



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.025

章赛泽, 卞汉兵, 董小花, 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 Sai ze, BIAN Han bing, QIU Xiur mei, 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)

渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究

章赛泽¹, 卞汉兵^{1,2}, 董小花³, 孙兆辉¹, 韩慧敏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. LEM3, CNRS7239, 洛林大学, 梅兹 法国 57045;
3. 滨州市小清河管理局, 山东 滨州 256600)

摘要: 为研究渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面抗剪强度及其随主要影响因素的变化规律, 采用直剪仪开展了不同含水率、冻结温度、法向应力及冻结时间条件下渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面直剪试验研究。结果表明: 剪切的初始阶段, 接触面存在局部剪应力释放现象, 释放量大小受土体含水率、法向应力、冻结时间因素影响, 但不受冻结温度的影响; 在本试验参数范围内, 接触面峰值抗剪强度随着土体含水率、法向应力、冻结时间的增加而增大, 随冻结温度的降低而增大; 接触面的抗剪强度实质上是冻土中的冰晶与混凝土衬砌接触面之间的胶聚力, 以及土体与混凝土衬砌接触面之间的黏聚力与摩擦力; 峰值抗剪强度大小主要受胶聚力影响; 黏聚力和摩擦力主要受法向应力、冻结时间的影响。

关键词: 接触面; 冻结; 抗剪强度; 下卧土; 混凝土衬砌; 剪应力

中图分类号: TU411.7 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)05-0164-06

Direct shear tests on frozen interface between underlying soil and concrete lining of channels

ZHANG Sai ze¹, BIAN Han bing^{1,2}, DONG Xiao hua³, SUN Zhao hui¹, HAN Hui min¹, QIU Xiur mei¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;
2. LEM3 CNRS7239, Universit de Lorraine, Metz 57045, France;
3. Xiaqing River Administrative Bureau of Binzhou, Binzhou 256600, China)

Abstract: In order to study the shear strength of the frozen interface between the underlying soil and concrete lining of channels and its variation with the main influencing factors, we conducted a series of direct shear tests on the frozen interface between the underlying soil and concrete lining of channels. In these tests, the main influencing factors, such as soil moisture content, freezing temperature, normal stress level, and freezing time, were taken into consideration and then analyzed in detail. The experimental results showed that there was a phenomenon of local shear stress release at the interface at the initial stage of the shear tests, and the release amount was influenced by normal stress, soil moisture content, and freezing time, but not affected by the imposed freezing temperature. Within the parameters scopes of these tests, the peak shear strength would increase with the increase of soil moisture content, normal stress, freezing time, and the decrease of freezing temperature. Essentially, the shear strength of the interface was the cementation force between the ice in the frozen soil and concrete lining, and the cohesive force and friction force between the underlying soil and concrete lining. The peak shear strength was mainly affected by cementation force. The cohesive force and friction force was mainly affected by normal stress and freezing time.

Key words: interface; frozen; shear strength; underlying soil; concrete lining; shear stress

收稿日期: 2016-10-26 修回日期: 2017-01-31 网络出版时间: 2017-08-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1928.019.html>
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAB07B00)

Fund: National Science and Technology Support Program(2015BAB07B00)

作者简介: 章赛泽(1993-), 男, 浙江温州人, 主要从事岩土与地下工程等方面研究。E-mail: zhangsaize@foxmail.com

通讯作者: 邱秀梅(1962-), 女, 山东东阿人, 教授, 主要从事土体工程安全等方面研究。E-mail: qxmxr@126.com

中国冻土分布十分广泛,多年冻土和季节性冻土的影响面积约占陆地总面积的70%^[1]。对于季冻区中的灌溉渠道而言,由于气候寒冷、持续时间长,极易发生渠道冻害破坏。在同一地质及水文地质条件下,渠道的结构设计、断面形式等不同,其遭受的冻胀破坏的部位、程度和形式也不同。在发生冻胀情况下,渠道破坏往往是从衬砌开始,例如发生衬砌的滑塌、折断、产生裂缝、隆起架空、表面剥落等,随之渠道的抗渗性能迅速下降,导致渠道渗漏而浪费水资源。尽管它们在冻害破坏形式上有所差异,但是它们在冻害破坏特征上有很多共同之处:冻胀都是由于下卧土孔隙水结晶粘聚,导致其体积膨胀。因而渠道冻胀破坏的程度主要取决于下卧土的冻胀引起的膨胀力。而下卧土的冻胀膨胀力主要取决于边界约束力,特别是渠道混凝土衬砌与下卧土的接触面力学性能。因此,对于季冻区中的渠道,其下卧土与混凝土衬砌接触面性能对于研究渠道冻胀破坏及其防护尤为重要。

关于土与混凝土接触面力学特性的研究,国内外已有较多研究成果。Clough等^[2]进行了土与混凝土接触面的直剪试验,并根据试验结果建立了 τ - μ 的双曲线模型,该模型由于参数易确定,直到现在还应用广泛。Boulon等^[3]依据剪应力和位移关系曲线,提出了弹塑性模型。Brandt^[4]经过深入的室内试验和现场研究,提出1个简化模型描述接触面切向应力和变形,用2条折线描述 (τ/σ) - μ 曲线。陈慧远^[5]提出在垂直或倾斜度较陡的土和结构物的接触面上,由于土体沿接触面方向应变的累加,在接触面上会产生较大的相对位移,远超接触面两种材料之间的极限剪切位移而发生摩擦滑移。殷宗泽等^[6]发现接触面直剪试验所测出的上下盒相对位移随平均剪应力下的增加而逐步增加,这是由于接触面上剪切破坏边缘向内部逐步发展的结果。高俊合等^[7]研制大型单剪仪进行土-混凝土接触面单剪试验,分析得到剪切破坏带及其厚度。提出了接触面剪切滑移薄层单元概念,并推导了其本构方程。胡黎明^[8-11]进行了系统的土与结构物接触面的直剪试验,研究了接触面力学性质和变形机理根据试验结果建立了描述接触面应变软化和剪胀现象的损伤力学模型。栾茂田等^[12]同时考虑接触面的非线性剪切变形与非弹性的错动变形将双曲线模型与刚塑性模型结合提出了非线性弹性-理想塑性本构模型。张嘎等^[13-14]进行了粗粒土与结构接触面静动力学试验,指出抗剪强度与法向应力近似成线性关系、单条法向应力不变下的单调剪切应力路径中,剪应力随

剪应变的增加而不断增长并趋向于一稳定值等五条粗粒土与结构接触面静动力学特性的基本规律。从中可以发现试验仪器与方法、接触面单元和本构模型等三个方面是土与混凝土接触面特性研究的关键问题;现行很多数值模型,数值分析其结果的可靠性、可信度都取决于正确的冻结接触面本构关系。

上述研究,均是在常温下进行的。而目前针对负温条件下的冻土-混凝土接触面的研究相对较少。相关研究如下:崔颖辉、吕鹏等^[15-17]开发了一种低温动荷载直剪仪,并通过试验发现冻土-混凝土接触面的动强度幅值与温度、法向压力、含水率等有关;并总结了垂直压力、温度、含水量对接触面抗剪强度的影响。赵联桢等^[18]研制了大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统DDJ1。孙厚超等^[19]研发了微米级变形测量系统,发现不同法向荷载或不同冻土体温度条件下发生接触面剪切时,界面层内土体水平位移随深度增加而减小。温智等^[20]通过试验研究了青藏粉土-玻璃钢接触面力学特性,得出冻结状态下接触面应力-位移性状呈脆性破坏型,存在明显峰值等结论。

目前对冻土-混凝土接触面的研究主要以砂土、黏性土为主,而针对粉土展开的相关研究少之又少。以灌溉渠道为研究对象,针对渠基冻(粉)土-混凝土衬砌接触面力学特性的研究目前并未见到。山东省作为中国的农业大省,耕地率高,灌溉渠道遍布,在农业生产生活中起着重要的作用。山东处于季冻区域,冬季气候寒冷,输水渠道极易发生冻害破坏。因此,本文以山东黄河流域位山灌区(灌区灌溉渠道下卧土以粉土为主)为工程背景,研究其灌溉渠道渠基冻(粉)土-混凝土衬砌接触面在多因素作用下剪切性能的变化规律。开展此项研究,对渠道防渗性能的提升,渠道冬季冻胀破坏防治措施的实施等都具有重要意义。

1 试验设备及试验方案

1.1 试验设备

试验设备主要为ZJ(DSJ-3)型电动四联等应变直剪仪及中科美菱DW-HL290型超低温冷冻储存箱。直剪仪最大垂直荷载400 kPa,推动轴推进速率分别为2.4、0.8、0.1、0.02 mm/min,量力环测量精度为0.01 mm。超低温冷冻储存箱存储温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度控制精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试验用土与混凝土衬砌均取自山东黄河流域灌区——位山灌区。土样基本物理参数见表1。预制混凝土衬砌块的混凝土强度等级为C20,抗冻标号为F150,抗渗标号为W8。

表 1 土样基本物理参数

Tab. 1 Basic soil properties

土类	不同粒径的粒度分布(%)				最大干密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	塑限 (%)	液限 (%)
	> 0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	< 0.005 mm			
粉土	10.9	34.4	46.5	8.2	1.59	13.18	20.32

1.2 试验方案

影响灌溉渠道渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面抗剪强度的因素有土的含水率、冻结温度、法向应力、冻结时间、接触面粗糙度、土的类型等。本文取前四个控制参数进行试验,对同一控制参数的试验采用相同土样与混凝土衬砌。不同试样试验数值对比见表 2。

表 2 不同试样试验数值

Tab. 2 Test parameters of different samples

编号	土的含水率(%)	冻结温度(°C)	法向应力/kPa	冻结时间/h
1-1	8.35	-10.1	100	24
1-2	10.24	-9.8	100	24
1-3	12.66	-10.2	100	24
1-4	13.50	-10.4	100	24
1-5	14.41	-10.2	100	24
1-6	15.77	-9.9	100	24
1-7	16.85	-10.3	100	24
1-8	17.56	-10.0	100	24
1-9	19.51	-10.1	100	24
2-1	16.47	-5.2	100	24
2-2	16.40	-10.1	100	24
2-3	16.38	-15.0	100	24
3-1	17.92	-10.4	100	24
3-2	17.94	-10.1	200	24
3-3	18.01	-9.7	300	24
3-4	17.93	-9.9	400	24
4-1	16.82	-15.2	100	6
4-2	16.75	-14.9	100	12
4-3	16.88	-15.1	100	24

将试验用土过 2 mm 筛后,置于烘箱烘干 8 h 后,参照相关土工规程(SL 237-1999 土工试验规程),按试验设计含水量配置土样。混凝土衬砌按直剪仪剪切盒的下剪切盒尺寸(直径 61.8 mm,厚度 21 mm)切割。试验时,将切割后的混凝土衬砌置于下剪切盒,土样经过击实之后使用环刀取相应尺寸土样,然后压入上剪切盒,固定剪切盒之后用 200 kPa 垂直荷载压实 1.5 h,使土样和混凝土衬砌接触面充分贴合。压实后,将剪切盒整体放入冷冻储存箱按设计要求冻结相应时间。冷冻完成之后,取出剪切盒迅速置于直剪仪上,施加所需法向应力,用 2.4 mm/min 的速

度进行剪切试验,剪切试验基本上在 20~90 s 的短时间内完成,以弥补由于试验仪器等条件制约导致的剪切试验需在常温下进行这一问题。

试验结束后卸载,取出上剪切盒的土样,采用烘干法测量土样的含水率。

2 试验结果分析

本试验中,在试验初始阶段可听到轻微断裂声,测力计指针存在不同程度的倒退现象,这说明试验初始阶段渠道下卧土-混凝土衬砌冻结接触面存在不同程度的局部破坏和剪应力释放。渠道下卧土与混凝土衬砌冻结接触面一般在 2 mm 位移以内发生破坏,破坏时可观察到试样明显滑动并发出响亮的断裂声,同时直剪仪测力计读数瞬时归零,以此作为试验结束标志。

冻结接触面的抗剪强度用峰值抗剪强度表示。峰值抗剪强度是接触面破坏前的最大剪应力,对应于剪应力 τ 相对于剪切盒水平位移 μ 的变化曲线(以下简称 $\tau-\mu$ 曲线)上剪应力释放前的最高点。

2.1 土体含水率对接触面抗剪强度的影响

土体不同含水率下的接触面直剪试验一共进行 9 组试验,不同控制参数见表 2 中编号 1-1~1-9。其中取土体含水率分别为 15.77%、16.85%、17.56% 的三组试验(1-6~1-8)的冻结接触面剪切 $\tau-\mu$ 曲线如图 1 所示进行对比分析,这三组试验的冻结时间都是 24 h,冻结温度均为 $-10^{\circ}C$ 左右,在相同的正应力 100 kPa 下进行。含水率 15.77% 的曲线呈近似单调上升后接近破坏时逐渐趋于平缓,直至试件破坏。含水率 16.85% 与 17.56% 的曲线形态相似,刚开始短时间内呈近似单调上升,之后短时间内趋于平缓(含水率越高,平缓期越长),之后曲线继续呈单调上升状态在临近破坏时逐渐趋于平缓,直至试件破坏。

分析表明:通过前面得出的剪切初始阶段剪应力释放现象,结合 $\tau-\mu$ 曲线可以发现 $\tau-\mu$ 曲线初始阶段平缓期与初始阶段剪应力释放存在相关关系。可以发现,随着土体含水率的生长,剪切的初始阶段剪应力增长速率减小,说明随着含水率的生长,初始阶段局部剪应力释放量增大。土体含水率越低,接触面抗剪强度越快达到峰值。对土体不同含

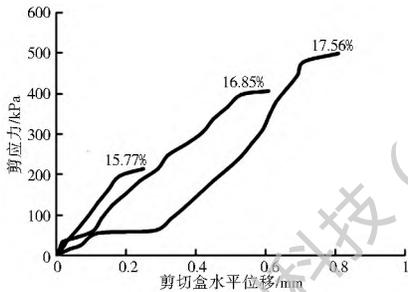


图1 土体不同含水率下接触面剪切τ-μ曲线
Fig. 1 Shear τ-μ curve of interface under different soil moisture contents

水率下的峰值抗剪强度变化规律采用三次多项式函数进行拟合(图2)可以发现,土体含水率越高,冻结接触面的抗剪强度也越高,尤其是当含水率超过15%时,峰值抗剪强度增长速率呈快速上升状态。在 $T = -10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 100\text{ kPa}$, $h = 24\text{ h}$, $8.35\% \leq \omega \leq 19.51\%$ 范围内 τ_{\max} 为:

$$\tau_{\max} = 0.572\omega^3 - 14.28\omega^2 + 112.2\omega - 206.0 \quad (1)$$

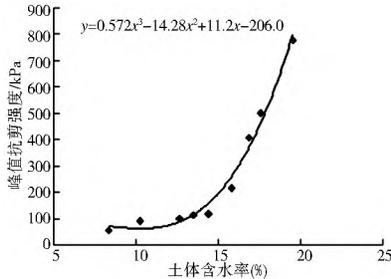


图2 土体不同含水率下的抗剪强度变化规律
Fig. 2 Variation of shear strength under different soil moisture contents

2.2 冻结温度对接触面抗剪强度的影响

不同冻结温度下的接触面直剪试验一共进行3组试验,不同控制参数见表2中编号2-1~2-3。对不同冻结温度的τ-μ曲线(图3)的曲线形态进行分析,不同温度下的曲线形态相似,首先曲线呈近似单调上升,直至临近破坏,曲线趋于平缓,直至试件破坏。

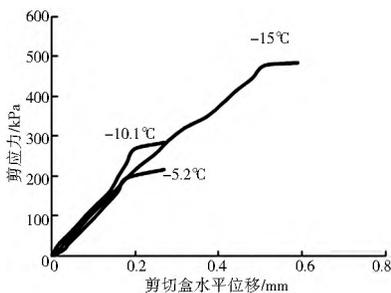


图3 不同冻结温度下接触面剪切τ-μ曲线
Fig. 3 Shear τ-μ curve of interface under different freezing temperature

近,这说明冻结温度对初始阶段局部剪应力释放影响较小。冻结温度越高,接触面抗剪强度越快达到峰值。从不同冻结温度下的峰值抗剪强度变化规律的趋势线(图4)可以看出,在 $\omega = 16.42\%$, $\sigma = 100\text{ kPa}$, $h = 24\text{ h}$, $-15 \leq T \leq -5.2$ 温度范围内,冻结温度越低,冻结接触面的峰值抗剪强度越高。

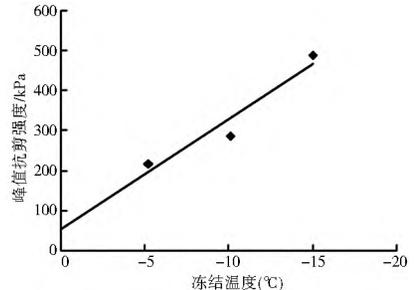


图4 不同温度下的抗剪强度变化规律
Fig. 4 Variation of shear strength under different freezing temperature

2.3 法向应力对接触面抗剪强度的影响

不同法向应力下的接触面直剪试验一共进行4组试验,不同控制参数见表2中编号3-1~3-4。分析不同法向应力下接触面剪切τ-μ曲线(图5)的曲线形态,法向应力100 kPa、200 kPa、300 kPa的曲线形态相似,初始阶段曲线趋于平缓,且随着法向应力的增长,平缓期逐渐增长,之后曲线均呈近似单调增长形态,在临近破坏时逐渐趋于平缓,直至试件破坏。法向应力400 kPa的曲线形态初始阶段突变之后逐渐减小,之后曲线均呈近似单调上升形态,在临近破坏时逐渐趋于平缓,直至试件破坏。

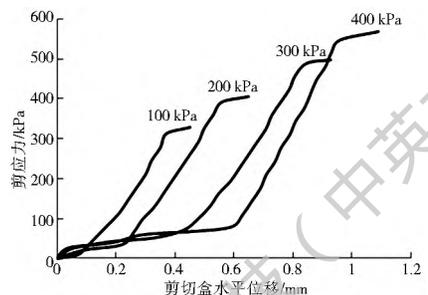


图5 不同法向应力下接触面剪切τ-μ曲线
Fig. 5 Shear τ-μ curve of interface under different normal stress

分析表明:剪切的初始阶段剪应力增长缓慢,且随着法向应力的增加,增长速率逐渐降低。随着法向应力的增大,初始阶段局部剪应力释放的量也随之增大,这也是剪切初始阶段剪应力增长速率随着法向应力增加而逐渐降低的主要原因。法向应力越低,接触面抗剪强度越快达到峰值。对不同法向应力下的峰值抗剪强度变化规律采用线性函数进行拟合(图6)可以发现,法向应力越大,冻结接触面的峰值抗剪强度也越大,法向应力与峰值抗剪强度两者

分析表明:剪切的初始阶段剪应力增长速率相

呈线性关系, 在 $T = -10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega = 17.95\%$, $h = 24$ h, $100\text{ kPa} \leq \sigma \leq 400\text{ kPa}$ 内 τ_{\max} 为:

$$\tau_{\max} = 0.807\sigma + 248.0 \quad (2)$$

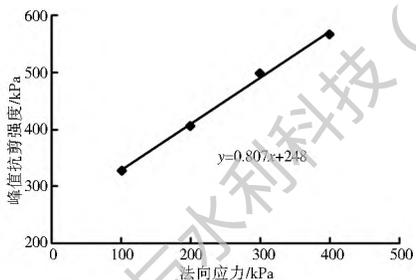


图 6 不同法向应力下的抗剪强度变化规律

Fig. 6 Variation of shear strength under different normal stress

2.4 冻结时间对接触面抗剪强度的影响

不同冻结时间下的接触面直剪试验一共进行 3 组试验, 不同控制参数见表 2 中编号 4-1~4-3。分析不同冻结时间下接触面剪切 $\tau-\mu$ 曲线(图 7)的曲线形态, 冻结时间为 6 h 时, 初始存在一段较长的平缓期, 之后呈近似单调上升, 在临近破坏前再次逐渐趋于平缓直至试验结束。冻结时间为 12 h 时, 剪切一定时间后呈近似单调上升, 接近破坏时趋于平缓直至试验结束。当冻结时间为 24 h 时, 首先呈近似单调上升形态, 接近破坏时趋于平缓直至试验结束。

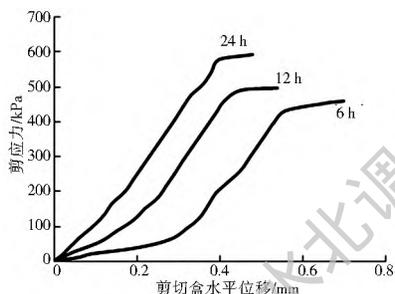


图 7 不同冻结时间下接触面剪切 $\tau-\mu$ 曲线

Fig. 7 Shear $\tau-\mu$ curve of interface under different freezing time

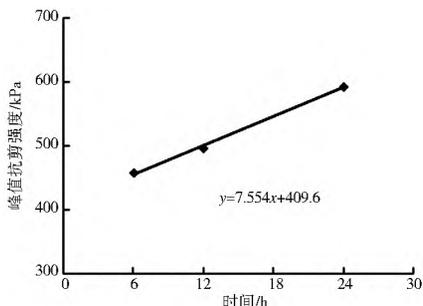


图 8 不同冻结时间下的抗剪强度变化规律

Fig. 8 Variation of shear strength under different freezing time

分析表明: 冻结时间越长, 剪切的初始阶段局部剪应力释放量越少, 剪应力增长速率越快。冻结时间越长, 接触面抗剪强度越快达到峰值。对不同冻结时间下的峰值抗剪强度变化规律采用线性函数进行拟合(图 8)可以发现, 随着冻结时间的增加, 冻结

接触面的峰值抗剪强度也越大。冻结时间与峰值抗剪强度呈线性关系, 在 $T = -15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega = 16.82\%$, $\sigma = 100\text{ kPa}$, 6~12 h 时间范围内 τ_{\max} 为:

$$\tau_{\max} = 7.554h + 409.6 \quad (3)$$

2.5 接触面抗剪强度机理

渠道下卧土与混凝土衬砌冻结接触面的抗剪强度实质上是土体中的水分在低温下形成的冰晶与混凝土衬砌接触面通过胶结作用形成的胶结力, 以及土体与混凝土衬砌接触面之间的黏聚力与摩擦力。

冻结接触面的峰值抗剪强度主要受胶结力影响。而胶结力的大小受土体含水率、冻结温度、冻结时间等因素的影响。土体含水率的增加、冻结温度的降低以及冻结时间增长都会使土体中形成更多的冰晶, 从而使胶结力更大。

冻结接触面之间的黏聚力和摩擦力主要受法向应力、冻结时间的影响。所以随着法向应力的增长, 剪切的初始阶段剪应力释放时会释放出更多的黏聚力和摩擦力, 从而导致释放量增大。而随着冻结时间的减少, 土体中的冰晶也随之减少, 胶结力对抗剪强度的影响降低, 而黏聚力和摩擦力的影响上升。

3 结论

本文通过在直剪仪上下盒分别装入土样和混凝土衬砌再将剪切盒整体置于低温环境进行冻结的简易方法, 研究了土体含水率、冻结温度、法向应力、冻结时间等因素对灌溉渠道渠道下卧土与混凝土衬砌冻结接触面抗剪强度的影响, 绘制出不同条件下的冻结接触面剪切 $\tau-\mu$ 曲线, 较好地反映了整个剪切过程的变化。主要结论如下。

(1) 剪切试验的初始阶段, 冻结接触面存在局部剪应力释放现象, 释放量的大小与土体含水率、法向应力、冻结时间密切相关, 而几乎不受冻结温度的影响。在本试验参数范围内: 土体含水率越高, 释放量越大; 法向应力越大, 释放量越大; 冻结时间越长, 释放量越小。

(2) 冻结接触面的抗剪强度与土体含水率、冻结温度、法向应力、冻结时间密切相关。其峰值抗剪强度与法向应力、冻结时间在本试验参数范围内呈线性关系: 法向应力越大, 峰值抗剪强度越大; 冻结时间越长, 峰值抗剪强度越大。除此之外, 在本试验参数范围内, 土体含水率越高, 接触面的峰值抗剪强度也越大; 冻结温度越低, 峰值抗剪强度越大。

(3) 冻结接触面的抗剪强度实质上是冻土中的冰晶与混凝土衬砌接触面之间的胶结力, 以及土体与混凝土衬砌冻结接触面之间的黏聚力与摩擦力。

峰值抗剪强度大小主要受胶结力影响。土体与混凝土衬砌冻结接触面之间的黏聚力和摩擦力主受法向应力、冻结时间的影响。

(4) 本试验仅考虑了一次冻胀后各因素对接触面抗剪强度的影响,至于土体冻融循环对接触面抗剪强度的影响以及试验设备条件限制造成的如冻结时试样上部未施加法向应力等问题有待后续继续研究。

参考文献(References):

[1] 陈博,李建平.近50年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征[J].大气科学,2008,32(3):432-443.(CHEN Bo, LI Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short term frozen soil in China in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 432-443. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.02

[2] 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.

[3] Boulon M, Nova R. Modeling of soil structure interface behavior: a comparison between elastic and rate type laws[J]. Computers and Geotechnics, 1990, (9): 21-46.

[4] Brandt J R T. Behavior of soil-concrete interface[D]. Edmonton: University of Alberta, 1985.

[5] 陈慧远.摩擦接触单元及其分析方法[J].水利学报,1985(4): 44-50.(CHEN Huiyuan. Friction Contact element and its analytical method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(4): 44-50. (in Chinese))

[6] 殷宗泽,朱弘,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J].岩土工程学报,1994,16(3): 14-22.(YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Deformation and mathematical simulation of the interface between soil and structural[J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 16(3): 14-22. (in Chinese))

[7] 高俊合,于海学,赵维炳.土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J].土木工程学报,2000,33(4): 42-46.(GAO Junhe, YU Haixue, ZHAO Weibing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 42-46. (in Chinese)) DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2000.04.009

[8] 胡黎明.土与结构物接触面力学特性研究和工程应用[D].北京:清华大学,2000.(HU Liming. Study on mechanical properties of soil-structure interface and engineering application. [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000. (in Chinese))

[9] 胡黎明,濮家骊.损伤模型接触面单元在有限元计算分析中的应用[J].土木工程学报,2002,35(3): 73-86.(HU Liming, PU Jialiu. Application the damage model to soil interface in finite element analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(3): 73-86. (in Chinese)) DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2002.03.014

[10] 胡黎明,濮家骊,王刚.接触面损伤模型应用于三维有限元分析[J].水利学报,2002,(3): 44-49.(HU Liming, PU Jialiu, WANG Gang. Application of damage interface model for 3-D FEM analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (3): 44-49. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxh.2002.03.008

[11] 胡黎明,濮家骊.土与结构物接触面损伤本构模型[J].岩土力学,2002,23(1): 6-11.(HU Liming, PU Jialiu. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 6-11. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2002.01.002

[12] 栾茂田,武亚军.土与结构物接触面的非线性弹性-理想塑性模型及其应用[J].岩土力学,2004,25(4): 507-513.(LUAN Maotian, WU Yajun. A nonlinear elastic-perfectly plastic model of interface element for soil-structure interaction and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 507-513. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2004.04.001

[13] 张嘎,张建民.粗粒土与结构接触面的静动本构规律[J].岩土工程学报,2005,27(5): 516-520.(ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Monotonic and cyclic constitutive law of interface between structure and coarse grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 516-520. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-4548.2005.05.006

[14] 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.(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. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-4548.2005.10.013

[15] 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(S2): 486-490.(CUI Yinghui, LIU Jiankun, LÜ Peng. Development of dynamic load direct shear apparatus for frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 486-490. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s2.066

[16] 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(S2): 180-183.(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(S2): 180-183. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s2.030

[17] 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.(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. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.02.016

[18] 赵联楨,杨平,王海波.大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J].岩土工程学报,2013,35(4): 707-713.(ZHAO Lianzhen, YANG Ping, WANG Haibo. Development and application of large scale multi-functional frozen soil-structure interface cyclic shearing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 707-713. (in Chinese))

[19] 孙厚超,杨平,王国良.冻土与结构接触界面力学试验系统研制及应用[J].岩土力学,2014,35(12): 3636-3643.(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. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2014.12.036

[20] 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(2): 45-50.(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, 34(2): 45-50. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2013.s2.004