

文章编号:1673-9469(2022)01-0030-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.005

# 基于温控直剪装置温度变化对土体力学特性影响试验研究

陈琦<sup>1</sup>,寇海磊<sup>1\*</sup>,魏道凯<sup>2,3</sup>,荆皓<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100; 2. 山东交通职业学院 公路与建筑系,山东 潍坊 261206;  
3. 日喀则市交通运输局公路工程项目管理中心,西藏 日喀则 857000)

**摘要:** 为研究土体物理力学性质随温度变化规律,通过改进的大型温控直剪设备——FAST-1型,在准确控制温度变化且施加较大法向压力条件下,对西藏高原冻土区采集的土体重新制备并在不同温度下(15℃、5℃、-5℃、-15℃)进行直剪试验。剪切过程中测量土体的温度、抗剪强度、剪胀量、黏聚力和内摩擦角。试验结果表明:温度的改变可以使粉质黏土的力学性质产生较大的改变,负温条件下土体抗剪强度随着温度的降低而增加,正温条件下土体抗剪强度基本保持不变;负温条件下黏聚力在-15℃最高可达1.8 MPa,约为正温条件下土体黏聚力的900倍。内摩擦角呈现出两端温度变化大,中间温度变化小的趋势。由于温度对黏聚力和内摩擦角的影响,在负温条件下,剪切过程中剪切面比较粗糙造成土体的剪胀明显较大,最大可达2.5 mm,约是正温条件下的5倍。

**关键词:** 温控直剪仪;温度;黏聚力;内摩擦角;剪胀

**中图分类号:** TG333.17

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Influence of Temperature Change on Mechanical Properties of Soil Based on Temperature-Controlled Direct Shear Device

CHEN Qi<sup>1</sup>, KOU Hailei<sup>1\*</sup>, WEI Daokai<sup>2,3</sup>, JING Hao<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Department of Highway and Architecture, Shandong Transport Vocational College, Weifang, Shandong 261206, China; 3. Highway Engineering Project Management Center of Xigaze Transportation Bureau, Tibet 857000, China)

**Abstract:** In order to study the laws of the change of soil mechanical properties with temperature, the soil collected in the frozen soil area of the Tibet Plateau was re-prepared and subjected to different temperatures (15℃, 5℃, -5℃, -15℃) for direct shear test through an improved large-scale temperature-controlled direct shear equipment-FAST-1 under the condition of accurately controlling temperature changes and applying a large normal pressure. The temperature, shear strength, dilatancy effect, cohesion and internal friction angle were tested in the process of shearing. The test results show that the mechanical properties of silty clay can be changed greatly with the change of temperature. The shear strength of silty clay increases with the decrease of temperature under negative temperature condition, while the shear strength of silty clay remains almost unchanged under positive temperature condition. The maximum cohesion of silty clay under negative temperature is 1.8 MPa at -15℃, which is about 900 times of that under positive temperature. The internal friction angle shows a tendency of large change at both ends temperature and small change in the middle temperature. Due to the influence of temperature on cohesion and internal friction angle, the dilatancy of soil under negative temperature is

收稿日期:2021-11-12

基金项目:西藏自治区重点研发计划(XZ202001ZY0013G);国家自然科学基金面上项目(51879246)

作者简介:陈琦(1997-),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事岩土工程、冻土路基处理研究。

\* 通讯作者:寇海磊(1984-),男,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事岩土工程的研究工作。

obviously larger than positive temperature, up to 2.5mm, which is about 5 times of that under positive temperature.

**Key words:** temperature controlled direct shear apparatus; temperature; cohesion; internal friction angle; dilatancy effect

随着国家“十四五”规划在西部高原地区的战略部署,基础设施建设在高原地区相继开展,但高原地区特殊的地理环境对基础设施建设过程中的地基承载力提出了更高的要求。在高原冻土地区,温度是影响地基承载力的重要因素,而探究高原地区的土体在不同温度条件下的物理力学性质,是为基础设施设计提供可靠依据,保障构筑物长期安全运行的关键。目前针对不同温度下土体的力学性质的室内试验研究中,直剪试验作为常规的室内土工试验方法,常用于测量土体的抗剪强度,确定土体的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。受制于试验设备,目前较多的直剪试验只能在室温下开展,难以模拟高原地区的特殊环境。为满足直剪试验特殊条件下的试验要求,能够在不同温度条件下展开对土体力学性质的研究,国内外学者对原始的直剪仪器进行了改进:我国最早由胡黎明等<sup>[1]</sup>对直剪仪器进行改进,用于研究砂土与结构物表面的剪切试验。张嘎、张建民<sup>[2]</sup>研制了 TH-20 t 大型循环加载剪切仪器,能够实现单调和循环加载。而对于冻土这一特殊领域,李永波等<sup>[3]</sup>设计了一套冻土-桩动力相互作用模型试验系统,能为试验提供所需的冻土环境,模拟分析冻土-桩动力性能。赵联桢等<sup>[4]</sup>研制了大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统 DDJ-1,为系统开展冻土-结构接触面的研究提供试验基础和重要思路。石泉彬等<sup>[5-6]</sup>在原冻土直剪仪基础平台上集成冻土接触面冻结强度试验、冻土界面层力学特性试验模块,满足多功能试验要求,新功能开发采用模块化设计;并基于此设备探究了冻土与结构接触面次峰值冻结强度影响因素,开展多影响因素条件下的冻结强度直剪试验研究,为实际工程施工设计过程中提供冻结强度参数的选取依据。而国外针对于直剪仪器的改进及相关试验起步较早,Desai<sup>[7]</sup>于 1985 年最早研制出了多自由度的直剪仪,并用于研究砂土与混凝土界面的应力路径。此后的 Ue-sugi 等<sup>[8]</sup>利用矩形截面的单剪仪对干砂-低碳钢接触面进行了一系列试验;Fakharian<sup>[9]</sup>成功研制了集直剪试验和单剪试验于一身的三维循环接触面剪切仪。马巍等<sup>[10]</sup>对于冻土的物理力学性

质进行了系统的概述与总结。目前较多学者对影响冻土力学性质的参数进行了大量的研究<sup>[11-15]</sup>,对于冻土力学性质的研究进行不断的补充和完善,形成理论体系从而全面地把握冻土特殊的物理力学性质。

综上所述,以上针对冻土区土体物理力学性质的研究需进一步完善补充,研究成果将对冻土区构筑物长期稳定使用具有重要意义,对高原地区特殊环境下工程设计及施工具有指导作用。而本试验基于自主改进设计的 FAST-1 型温控直剪设备,针对高原季节性冻土地区不同温度条件下土体的物理力学性质展开相关试验研究。以高原冻土区采集的土体为研究对象,在不同温度条件下进行直剪试验,研究土体的物理力学性质及其随温度变化规律。

## 1 多功能温控直剪设备改进

本设备(FAST-1)从直剪试验所拥有的基本功能出发,优化、改进、完善各个功能模块,使其能更广泛地应用于各种试验条件与试验需求中。通过各个功能模块的升级优化,克服直剪试验缺点,为相关试验研究提供更可靠的数据;使直剪设备具有加荷稳定、操作方便、测量数据直观的特点;尤其针对土体温度进行精确控制,考虑温度对土体力学参数的影响。本设备共分为 5 个功能模块,分别为法向加载装置、水平剪切装置、剪切盒、量测控制装置以及冷浴循环系统,如图 1。通过外接低温恒温搅拌反应浴(DHJF-4002)实现温度控制,通过硅胶管与剪切盒内腔连接形成循环系统,如图 2。本设备能够实现土体温度在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内变化。恒温控制过程中正温条件下误差为  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,负温条件下误差为  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,能够满足对土体温度的精确控制。

法向加载装置由加载框架、四个滚动膜片气缸、载荷传感器、弹簧等组成,保证提供 40 kN 的最大法向载荷。法向载荷由空气压缩机提供动力源,计算机发出指令,由 SMC 公司产的电气比例阀调制气压力,以达到试验要求的压力;设置四个 1 t 的弹簧和附件,实现等刚度施加法向载荷。滚动

膜片气缸结构特点是活塞与缸体使用滚动隔膜隔离,活塞与缸体为滚动摩擦,能够保证气缸气压力与力之间的线性关系。

剪切装置的控制模式为伺服控制方式。由 0.75 kW 的三菱伺服电机提供动力,经减速后,驱动升降机对试样施加水平载荷,通过剪切传感器反馈控制伺服电机实现等应力控制或等应变方式加载,实现直剪流变试验或等应变直剪试验。剪

切盒分上下两个部分,即上剪切盒和下剪切盒。上剪切盒内部尺寸为半径 5 cm、高 5.5 cm,下剪切盒尺寸为半径 5 cm、高 6 cm,如图 2(b),剪切盒由不锈钢材料制造,设置有机玻璃观察窗,以便观察土体剪切状态。上下盒的联接采用保证间隙的滚动方式结构,减小摩擦阻力。设置滚动轴承的导轨机构,使剪切盒在导轨上保持小的摩擦阻力,如图 2(a)。

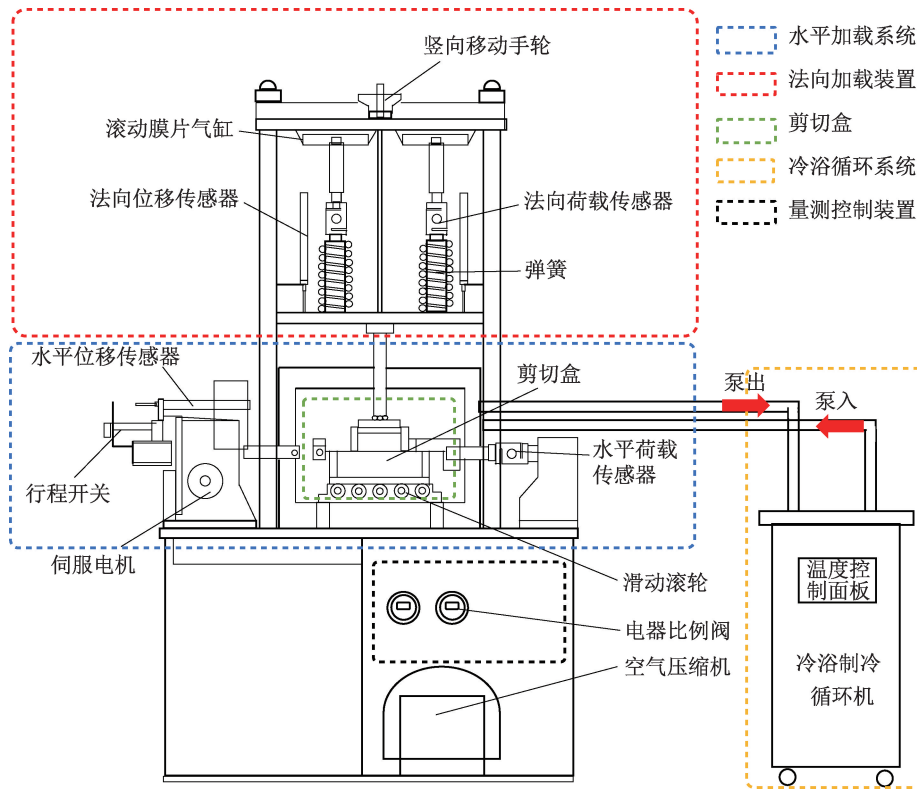


图 1 多功能温控直剪设备

Fig. 1 Multi-function temperature control direct shear equipment

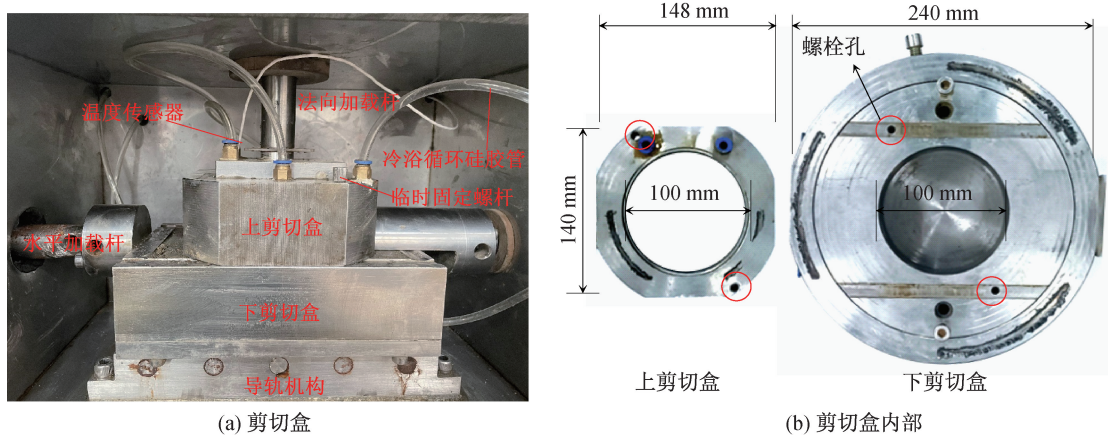


图 2 剪切机构示意图

Fig. 2 The diagram of shear mechanism

## 2 试样制备与试验过程

### 2.1 试样制备

试验所用土体取自西藏日喀则市赛乡至秋洛县公路路基,取样深度为 10~15 m,为高原季节性冻土地区,对土样密封包装运回实验室按照《土工试验方法标准》<sup>[16]</sup>进行相关土工试验,土体的基本物理参数见表 1。采用液塑限联合测定仪确定土体的液塑限,根据美国 ASTM 土性分类标准<sup>[17]</sup>确定土样为粉质黏土。通过筛分法和密度计法,确定土体的颗粒级配曲线如图 3。

表 1 土的物理性质指标

Tab. 1 Indicators of physical properties of soils

含水率 %	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	塑限/ %	液限/ %	塑性指 数/%	最小干密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	最大干密度 (g·cm <sup>-3</sup> )
15.1	2.29	13.4	28.1	13.4	1.32	1.92

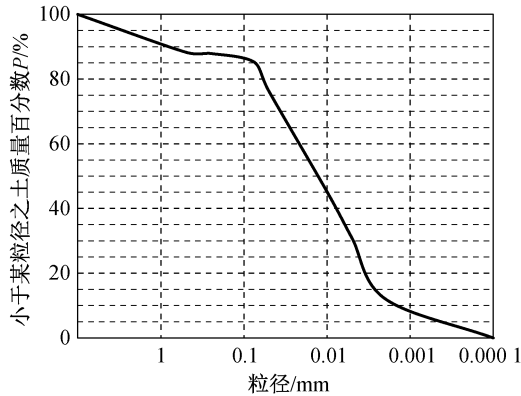


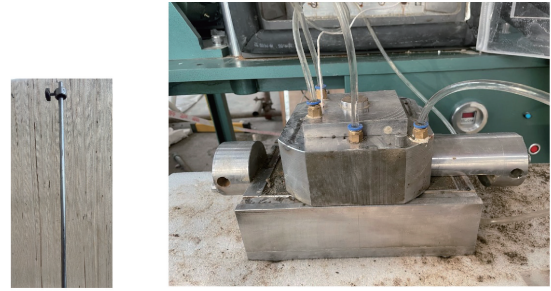
图 3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution curve

按照土工试验规范将土体在烘干箱中烘干后碾碎,过 5 mm 筛子,并配置成 15% 含水率的重塑土样,将水均匀喷洒于土体后,密封浸润 24 h 备用。将上下剪切盒拼装并用螺栓固定后,剪切盒内壁周边涂抹凡士林。根据原状土密度将一定质量的土体分三层用击实锤击实至固定体积的剪切盒中,从而控制重塑土样的密度。试样高度 95 mm,直径 100 mm。击实过程中第二层不能过于靠近剪切界面。制样完成后将温度传感器探头插入土体中心,如图 4。

### 2.2 试验方法

为研究冻土的力学性质,进行固结排水单剪试验。将试验装填完毕后控制温度在 15 °C 条件下进行固结,分别施加 300、400、500、600 kPa 法向应力,根据公式(1)求出剪切应力。



(a) 装填试样所用击实锤 (b) 制备完成试样

图 4 试样装填过程

Fig. 4 Sample loading process

$$P = F/A \quad (1)$$

式中, $P$  表示剪切过程中剪应力, kPa;  $F$  为剪切过程中剪切荷载, kN;  $A$  为剪切界面面积, m<sup>2</sup>。施加法向应力固结至法向位移每 10 min 的位移变化小于 0.001 mm<sup>[18]</sup>。在满足固结度后施加温度,当温度达到稳定 30 min 后开始剪切,剪切速率为 0.2 mm/min,水平位移剪切至 15 mm 处停止。共进行 4 个不同温度条件 15 °C、5 °C、-5 °C、-15 °C,共 16 组固结排水直剪试验,为防止试验较大误差,每组试验不少于 3 个试样,试验方案如表 2。

表 2 试验方案

Tab. 2 Testing program

试验编号	试验温度/°C	法向载荷/kPa
1	15	300
2		400
3		500
4		600
5	5	300
6		400
7		500
8		600
9	-5	300
10		400
11		500
12		600
13	-15	300
14		400
15		500
16		600

## 3 试验结果与分析

### 3.1 土体抗剪强度与剪切位移关系

土体抗剪强度在不同温度 ( $T/°C$ ) 条件下关系曲线如图 5 所示,在正温 15 °C 和 5 °C 条件下,在不同法向压力条件下抗剪强度都比较接近,5 °C 条件

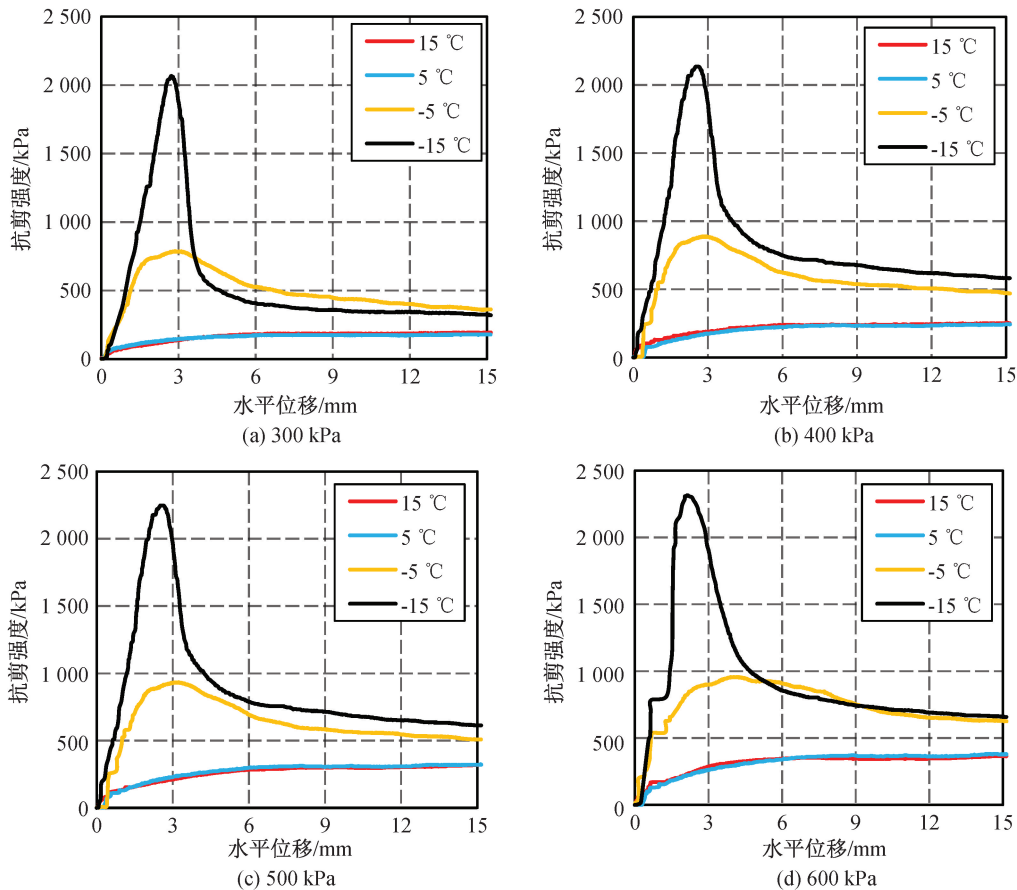


图5 不同温度下抗剪强度-剪切位移关系曲线

Fig. 5 The shear strength-shear displacement curve at different temperatures

下的抗剪强度略大于 15 °C 条件下的抗剪强度,说明在正温环境下,温度变化对土体的力学性质无较大影响。而在温度 -5 °C 和 -15 °C 条件下土体的抗剪强度产生了明显峰值,并且随着温度的降低峰值强度明显增加。负温下的抗剪强度增长速率明显大于正温条件下抗剪强度增长速率;负温条件下抗剪强度到达峰值后,抗剪强度迅速降低,峰后残余强度随温度降低而增大,但大于正温条件下的残余强度值。

土体抗剪强度在不同法向压力条件下关系曲线如图 6 所示,抗剪强度随法向压力增加而变大,且抗剪强度变化在水平位移 6 mm 内变化较迅速,水平位移 8 mm 后基本上趋于平稳。在不同法向压力、同一温度下,土体所显示的应力应变关系趋势相近,说明在不同法向力下,对同一温度下的冻土的力学性质不会产生影响。

### 3.2 土体法向位移与剪切位移关系

在剪切过程中随着土体内部运动,剪切界面产生相互作用会出现剪胀的现象<sup>[19-20]</sup>。在不同温度、相同法向载荷条件下法向位移与水平位移直

剪关系如图 7。从图中可看出,在 300 kPa 法向荷载条件下,在剪切过程中负温下的法向位移明显大于正温下的法向位移。负温下最大可达 2.5 mm,约是正温条件下的 5 倍。低温下产生较大剪胀的示意图如图 8,低温条件使水分子与土颗粒冻结产生黏结块体,增强了剪切界面土颗粒的强度,剪切过程中剪切上下界面产生相对滑移,由于剪切界面参差不齐,使土体在负温条件下产生较大的法向位移;而在正温条件下,土体间黏聚力和内摩擦角比较小,剪切界面相对平整,故正温下的剪切过程中法向位移较小。

### 3.3 土体黏聚力、内摩擦角随温度变化规律

根据在每一温度下峰值强度或剪切力随位移不再变化时的抗剪强度与法向应力的关系,得到剪切强度-法向应力关系曲线(图 9),根据库伦公式绘制抗剪强度与剪切位移之间的关系,得到一次函数。其中与 Y 轴的截距为土体间的黏聚力  $c$ ,斜率为内摩擦角  $\varphi$ 。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

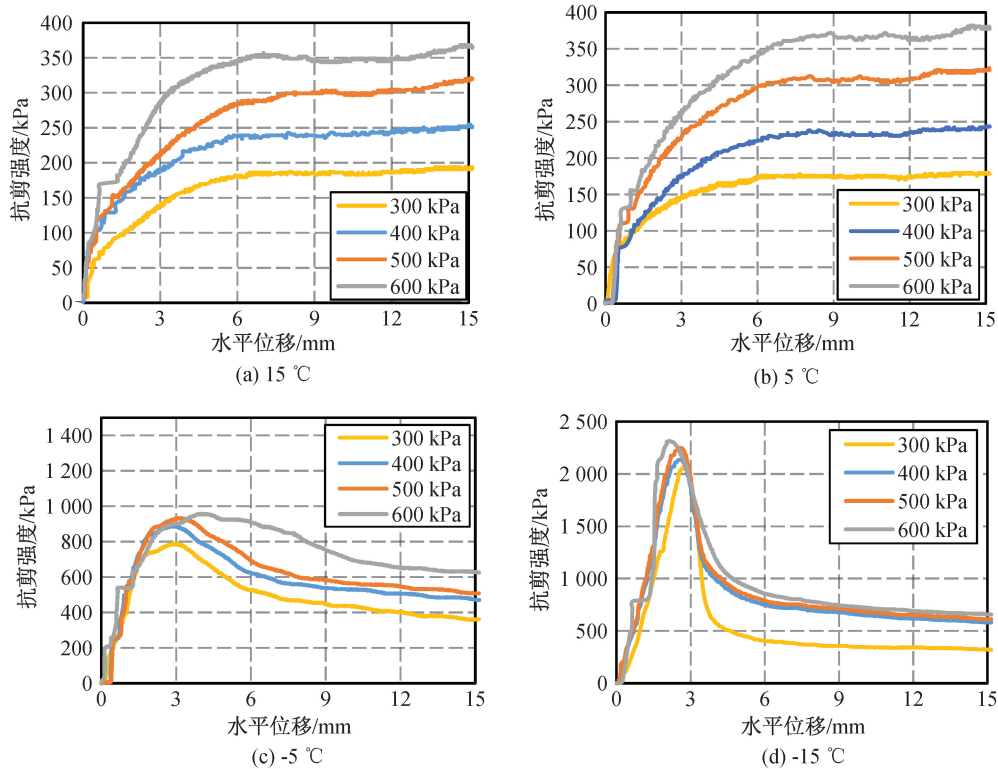


图 6 不同法向应力下抗剪强度-剪切位移关系曲线

Fig. 6 The shear strength-shear displacement curve under different normal stresses

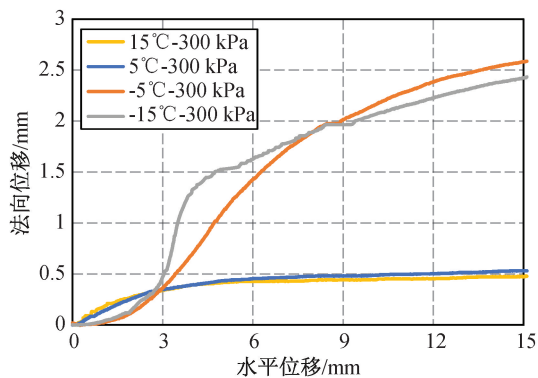


图 7 不同温度条件下法向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 7 Normal displacement-shear displacement curve under different temperature conditions

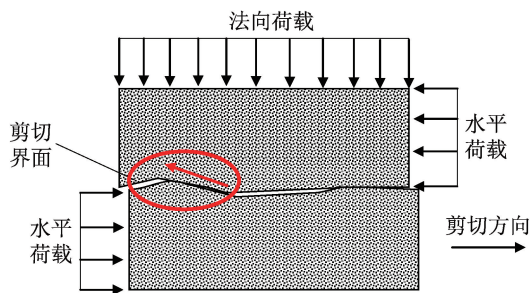


图 8 冻土剪胀过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of permafrost dilatancy process

式中,  $\tau_f$  为土体抗剪强度, kPa;  $\sigma$  为总应力, kPa;  $c$  为土的黏聚力, kPa;  $\varphi$  为土的内摩擦角, ( $^\circ$ )。

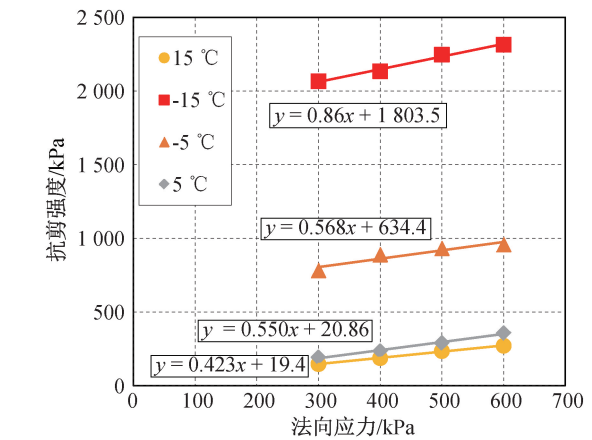


图 9 剪切强度-法向应力关系曲线

Fig. 9 Shear strength-normal stress curve

温度作为环境中特殊客观的物理变量,会引起土体力学性质产生较大的改变(表 3),黏聚力主要在负温下产生较大的变化,而正温条件下变化不大,主要原因是在低温环境下水分子发生相变,水由液态向固态转变,在向低温转变过程中水分子作为土体颗粒间的胶结介质会使土颗粒之间的引力增加。在  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  下的黏聚力为  $1\ 803.5\ \text{kPa}$ , 约是正温条件下黏聚力的 900 倍,变化剧烈;而土体的内摩擦角在  $20^\circ\sim 45^\circ$  之间变化,在  $5\text{ }^\circ\text{C}\sim -5\text{ }^\circ\text{C}$  间变化不大,内摩擦角基本相对保持缓慢增加,当温

度低于-5℃时土体的内摩擦角进一步增大。

表3 抗剪强度指标  
Tab. 3 Shear strength indexes

温度/℃	抗剪强度指标	
	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)
15	19.4	22.94
5	20.86	28.34
-5	634.4	29.61
-15	1 803.5	40.72

根据黏聚力和内摩擦角与温度关系(图10—图11),拟合出-15℃~15℃范围内,粉质黏土黏聚力随温度变化规律,见式(3),内摩擦角随温度变化规律,见式(4)。在一定温度范围内,粉质黏土的黏聚力与内摩擦角随温度的降低呈指数关系增长,此项规律为高原冻土地区地基承载力设计提供理论依据。

$$c = 146.69e^{-0.17T} \quad (3)$$

$$\varphi = 29.88e^{-0.017T} \quad (4)$$

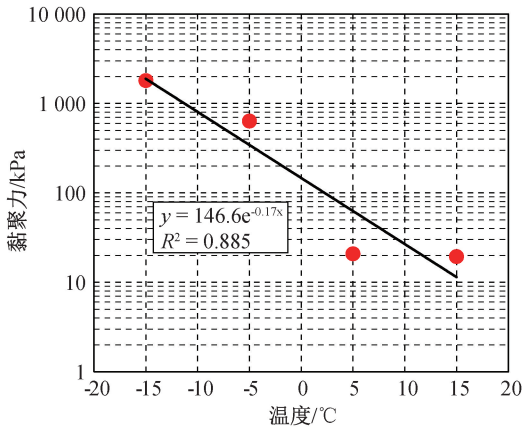


图10 黏聚力-温度关系曲线

Fig. 10 Cohesion-temperature curve

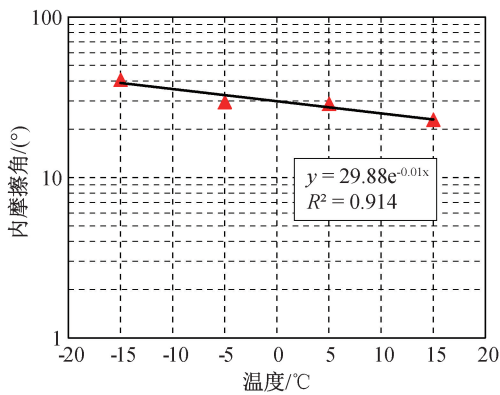


图11 内摩擦角-温度关系曲线

Fig. 11 Internal friction Angle - temperature relation curve

土体在不同温度下所产生黏聚力和内摩擦角变化的原因是土体中水分和冰的含量随温度产生

变化。如图12,在不同温度条件下土体成分变化示意图<sup>[11]</sup>,在正温条件下土体由固、液、气三相组成,当温度下降至0℃以下达到水的冰点时,土体由三相转化成四相(固、液、气、冰),随着温度的继续降低,冰的含量继续增加,直至土体中的水全部转化成冰再次成为“三相”(固、气、冰)。而水向冰产生相变后,冰状态下水分子间的相互作用力远远大于常温下水分子间的作用力,故在负温情况下冰使土颗粒间产生胶结力,产生较强的黏聚力和摩擦角。

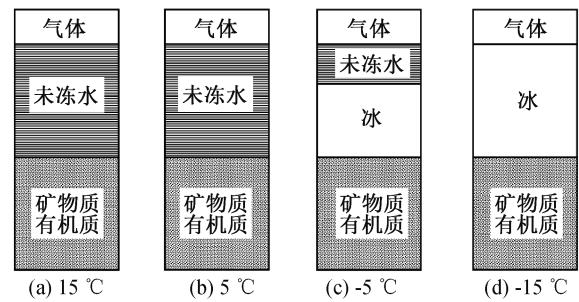


图12 不同温度土体成分变化示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of soil composition change at different temperatures<sup>[11]</sup>

### 4 结论

通过对不同温度下的土体进行直剪试验,得到抗剪强度、黏聚力和内摩擦角随温度变化的规律;温度在土体剪切过程中产生剪胀影响,并得出以下结论:

1) 自行改进的FAST-1型温控直剪设备能够应用于多条件、多操作下的试验研究,能够准确控制试验温度并对试验结果做出直观的输出。

2) 正负温差的变化可以使粉质黏土的力学性质产生较大的改变,抗剪强度会随着温度的降低而增加。反之高原冻土区当土体由负温向正温过渡时,地基承载力会有较大的下降,对构筑物产生较大的影响。

3) 在负温和正温的不同条件下,所产生的剪胀量有较大差异。在负温条件下土体的剪胀明显较大,最大可达2.5 mm,约是正温条件下的5倍,说明低温使水分子与土颗粒冻结产生黏结,增强了剪切界面土颗粒的强度,剪切过程中剪切上下界面产生相对滑移,由于剪切界面参差不齐,使土体在负温条件下产生较大的法向位移;而在正温条件下,土体间黏聚力和内摩擦角比较小,剪切界面相对平整,故正温下的剪切过程中法向位移较小。

4) 温度在正负温变化时对土体的黏聚力和内摩擦角产生较大影响。黏聚力在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可达 $1\ 803.5\ \text{kPa}$ ,明显大于正温条件下的黏聚力,且在正温条件下温度的变化对土体的黏聚力和内摩擦角影响不大。内摩擦角随温度变化比较稳定,基本在 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间变化,随温度的降低而升高,在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间土体的内摩擦角保持较小的增加。负温可以增强土体的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角,使土体的力学性质产生较大的改变。

#### 参考文献:

- [1] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001(04):431-435.
- [2] 张嘎,张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切切的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003(02):149-153.
- [3] 李永波,张鸿儒,全克江. 冻土-桩动力相互作用模型试验系统研制[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(04):774-780.
- [4] 赵联桢,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(04):707-713.
- [5] 石泉彬,杨平,孙厚超. 冻土直剪仪多功能改进与试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2017, 45(05):457-463.
- [6] 石泉彬,杨平,于可,等. 冻土与结构接触面次峰值冻结强度试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(06):2025-2034.
- [7] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic Testing and Modeling of Interfaces[J]. Journ Geot Engng, ASCE, 1985, 111(6):793-815.
- [8] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional Resistance at Yield Between Dry Sand and Mild Steel[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4):139-149.
- [9] FAKHARIAN K. Three-dimensional Monotonic and Cyclic Behavior of Sand-steel Interfaces[D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.
- [10] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社, 2014:358.
- [11] 杜海民,马巍,张淑娟,等. 应变率与含水率对冻土单轴压缩特性影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5):1373-1379.
- [12] 陈雨漫. 冻结黏土力学性能多参数试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2021, 30(01):45-50+65.
- [13] 栗晓林,王红坚,牛永红. 不同加载速率下冻结黏土的强度及破坏特性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12):2335-2340.
- [14] 黄永庭,马巍,何鹏飞,等. 不同荷载条件下冻土融化沉降过程试验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(01):184-194.
- [15] 王丹,杨成松,马巍,等. 正冻土冻结缘研究现状及展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(04):1195-1201.
- [16] GB/T 50123-2019, 土工试验方法标准[S].
- [17] D2487-00 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes: Unified Soil Classification System[S].
- [18] 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, 1985:261.
- [19] 苗祺,牛富俊,林战举,等. 季节冻土区高速铁路基冻胀研究进展及展望[J]. 冰川冻土, 2019, 41(03):669-679.
- [20] 于洪江,段鹏. 公路地基砾砂冻土在融冻过程中的抗剪强度试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(04):229-233.

(责任编辑 王利君)