

文章编号: 1674—8247(2020)03—0028—04  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.006

## 冻结泥炭质土力学性质试验研究

冯子亮

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**冻土受温度影响强烈,且在温度变化过程中常伴有冻融循环,对我国寒区工程造成了极大的损害。针对这一情况,本文在 $-6^{\circ}\text{C}$ 的温度下对冻结泥炭质土进行了单轴压缩试验和围压范围为 $1\sim 6\text{ MPa}$ 的三轴压缩试验,试验结果表明:(1)低围压和高围压下围压对冻结泥炭质土应力-应变曲线影响明显,而中等围压下围压对冻结泥炭质土应力-应变曲线的影响较小;(2)低围压、中等围压和高围压下围压对冻结泥炭质土强度的影响机制不同,冻结泥炭质土强度随围压的变化规律可分为3个阶段,分别对应于围压的3个阶段,即低围压下强度快速增长阶段、中等围压下强度缓慢增长阶段和高围压下强度降低阶段。结论可为相似地质条件下工程设计提供依据。

**关键词:**冻结;泥炭质土;围压;强度

**中图分类号:**TU441<sup>+</sup>.2 **文献标志码:**A

28

## Experimental Study on the Mechanical Properties of Frozen Peat Soil

FENG Ziliang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Frozen soil is strongly affected by temperature, and it is often accompanied with freeze-thaw cycles when temperature changes, which causes great damage to the projects in cold regions of China. In view of the above situation, uniaxial compression test and triaxial compression test with confining pressure range of  $1\sim 6\text{ MPa}$  are carried out for frozen peat soil at a temperature of  $-6^{\circ}\text{C}$  in the paper. The test results shows that: (1) Both low confining pressure and high confining pressure have a significant effect on the stress-strain curve of frozen peat soil, while the medium confining pressure has a smaller effect on it. (2) The influence mechanism of low, medium and high confining pressure on frozen peat soil strength is different. The change law of frozen peat soil strength can be divided into three stages, which correspond respectively to the three stages of confining pressure, namely, the rapid increase stage of strength under low confining pressure, the slow increase stage of strength under medium confining pressure and the decrease stage of strength under high confining pressure. The results could provide basis for the engineering designs under the similar geological conditions.

**Key words:** frozen; peat soil; confining pressure; strength

冻土是一种不良地基土,物理力学性质复杂多变,不仅受土质、含水量、围压的影响,还受温度、含冰量的影响。因此,冻土的物理力学性质极不稳定,受温度影

响尤为强烈,在四季温度变化过程中,往往伴有冻融循环。在土体冻融状态改变过程中,不仅会产生冻胀、融沉等工程地质灾害,还会降低土体强度,削弱土体抵抗

收稿日期:2019-11-04

作者简介:冯子亮(1985-)男,工程师。

基金项目:四川省重点研发项目(2018GZ0050)

引文格式:冯子亮.冻结泥炭质土力学性质试验研究[J].高速铁路技术,2020,11(2):28-31.

FENG Ziliang. Experimental Study on the Mechanical Properties of Frozen Peat Soil[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 28-31.

变形的能力,对我国寒区工程造成了极大的损害。对冻土的变形和强度特性进行研究,不仅能为该地区工程病害的防治提供参考依据,还能为同类气候条件下工程的设计、施工和运营提供理论基础。

吴紫汪等人<sup>[1]</sup>对两淮地区冻结粘性土、粗颗粒的砂土、砂砾石土进行了系统的试验研究,得出温度是控制冻土强度指标的主要因素,冻土的单轴抗压强度值随温度的降低而线性增大,土质是冻土抗压强度的一个重要影响因素,冻土单轴强度随密度和含水率增大而增大。Chamberlain 等人<sup>[2]</sup>对一种渥太华细砂和一种冰碛物(粉质土)进行了大范围围压下的三轴压缩试验,发现冻土强度随着围压的增大先增大,当围压达到一定值后,冻土强度随围压增大呈减小趋势,若围压继续增大则强度又表现为增大趋势。他们认为,强度随围压增大而减小的过程主要是由冰的压碎、压融所引起的。后来诸多研究都证实了这一现象<sup>[3-7]</sup>。常晓晓等人<sup>[8]</sup>对取自华东某地的深部粘土人工冻结后进行了室内单轴和三轴压缩试验,分析了高围压下冻结深部粘土的应力-应变行为与单轴压缩条件下应力-应变行为的异同,并探讨了围压和温度对冻结粘土强度的影响规律。徐湘田等人<sup>[9]</sup>在-6℃的温度下对含盐量为0.5%的冻结粉质砂土在0.3~18 MPa的围压范围内进行了三轴压缩试验,分析了含盐冻结粉砂的变形、强度及弹性模量随围压的变化规律。目前,针对冻结泥炭质土的相关研究还鲜有文献报道,因此有必要针对冻结泥炭质土开展三轴压缩试验。

根河市位于大兴安岭北段西坡,呼伦贝尔市北部,地理坐标东经120°12'~122°55',北纬50°20'~52°30',是中国纬度最高的城市之一,也是中国最冷的城市,年平均气温-5.3℃,极端低温-58℃,年封冻期210 d以上。本文在-6℃的温度下对取自根河市的冻结泥炭质土进行了单轴压缩试验和围压范围为1~6 MPa的三轴压缩试验,并根据试验结果分析了冻结泥炭质土的变形特征和强度随围压的变化规律。

## 1 试验概况

### 1.1 土样基本性质

本文所用土样为内蒙古自治区根河市的泥炭质土,其中粒径<0.075 mm的粒组占90%以上,属于粉质黏土,液限38.14%,塑限27.76%,颗粒组分布如表1所示<sup>[10]</sup>。

表1 泥炭质土粒径分布表

粒径/mm	<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2
质量百分比/%	91.26	3.69	2.80	1.86	0.39

### 1.2 试样制备

试样的制备按以下步骤进行。

(1)将取自根河地区的泥炭质土烘干、碾碎后,过2 mm筛,配置成含水率为18%左右的散土体,密封静置24 h,使水分分布充分、均匀,后开始制样。

(2)根据试验规范,按照密度1.73 g/cm<sup>3</sup>称取适量的土体,分5层压入内径50 mm、高100 mm的圆柱形试样模具内,在试样两端各垫一块透水石,进行抽气饱水,待试样饱和后将其两端的透水石更换为环氧树脂垫片,连同模具一同置于-30℃的低温环境下快速冻结48 h,防止试样水分迁移。

(3)将冻结后的土样取出脱模,并在试样两端垫上环氧树脂垫片后套入橡胶模内,随后将试样放入恒温箱内,恒温至目标温度后进行试验。

### 1.3 试验设备与设置

本文采用GDS液压冻土动三轴仪,轴力变化范围为0~200 kN,围压控制范围为0~20 MPa,温度范围为-30℃~20℃,温度控制精度±0.1℃。试样过程中,轴向加载采用位移控制模式,加载速率1 mm/min。

试验过程如下:

(1)将恒温至目标温度的试样从恒温箱取出,迅速放入GDS压力腔内,控制试验温度为-6℃,待压力腔内温度稳定后,缓慢移动轴向加压柱塞,使其与试样顶端完全接触,后开始加载。

(2)在进行单轴压缩试验时,关闭围压控制系统,对试样直接进行加载,直至试样破坏。

(3)在进行三轴压缩试验时,开启围压控制系统,控制围压至目标围压后保持2 min,待围压稳定后进行轴向加载,直至轴向应变达到20%后结束试验。

试验过程中每隔1 s对试样进行1次数据采集。试验结束后,根据数据采集系统记录的数据,绘制出不同围压下冻结泥炭质土的应力-应变曲线,并确定出其强度进行分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 围压对冻结炭泥质土变形特性的影响

不同围压下的冻结炭泥质土的应力-应变曲线如图1所示。

由图1可以看出,围压对炭泥质土变应力-应变曲线及破坏形式均有明显影响。在单轴压缩条件下,冻结炭泥质土的应力-应变曲线表现出应变软化型特性,有明显的应力峰值,其破坏形式为脆性破坏。该曲

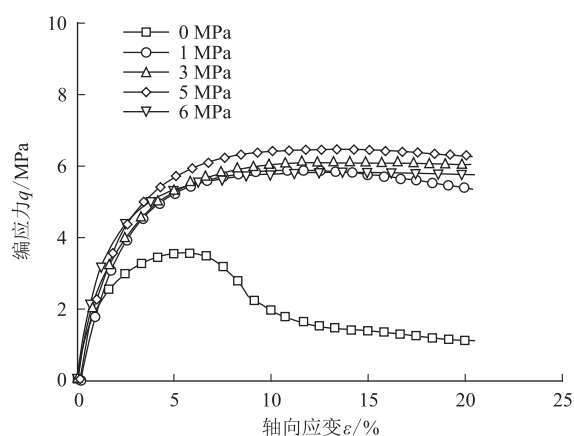


图1 不同围压下冻结泥炭质土应力-应变曲线图

线可大致分为三个阶段,即初始准弹性阶段、塑性变形阶段和软化阶段。在初始准弹性阶段,偏应力较小,应力-应变曲线基本呈线性变化;当所承受偏应力达到屈服极限后,试样进入塑性变形阶段,应力-应变曲线的斜率逐渐减小,表明试样抵抗变形的能力逐渐下降,当其达到峰值应力后,试样脆性劈坏;此后应力-应变曲线进入软化阶段,由于试样已破坏,该阶段应力随应变增大逐渐减小。

在三轴压缩条件下,冻结泥炭质土的变形特性及破坏形式与围压有关,当围压小于1 MPa时,应力-应变曲线末端会出现略微的应变软化特性,破坏形式为脆性破坏;当围压大于1 MPa后,各围压下冻结泥炭质土应力-应变软化特征基本消失,表现出轻微的硬化特性,其破坏形式由脆性破坏转化为塑性破坏。

围压超过1 MPa后,各围压下冻土体的变形行为分为两个阶段,即初始准弹性阶段和塑性硬化阶段。初始准弹性阶段的变形行为受围压影响明显,直线段斜率随着围压的增大而增加,这是由于围压的增加使得土体的压密作用增强,偏应力较小,因此土体抵抗初始压缩变形的能力随围压的增大而增大;塑性硬化阶段的应力随应变的增大继续增大,但其增长速率明显减小,值得注意的是各围压下冻结泥炭质土的应力-应变曲线开始趋近,受围压的影响逐渐减弱,这是因为试样是含冰量较高的饱冰冻结黄土,在偏应力较大时,冰作为一种晶体材料,其变形主要受剪切控制,受静水压力的影响很小,加之在冻土三轴试验中无法实现排水、排气,从而使得饱冰冻土在后期变形过程中受围压的影响较小;当围压进一步增大时,冻结泥炭质土应力-应变曲线又开始受到围压的影响,这是因为高围压下,试样内的冰出现了压碎、压融现象,且围压越大,该现象越明显。

## 2.2 强度特性分析

本文根据 GB/T 50123 - 1999《土工试验方法标

准》<sup>[11]</sup>确定炭泥质土强度值。当应力-应变曲线有峰值时,取曲线上峰值应力为强度值,无峰值时,取15%轴向应变时的偏应力值为强度值。冻结炭泥质土在各围压下的强度值如图2所示。

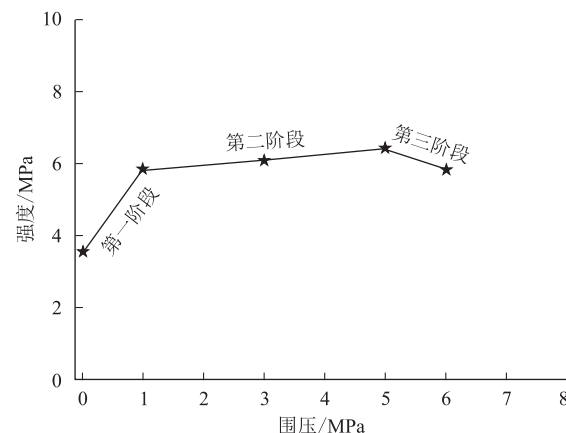


图2 不同围压冻结泥炭质土强度图

由图2可以看出,冻结泥炭质土强度随围压的变化可以分为三个阶段,即快速增大阶段、缓慢增大阶段和降低阶段。

### (1) 第一阶段:快速增大阶段

当围压  $0 \text{ MPa} \leq \sigma_3 < 1 \text{ MPa}$ , 强度由 3.56 MPa 增至 5.88 MPa。在此阶段围压的增大使冻结泥炭质土颗粒间的排列更加紧密,增大了颗粒间的咬合摩擦和破坏面上的正应力,从而使冻结泥炭质土的强度增加。

### (2) 第二阶段:缓慢增大阶段

当围压  $1 \text{ MPa} \leq \sigma_3 \leq 5 \text{ MPa}$ , 强度由 5.88 MPa 增至 6.43 MPa, 围压为 5 MPa 时,强度值最大,为 6.43 MPa, 围压为 1 MPa 时,强度值最小,为 5.88 MPa,二者相差 0.55 MPa。在第二阶段的围压范围内,围压增大将继续增强颗粒之间的咬合和摩擦,增加土体的强度,但围压的增大和加载过程中轴向应力的增加使土体内的胶结冰破碎,甚至可能发生胶结冰融化,使得土体的强度降低,强度的增长速率较第一阶段较为缓慢。

### (3) 第三阶段:降低阶段

当围压  $5 \text{ MPa} < \sigma_3 \leq 6 \text{ MPa}$ , 强度由 6.43 MPa 下降至 5.83 MPa,这是因为该阶段土体内冰的压融现象明显,一方面使得强度随围压的增加而整体降低,另一方面压融所产生的孔隙水可承担围压的增量,使固体颗粒上作用的静水压力随围压的变化较小,使得强度受围压的影响不再如前两阶段明显。这也反映在该围压范围内的应力-应变曲线呈现出相互重叠的趋势上。各围压下,冻结泥炭质土的强度与各围压阶段的强度变化速率如表2所示。

表 2 各围压下的强度值与各阶段的变化速率表			
阶段区间	围压/MPa	强度/MPa	增长幅度/MPa
第一阶段	0	3.56	2.32
	1	5.88	
第二阶段	1	5.88	0.14
	3	6.08	
	5	6.43	
第三阶段	5	6.43	-0.6
	6	5.83	

3 结论

本文在 -6 ℃ 温度条件下,对冻结泥炭质土进行了单轴压缩试验和围压范围为 1 ~ 6 MPa 的三轴压缩试验,根据试验结果,分析了冻结泥炭质土的变形特征和强度随围压的变化规律,为相似地质条件下工程设计提供依据。主要结论如下:

(1) 单轴压缩条件下,冻结泥炭质土应力 - 应变曲线表现为应变软化型,破坏形式为脆性破坏,其变形过程可以分为初始准弹性阶段、塑性变形阶段和软化阶段三个阶段;三轴压缩条件下,当围压较低时,冻结泥炭质土的应力 - 应变曲线末端会出现略微的应变软化,当围压较高时,其应力 - 应变曲线表型为应变硬化型,破坏形式为脆性破坏。

(2) 冻结泥炭质土强度随围压的变化规律大体可以分为三个阶段,即快速增大阶段、缓慢增大阶段和降低阶段。快速增大阶段,由于围压较小,围压对强度仅有强化作用;缓慢增大阶段由于试样内部分冰被压碎、压融,围压对强度有强化和弱化双重作用,但强化作用占据主导;降低阶段,由于围压较大,试样内冰被大量压碎、压融,使得围压对冻结泥炭质土强度的弱化作用占据主导,强度随围压增大而降低。

参考文献:

[1] 崔托维奇著(Чълтович, Н. А. ). 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.  
Чълтович, Н. А. Frozen Soil Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1985.

[2] 吴紫汪, 马巍. 冻土的强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.  
WU Ziwan, MA Wei. Strength and Creep of Frozen Soil [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994.

[3] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM R. The Mechanical Behaviour of Frozen Earth Materials under High Pressure Triaxial Test Conditions [J]. Géotechnique, 1972, 22(3): 469 - 483.

[4] PARAMESWARAN V R, JONES S J. Triaxial Testing of Frozen Sand [J]. Journal of Glaciology, 1981, 27(95): 147 - 155.

[5] ALKIRE B D, ANDERSLAND O B. The Effect of Confining Pressure on the Mechanical Properties of Sand-Ice Materials [J]. Journal of Glaciology, 1973, 12(66): 469 - 481.

[6] 余群, 张招祥, 沈震亚, 等. 冻土的瞬态变形和强度特性[J]. 冰川冻土, 1993, 15(2): 258 - 265.  
YU Qun, ZHANG Zhaoxiang, SHEN Zhenya, et al. Instantaneous-state Deformation and Strength Behavior of Frozen Soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(2): 258 - 265.

[7] MA Wei, WU Ziwan, ZHANG Lixin, et al. Analyses of Process on the Strength Decrease in Frozen Soils under High Confining Pressures [J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1): 1 - 7.

[8] 李洪升, 杨海天. 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 - 48.  
LI Hongsheng, YANG Haitian. The Strain Rate Sensitivity Analysis of Compression Strength of Frozen Soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 40 - 48.

[9] 马巍, 王大雁, 常小晓. 模拟 K0 固结后不同初始围压下冻土应力 - 应变特性研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(3): 344 - 348.  
MA Wei, WANG Dayan, CHANG Xiaoxiao. Research on Stress-strain Modeling for Frozen Soils Subjected to K0 Consolidation under Various Confining Pressures [J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(3): 344 - 348.

[10] 杨宗维. 冻/融过程中内蒙古东北部典型土体导热系数的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.  
YANG Zongwei. Laboratory Investigation on Thermal Conductivity of Typical Soil in Northeast Inner Mongolia during Freezing and Thawing Process [D]. Hohhot: Inner Mogolia University, 2018.

[11] GB/T 20123 - 1999 土工试验方法标准[S].  
GB/T 20123 - 1999 Standard for Geotechnical Testing Method [S].

(编辑:车晓娟 白雪)