含量在0.02%~1%范围内时,相同盐浓度下,含水率越高,冻结接触面的变形能越高。当 $14.7\% \leq w \leq 16.7\%$ 时,其变形能随含盐量的增加先降低后增高,其含盐量-变形能拟合曲线存在明显的极小值点;当 $w = 18.7\%$ 时,其拟合曲线单调递减。

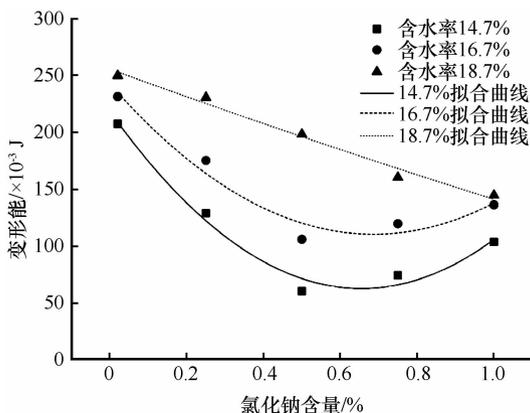


图3 变形能随含盐量和含水率变化过程

Fig. 3 Deformation energy changing with salt content and water content

试验结果表明,盐渍土与混凝土衬砌的剪切破坏是一种复杂破坏形态,以氯盐渍土为例,其破坏情况随含水率和含盐量的变化而变化。当含水率不

超过最优含水率时,其拟合曲线具有一定的相似性,即在含盐量为0.5%左右时承载力低,变形小,是最易发生剪切破坏的点;当含水率为18.7%时,其剪切破坏规律与上述不同,其抗剪强度在含盐量为0.02%~1%范围内具有良好的线性规律,即剪切破坏的危险点为含盐量最高点。

3 讨论

盐渍土与混凝土衬砌冻结接触面的抗剪强度来源主要包括:一是土中的自由水在低温下形成冰晶,冰晶与混凝土衬砌接触面通过胶结作用形成胶结力;二是土体与混凝土衬砌接触面之间的黏聚力与摩擦力。在竖向荷载不变的情况下,其冻结接触面的峰值抗剪强度主要受胶结力影响。而胶结力的大小除受土体含水率、冻结温度、冻结时间等因素的影响外,还会受到土中含盐量和含盐类型的影响。

随着盐渍土含水率的增大,土中自由水的含量增多,使得在低温环境下,自由水冻结形成的冰晶数量增多,胶结力增大,进而使得其冻结接触面的抗剪强度提升。

对于NaCl盐,其溶解度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内基本保持不变^[14],而冻土的冰点会随NaCl含量的增加而降低,同时使得冰晶含量降低,胶结作用减弱,其接触面的抗剪强度降低;除此之外,随着冰点的降低,使得冻土中的未冻水含量随含盐量的增大而增加,水分在接触面聚集,而未冻水的增加会导致土颗粒的水膜厚度增大,进而使得接触面的内摩擦角减小,接触面的抗剪强度降低,塑性增大。

对于 Na_2SO_4 盐,其溶解度随温度的降低下降较快^[19],当土中的溶液浓度大于其溶解度时,便会有硫酸钠晶体析出,并以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在。而盐晶的析出需要结合大量的水,使得冰晶含量降低,抗剪强度减小,而随硫酸钠溶液初始浓度的增大,其析出的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 盐晶含量也将增加,盐晶填充空隙,起到骨架作用,对抗剪强度的提升具有一定的效果,所以对于 Na_2SO_4 盐影响下的冻结接触面的抗剪强度是冰晶与盐晶共同作用的结果。

本文在考虑NaCl和 Na_2SO_4 溶液的性质基础上,分析了氯盐和硫酸盐渍土与混凝土冻结接触面的变形机理,认为盐渍冻土与结构接触面的剪切过程是复杂的水、热、盐、力耦合过程,不同盐分、

不同含盐量、不同含水率的土体与结构接触面在剪切作用下表现出不同的特性。因此, 对于盐渍土的工程性质评价以及工程防治, 必须以动态、发展的眼光, 充分考虑随含盐类型、含盐量、含水率变化对盐渍化冻土与混凝土衬砌接触面力学性能的影响。

4 结论

本文以保留原接触面的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、不同含水率条件下渠道下卧盐渍土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究。通过对试验结果的整理分析得出的主要结论有:

(1) 盐渍土-混凝土衬砌接触面在冻结状态下的应力-位移破坏性状呈脆性破坏, 存在明显的应力峰值, 且破坏性状会随含盐量的增加有向塑性破坏发展的趋势。

(2) 冻结接触面的剪切位移包括线性变形和非线性变形, 其中线性区段随含水率和含盐量的增加而减小, 非线性区段主要受含盐量的影响, 随含盐量中的增加而增大; 其剪切模量随含水率的增加而增大, 随含盐量的增加而降低。

(3) 冻结接触面的抗剪强度受含水率, 含盐量, 含盐类型影响, 抗剪强度会随含水率的增大而增大, 当含盐量低于 0.75% 时, 抗剪强度会随含盐量的增加而降低, 含盐量高于 0.75% 时, NaCl 盐影响下的抗剪强度缓慢降低, Na₂SO₄ 盐影响下的抗剪强度逐渐提高。

(4) 通过对变形能的变化分析, 发现 NaCl 盐影响下的冻结状态下的接触面承载能力存在明显的易破坏点, 且破坏点与含水率和含盐量皆有关系。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials [J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4): 339-353.
- [3] Clough G W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior [J]. *Journal of Soil Mechanic and Foundation Division*, ASCE, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [4] Brandt J R T. Behavior of soil-concrete interface [D]. Edmonton: University of Alberta, 1985.
- [5] Zhang Ga, Zhang Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(10): 1177-1179. [张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(10): 1177-1179.]
- [6] Sun Houchao, Yang Ping, Wang Guoliang. Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 35(12): 3636-3643. [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): 3636-3643.]
- [7] Wen Zhi, Yu Qihao, Ma Wei, et al. Direct shear tests for mechanical characteristics of interface between Qinghai-Tibetan silt and fiberglass reinforced plastics [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 43(Suppl 2): 45-50. [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(增刊 2): 45-50.]
- [8] Chen Liangzhi, Wen Zhi, Dong Shengshi, 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. [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.]
- [9] Dong Shengshi, Dong Lanfeng, Wen Zhi, et al. Study of constitutive relation of interface between frozen Qinghai-Tibet silt and concrete [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1629-1633. [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): 1629-1633.]
- [10] Cui Yinghui, Liu Jiankun, Lü Peng. Development of dynamic load direct shear apparatus for frozen soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(Suppl 2): 486-490. [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(增刊 2): 486-490.]
- [11] Lü Peng, Liu Jiankun, Cui Yinghui. A study of dynamic shear strength of frozen soil-concrete contact interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(Suppl 2): 180-183. [吕鹏, 刘建坤, 崔颖辉. 冻土-混凝土接触面动剪强度研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊 2): 180-183.]
- [12] Lü Peng, Liu Jiankun. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(2): 106-110. [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.]
- [13] Zhang Saize, Bian Hanbing, Qiu Xiumei, 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. [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.]
- [14] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin, et al. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐教祖, 王家澄, 张立新, 等. 冻土物理学 [M], 北京: 科学出版社, 2001.]
- [15] Xiao Ze'an, Lai Yuanming, You Zheming. Experimental study on impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil under freeze-thaw conditions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 953-960. [肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 冻融循环作用下含盐量对 Na₂SO₄ 土体变形特征影响的实验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 953-960.]
- [16] Chen Weitao, Wang Mingnian, Wang Ying, et al. Influence of salt content and water content on the shearing strength parameters of chlorine saline soil [J]. *China Railway Science*, 2006, 27(4): 1-5. [陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水量对

- 氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 1-5.]
- [17] Bing Hui, Wu Junjie, Deng Jin. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 32(4): 796-800. [邴慧, 武俊杰, 邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796-800.]
- [18] Wang Zunqin, Liu Youchang, Li Liqun, et al. Formation conditions and distribution regularity of saline soil in Liaocheng, Shandong Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1963, 11(4): 343-360. [王遵亲, 刘有昌, 黎立羣, 等. 山东聊城盐渍土的形成条件及其分布规律[J]. 土壤学报, 1963, 11(4): 343-360.]
- [19] Ma Min, Bing Hui, Li Guoyu. Experimental research on unfrozen water content of sodium sulphate saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 963-969. [马敏, 邴慧, 李国玉. 硫酸钠盐渍土未冻水含量的实验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 963-969.]

Direct shear tests of interface between salinized frozen soil and concrete lining

SUN Zhaohui¹, BIAN Hanbing^{1,2}, LU Xiangyu¹, ZHANG Saize¹, QIU Xiumei¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; 2. Laboratory for the Study of Misconstructures and Materials Mechanics, Université de Lorraine, Metz 57045, France)

Abstract: The study of interface between soil and structure has been one of the hot spots in geotechnical engineering research. In order to study the frost damage of canal system in Weishan irrigation district, under the conditions of different salt species, different salt content and different water content, a series of direct shear tests for frozen interface between saline soil and concrete lining have been performed to study the mechanical properties of the frozen interface. The results show that failure model of frozen interface was brittle and an obvious peak stress could be observed. The shear deformation includes linear deformation and nonlinear deformation. The linear deformation decreases with the increase of water content and salt content, and the nonlinear deformation increase with the increase of salt content. The shear modulus increases with the increase of water saturation and decreases with the increase of NaCl concentration. The shear strength increases with the increase of water saturation, decreases as the salt content increases with NaCl, while it decreases first and increases as the salt is Na₂SO₄. Through the strain energy analysis, it is found that the characteristics of frozen interface with water content $w = 14.7\%$ and $w = 16.7\%$ are similar, that means when the NaCl content is 0.5% the shear strength is minimum.

Key words: saline soil; concrete lining; frozen; interface; shear strength

(本文编辑: 周成林)