

DOI:10.11918/202104143

季节冻土区黄土抗剪强度变化特征及其影响因素

王万平,张熙胤,王 义,于生生,徐振江,孙斌洁

(兰州交通大学 土木工程学院,兰州 730070)

摘要:黄土作为一种特殊的土质,其力学特性极易受水热效应的影响。为研究温度、压实度、含水率等因素对季节冻土区黄土抗剪强度的影响,以中国西部典型的兰州黄土为研究对象,通过低温三轴试验,探讨温度、压实度、含水率的变化对冻结兰州黄土抗剪强度的影响。结果表明:冻结兰州黄土的黏聚力及内摩擦角随着温度的降低呈升高趋势,其中,黏聚力受温度的影响较大,而内摩擦角受温度的影响相对较小;冻结兰州黄土的黏聚力及内摩擦角随着土体压实度的增加而增大;对于含水率,由于土体中冰晶以及未冻水会使土骨架自身强度以及土颗粒与冰之间的胶结力发生变化,以土体最优含水率为分界点,分界点两边的冻结兰州黄土抗剪强度呈相反的变化趋势。由此可知温度、压实度及含水率会对冻结兰州黄土的抗剪强度产生较大的影响,在有黄土覆盖层的季节冻土区工程建设中应充分考虑。

关键词: 季节冻土区;兰州黄土;三轴试验;应力-应变曲线;抗剪强度

中图分类号: TV16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)08-0143-08

Variation characteristics and influencing factors of loess shear strength in seasonal frozen soil region

WANG Wanping, ZHANG Xiyin, WANG Yi, YU Shengsheng, XU Zhenjiang, SUN Binjie

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Loess is a kind of special soil, whose mechanical characteristics are easily affected by hydro-thermal effect. In this study, a typical type of loess (Lanzhou loess) in western China was selected as the research object to investigate the effects of temperature, degree of compaction, and water content on the shear strength of seasonal frozen loess through low temperature triaxial test. Results showed that the cohesion and internal friction angle of the frozen Lanzhou loess increased with the decrease in temperature. The cohesion was greatly affected by temperature, while the internal friction angle was relatively less affected by temperature. In addition, the cohesion and internal friction angle of the frozen Lanzhou loess increased with the increase in the degree of soil compaction. In terms of water content, ice crystal and unfrozen water in the soil changed the strength of soil skeleton and the bonding force between soil particles and ice. Taking the optimal water content of the soil as the boundary point, the shear strength of the frozen Lanzhou loess on both sides of the boundary point showed opposite changing trends. It can be concluded that temperature, compaction degree, and water content have great influence on the shear strength of the frozen loess in Lanzhou, which should be fully considered in the engineering construction of the seasonal frozen soil region covered by loess.

Keywords: seasonal frozen soil region; Lanzhou loess; triaxial test; stress-strain curve; shear strength

黄土在中国分布广泛,区域分布面积约为63 km²,占中国国土总面积的6.6%^[1],其中,位于黄土高原的陕西省、山西省和甘肃省黄土连续分布,占中国黄土分布总面积的70%以上^[2],且以上地区均属季节性冻土区,地区温差较大,冻融作用强烈。黄土的物理力学性质因冻融作用而发生变化,导致一系列工程问题。随着国家西部大开发的深入发

展,国家重点基础工程向西部季节冻土地区推进,黄土的冻融灾害问题凸显^[3-8],冻融作用严重影响黄土地区的工程建设及运营。

抗剪强度作为黄土的一个重要力学性质,反映土体抵抗剪切滑动的能力。当荷载在土体内部产生的剪应力达到土体的抗剪强度时,土体遭到破坏,反映到实际工程中表现为边坡失稳、路堑滑塌、地基不均匀沉降等现象,因而,研究黄土的抗剪强度指标具有重要的工程实用价值。众多学者通过三轴^[9-12]及直剪等试验方法对此展开了研究。李双好等^[13]以西宁市原状黄土为研究对象,结合封闭系统下的三向慢速冻结试验、恒温恒湿的融化试验及三轴剪

收稿日期:2021-04-30

基金项目:国家自然科学基金(51808273,52068045);中国博士后科学基金面上项目(2018M643767);甘肃省科技计划项目-杰出青年基金(20JR5RA430)

作者简介:王万平(1994—),男,硕士研究生

通信作者:张熙胤,zhangxiyin@mail.lzjtu.cn

切试验,研究不同冻融温度梯度下抗剪强度指标的变化规律。蔡国庆等^[14]对不同含水率、不同干密度的非饱和黄土试样进行直剪试验,研究了非饱和黄土的抗剪强度,测定非饱和黄土的土-水特征曲线,并结合非饱和黄土的微观结构研究,分析含水率对微观结构的影响。闫亚景等^[15]以兰州重塑黄土为对象,基于直剪试验,研究了黄土抗剪强度及其参数在不同溶滤次数下的变化特征。胡长明等^[16]针对吕梁地区压实马兰黄土的变形及抗剪强度特性开展了压缩及直剪试验研究,分析了初始压实度及初始含水量与抗剪强度指标之间的关系及其对土体压缩变形的影响。

由此可见,现阶段对黄土抗剪强度及其影响因素的研究主要集中在非冻土以及冻结黄土力学特性等方面,而在季节冻土区黄土将经历冻融变化,对其抗剪强度的影响因素研究尚不完善。因此,以兰州黄土为研究对象,进行低温冻土三轴试验,取温度、

压实度、含水率 3 个主要因素,分析了不同因素影响下黄土试样的主应力差-应变曲线的变化、土体抗剪强度指标的影响规律,以期能为黄土覆盖层的季节冻土区工程建设提供依据。

1 试验

1.1 试样制备及试验过程

以兰州交通大学某基坑土为研究对象,用 5 mm 孔径筛子过筛并烘干,按照不同干密度、不同含水率分别称取相应的干土与水,充分搅拌后用塑料袋密封,静置 12 h,使试样中的水分与土颗粒分布均匀,所制试样尺寸高 200 mm、直径 101 mm。试样制作完成后,用保鲜膜包裹,以减少水分的流失,接着将其置于低温冻土三轴仪冷冻仓中,仪器调至试验所需的温度,对试样冻结 24 h 后,开始加竖向力,直至破坏,同时记录试验数据,试样的制作、安装及卸载如图 1 所示。

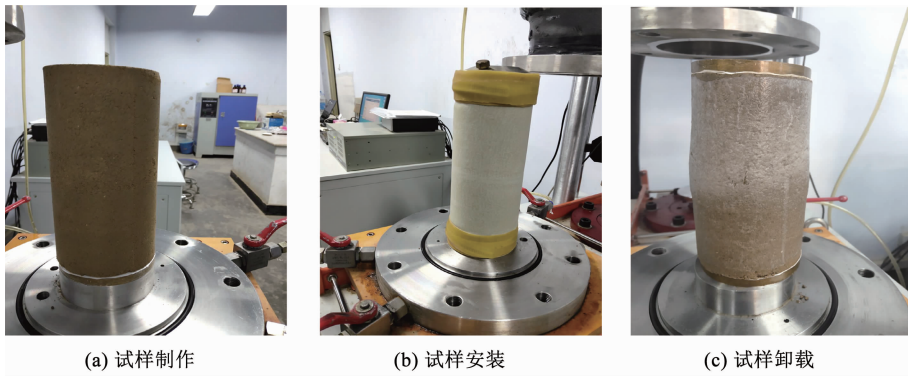


图 1 试样的制作、安装及卸载

Fig. 1 Sample fabrication, installation, and unloading

1.2 试验仪器

试验仪器主要包含 3 部分:CSY-20 型低温冻土三轴仪,主要用来提供冷冻仓、竖向力的加载及各种传感器的布置,冷冻仓的温控精度为 0.1 °C;低温恒

温浴液循环两用槽,适用温度范围为 40 ~ -40 °C,由于采用酒精作为冷却液,最低温度可达 -10 °C;操作及数据采集系统,负责操作信号输入及数据的采集,具体如图 2 所示。



图 2 试验仪器

Fig. 2 Test instrument

1.3 试验方案

本试验分温度、压实度、含水率 3 个变量进行, 具体试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况
Tab. 1 Test conditions

工况	含水率/ %	土样尺寸 $h \times D/\text{mm} \times \text{mm}$	围压/ kPa	温度/ ℃	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	10	200 × 101	50	-5	1.75
2	10	200 × 101	100	-5	1.75
3	10	200 × 101	200	-5	1.75
4	14	200 × 101	50	-5	1.75
5	14	200 × 101	100	-5	1.75
6	14	200 × 101	200	-5	1.75
7	16	200 × 101	50	-5	1.75
8	16	200 × 101	100	-5	1.75
9	16	200 × 101	200	-5	1.75
10	14	200 × 101	50	2	1.75
11	14	200 × 101	100	2	1.75
12	14	200 × 101	200	2	1.75
13	14	200 × 101	50	-9	1.75
14	14	200 × 101	100	-9	1.75
15	14	200 × 101	200	-9	1.75
16	14	200 × 101	50	-5	1.65
17	14	200 × 101	100	-5	1.65
18	14	200 × 101	200	-5	1.65
19	14	200 × 101	50	-5	1.85
20	14	200 × 101	100	-5	1.85
21	14	200 × 101	200	-5	1.85

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线

土体的变形和强度主要通过应力-应变特性来反映, 土的宏观变形通过土颗粒的移动变化来表现,

不同的应力增量造成不同的应变增量, 表现出土体的非线性特性, 由于土体本身性质存在差异会引起应力-应变关系曲线存在差异。应力-应变关系曲线主要有 5 种形式, 即理想塑性、硬化型、弱硬化型、软化型、弱软化型。

2.1.1 不同围压主应力差-应变曲线

不同含水率、不同温度的土样在围压为 50、100、200 kPa 下的主应力差-应变曲线如图 3 所示。可以看出, 虽然各工况变量不同, 围压对其主应力差-应变曲线的影响规律相似, 所有曲线均呈现弱软化型, 即随着围压从 50 kPa 到 200 kPa 逐渐增大, 主应力差-应变关系曲线由平缓逐渐变为陡峭, 即围压越大主应力差值就越大, 尤其对于融土工况, 这种规律愈加明显。主要原因为围压越大, 土体越密实, 土颗粒之间的咬合摩擦力更强, 反映到宏观上土体的抗剪强度越高^[17]。其次, 当土中水冻结时, 体积膨胀使得土颗粒间的孔隙面积增大, 而围压会减小冻结所增大的孔隙面积, 使土体强度得到一定程度恢复, 则随着围压增大, 孔隙体积恢复的力度越大^[18], 即围压可以提高土体的抗剪强度。

2.1.2 不同温度主应力差-应变曲线

由图 4 可知, 在同一含水率、不同围压工况下, 各温度主应力差-应变曲线变化规律相似, 曲线形式为弱软化型。随温度降低, 主应力差逐步增大, 融土冻结前后其特征更加明显。以围压 50 kPa 为例, 温度为 -5℃ 土体的最大主应力差约为 2℃ 的 10 倍, 充分说明冻结能够明显提高土体抗剪强度。这是由于在适当的含水率条件下, 温度较低时(低于 0℃), 土颗粒间的自由水及部分弱结合水开始由液态变为固态, 使土颗粒黏结成为一个整体, 土体的抗剪强度迅速增加^[19]; 其次, 冻结温度越低, 土体空隙中的水分冻结越充分, 土体中的含冰率越高, 对土体骨架起到“加筋”作用, 提高土体的抗剪强度^[20]。

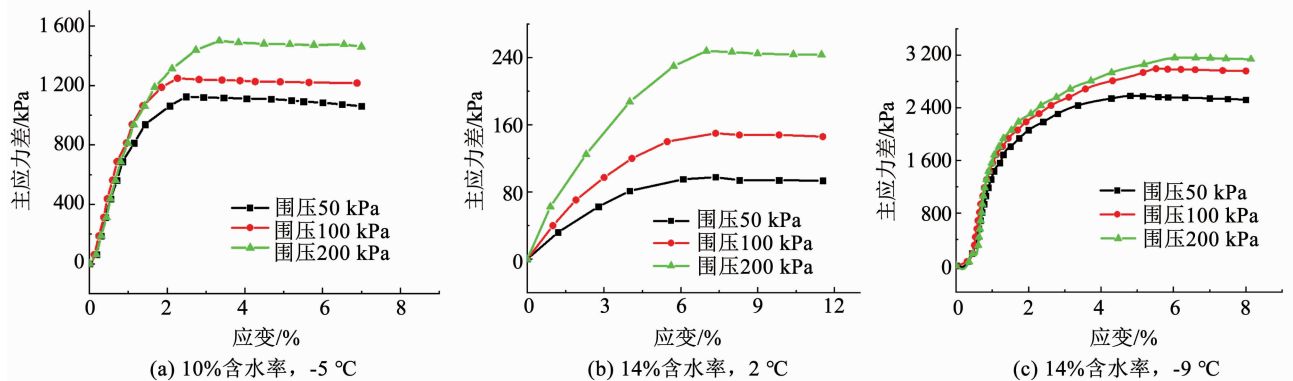


图 3 不同围压各工况主应力差-应变曲线

Fig. 3 Principal stress difference-strain curves under different confining pressures

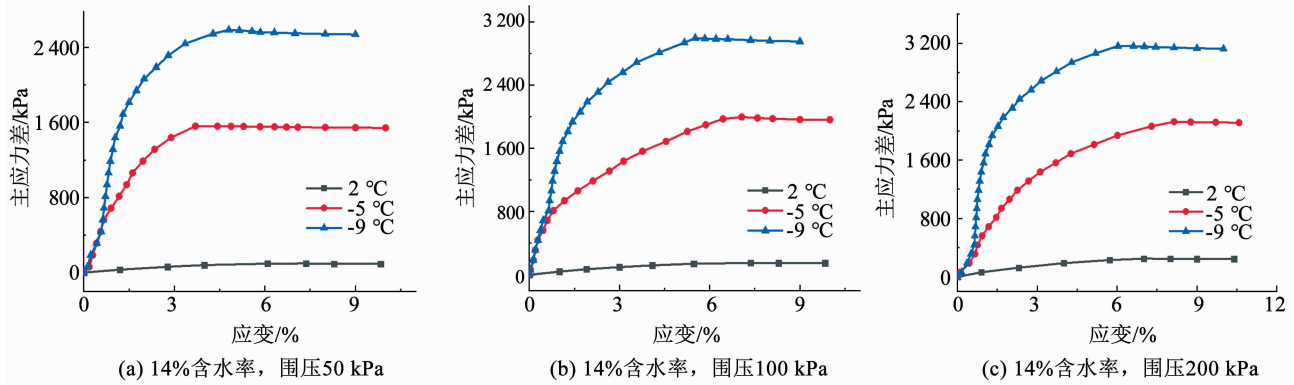


图4 不同温度各工况主应力差-应变曲线

Fig. 4 Principal stress difference-strain curves under different temperatures and working conditions

2.1.3 不同压实度主应力差-应变曲线

由于试验所用试样体积一定,可用土体的干密度控制其压实度,取相同含水率、相同温度,不同干密度试样主应力差-应变曲线如图5所示。可以看出,所有主应力差-应变曲线均呈现弱软化型,主应力差随着压实度的增大而增大,随着应变的增大,

关系曲线由陡峭逐渐变为平缓,且后期呈现缓慢下降的趋势。提高土体的压实度可以增加土体抗剪强度,原因是压实度的大小会影响土体内部颗粒的分布,当压实度逐渐提高,土体空隙比越来越小,颗粒间距进一步缩小,颗粒间连接更加紧密,其抗剪强度逐渐提高^[21]。

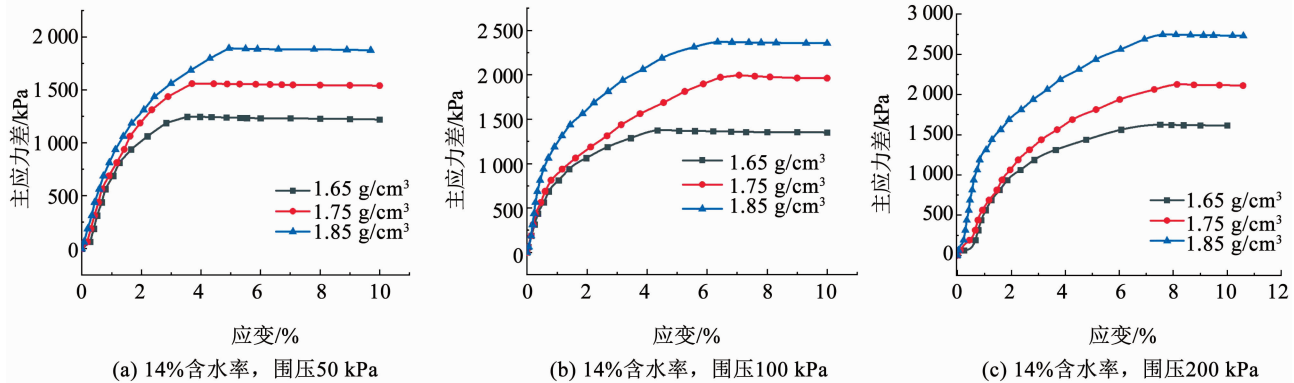


图5 不同压实度各工况主应力差-应变曲线

Fig. 5 Principal stress difference-strain curves under different compaction degrees

2.1.4 不同含水率主应力差-应变曲线

取相同的温度及干密度,相同围压工况下不同含水率试样主应力差-应变曲线如图6所示。可以看出,不同围压下曲线规律大致相同。以初始含水率14%为分界点(本试验所用土最优含水率为13.8%),含水率小于14%时,随着含水率的增大,主应力差逐渐增大;当土体初始含水率大于14%时,呈现相反的趋势,即随着含水率的增大,主应力差逐渐减小。这可能是由于冻土的强度主要由土骨架自身强度、冰的强度以及土颗粒与冰之间的胶结力构成^[22],负温条件下,随着含冰量的增加,冻土的强度主要由冰的强度体现,所以,冻土的抗剪强度也相应增大。当土体初始含水率继续增大,相应的土体含冰量增大,土颗粒骨架被撑开,导致土与冰之间的胶结力减弱^[23]。其次,相同温度下含水率的增大也会导致冻土中未冻水含量增加,进而使土颗粒之

间的摩擦力减弱,土骨架自身强度降低。

2.2 抗剪强度指标

莫尔-库仑强度理论在土抗剪强度理论中应用最广泛,采用黏聚力和内摩擦角两个指标表示抗剪强度。其中,黏聚力反映土颗粒间的各种物理化学作用力,包括库仑力、范德华力、胶结作用力等,主要由颗粒间的距离和胶结物质的胶结力决定。内摩擦角主要反映颗粒之间的移动摩擦作用和咬合摩擦作用^[24]。为进一步了解冻结对土体力学性质的影响,针对温度、压实度及含水率对黏聚力及内摩擦角的影响做了分析。

以 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为横坐标, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为纵坐标绘制应力圆,做通过各圆顶点的公切线。根据公切线的倾角及与纵坐标的截距分别计算黏聚力及内摩擦角,即

$$\begin{cases} \phi = \sin^{-1}(\tan \alpha) \\ c = d/\cos \phi \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为公切线的倾角, d 为公切线与纵轴的截距。不同工况下黏聚力及内摩擦角如表 2 所示。

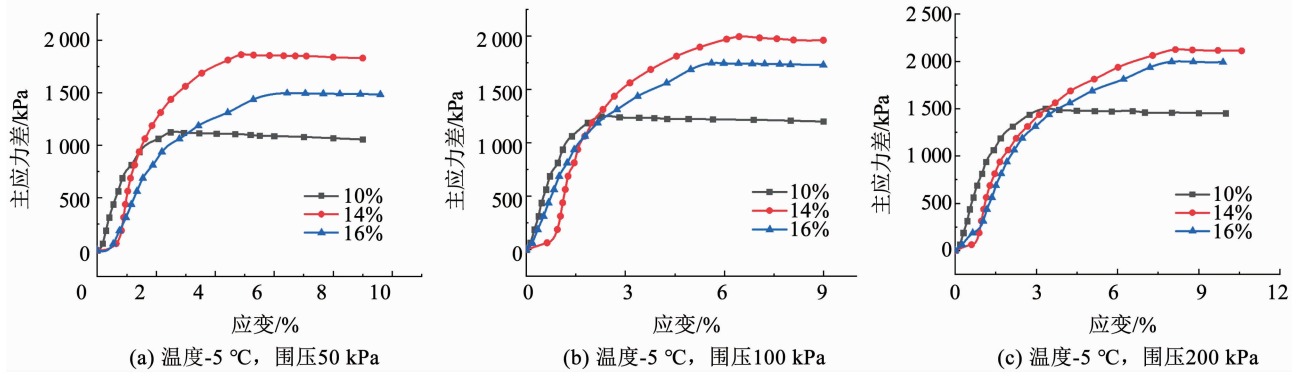


图 6 不同含水率各工况主应力差 - 应变曲线

Fig. 6 Principal stress difference-strain curves under different water content

表 2 不同变量土体抗剪强度指标

Tab. 2 Soil shear strength parameters with different variables

工况	含水率/ %	土样尺寸 $h \times D$ / mm \times mm	围压/ kPa	温度/ °C	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
1	10	200 \times 101	50	-5	1.75		
2	10	200 \times 101	100	-5	1.75	355.95	24.76
3	10	200 \times 101	200	-5	1.75		
4	14	200 \times 101	50	-5	1.75		
5	14	200 \times 101	100	-5	1.75	568.05	25.99
6	14	200 \times 101	200	-5	1.75		
7	16	200 \times 101	50	-5	1.75		
8	16	200 \times 101	100	-5	1.75	500.67	25.36
9	16	200 \times 101	200	-5	1.75		
10	14	200 \times 101	50	2	1.75		
11	14	200 \times 101	100	2	1.75	15.57	19.52
12	14	200 \times 101	200	2	1.75		
13	14	200 \times 101	50	-9	1.75		
14	14	200 \times 101	100	-9	1.75	798.41	30.49
15	14	200 \times 101	200	-9	1.75		
16	14	200 \times 101	50	-5	1.65		
17	14	200 \times 101	100	-5	1.65	407.62	24.16
18	14	200 \times 101	200	-5	1.65		
19	14	200 \times 101	50	-5	1.85		
20	14	200 \times 101	100	-5	1.85	638.96	27.85
21	14	200 \times 101	200	-5	1.85		

2.2.1 温度对土体抗剪强度指标的影响

在温度为 2、-5、-9 °C 3 个工况下,取干密度为 1.75 g/cm³,含水率为 14% 的土体抗剪强度指标曲线如图 7 所示。总体来看,土体黏聚力和内摩擦角随着温度的降低而增高,温度对内摩擦角的影响较小,对黏聚力的影响巨大,尤其是 2 ~ -5 °C。结合表 2 可知,2 °C 时黏聚力为 15.57 kPa, -5 °C 时黏聚力为 568.05 kPa,黏聚力呈数十倍的增长,其后,随着温度的降低增长速度变缓。研究表明,土体冻结是以土中孔隙水结晶为表征^[25],当温度降至土体中水的冻结温度时,会发生剧烈的冰水相变,由于温度降低,冰晶迅速增长,土颗粒间的胶结力显著提高。而当温度继续降低,土中未冻水含量相对较少,含冰量增长缓慢,晶核聚集为冰晶的速率较慢,因此,土颗粒间的胶结力增长较慢^[26]。

2.2.2 压实度对土体抗剪强度指标的影响

以干密度控制试样的压实度,含水率 14%、温度 -5 °C、干密度分别为 1.65、1.75、1.85 g/cm³ 3 个工况所得土体抗剪强度指标如图 8 所示。可以看出,土体黏聚力与内摩擦角均随着压实度的增大而增大,明显可知压实度对于黏聚力的影响较大,而对于内摩擦角影响较小。这是由于土体压实度提高,

土颗粒间接触更加紧密,自由水逐渐转化为结合水,黏聚力随之逐渐增大;而土颗粒间距的进一步缩小会使其接触点的局部在剪切时产生应力集中,从而在接触点产生颗粒破碎屈服,有棱角的土颗粒被折断,而这些被折断的颗粒在重新排列时需要外力进行额外做功^[21],因此,提高土体压实度能够增强土体的抗剪强度。

2.2.3 含水率对土体抗剪强度指标的影响

由图 9 可知,当初始含水率小于 14% 时,黏聚力与内摩擦角随着含水率的增大而增大;当初始含水率大于 14%,其随着含水率的增大而减小。文中所取的 14% 接近本试验所用土体最优含水率 13.8%,因此,可将土体最优含水率作为其对抗剪强度指标影响的分界点。曲线出现如上形式变化的原因可能为,当初始含水率小于最优含水率时,随着土中水的冻结,土体中冰晶迅速增长,土颗粒间的胶结力显著提高,而随着初始含水率的继续增大,土颗粒中更多的水变为冰晶体,体积增大,空隙中的冰晶会对土颗粒形成挤压作用,使得土中空隙扩张,土颗粒骨架被撑开,导致土与冰之间的胶结力减弱^[23]。其次,冻土中未冻水含量的增加也会使得土骨架自身强度降低。

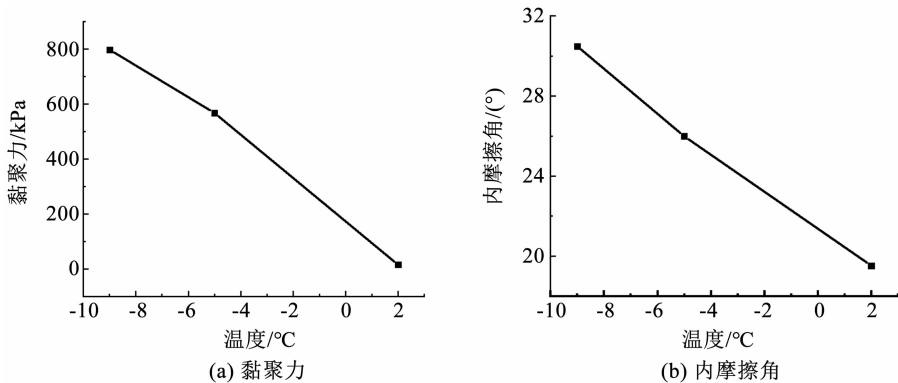


图 7 不同温度土体抗剪强度指标变化

Fig. 7 Variation of soil shear strength parameters at different temperatures

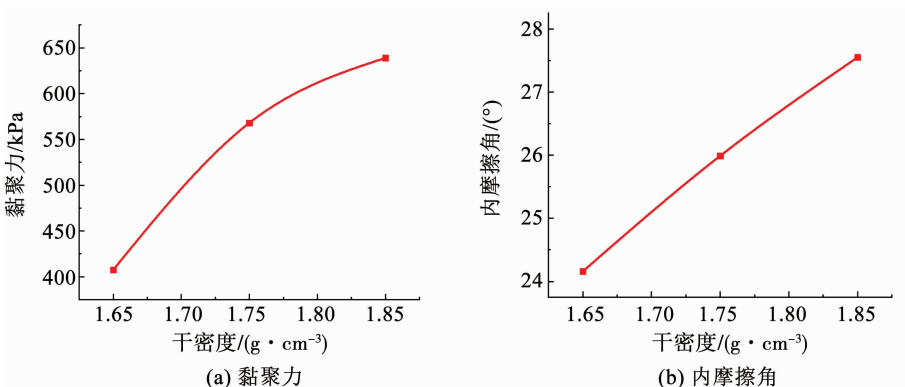


图 8 不同压实度土体抗剪强度指标变化

Fig. 8 Variation of soil shear strength parameters with different compaction degrees

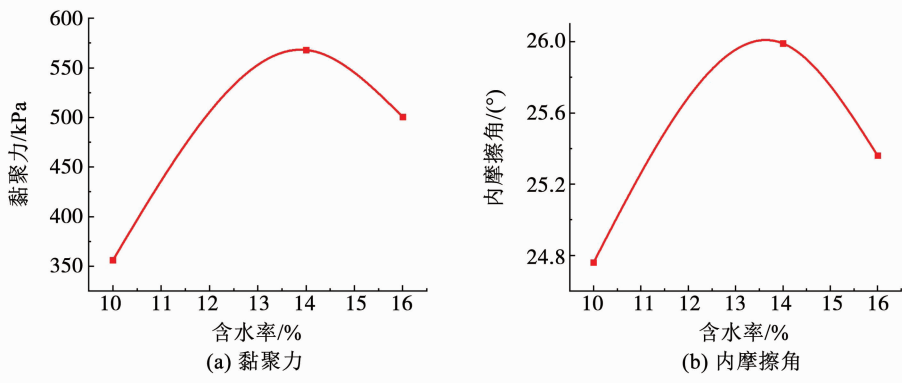


图9 不同含水率土体抗剪强度指标变化

Fig.9 Variation of soil shear strength parameters with different water content

3 讨论

与众多学者研究思路类似,冻土的变形和强度可以用应力-应变曲线进行说明,由本试验可知,对于不同影响因素(围压、温度、压实度、含水率)取不同的工况,其主应力差-应变曲线趋势相近,均呈弱软化型,即随着影响因素对应取值的增大,加载初期试样的强度增长较快,而后逐步趋于平缓,最后试样发生破坏,强度开始减小,曲线随之出现下降。对于主应力差-应变曲线,结合马巍等^[27]对冻土应力-应变曲线的研究方法,将冻结黄土应力-应变曲线分为3个阶段:

1)弹性阶段,即应力随应变呈线性增加的弹性阶段;

2)应变硬化阶段,该阶段既有弹性变形,又包括塑性变形,其特征是与弹性阶段相比,产生相同增量所需的应力增量要小得多,而且随着变形的增加越来越小;

3)屈服阶段或者流变阶段。进入这一阶段,荷载变化甚小,变形急剧增大,试样破坏。

冻土的抗剪强度指标包括黏聚力及内摩擦角。从本文试验结果看,以温度及压实度为变量,其黏聚力及内摩擦角的变化趋势与以往研究一致。变量为含水率时,以最优含水率为分界点,当试样含水率小于最优含水率时,其抗剪强度指标随着含水率的增大而增大,反之则呈现相反的规律。冻土的强度主要由土骨架自身强度、冰的强度以及土颗粒与冰之间的胶结力构成,其中胶结力发挥主要作用。而土体在冻结过程中,土骨架自身强度以及土颗粒与冰之间的胶结力发生变化,且上述所有变化均与土质、含水率等多种因素相关,并且相互耦合,非常复杂,土体的力学特征即为多种因素的综合反映。而单一影响因素及多种因素耦合对于冻结土体力学特征的影响程度目前没有明确的研究成果,还需更进一步的研究。仅从本试验结果看,对于冻结兰州黄土,初始含水率对于土骨架自身强度以及土颗粒与冰之间的胶结力会产生重大的影响。其次,本试验为冻土

室内试验,研究对象为重塑兰州黄土,其与原状兰州黄土在力学特性方面存在一定差距,这也是今后试验需补充完善的一个方面。

4 结论

1)温度、压实度及含水率会对土体的抗剪强度指标产生较大影响,在实际工程中应进行充分考虑。

2)土体的黏聚力及内摩擦角随着温度的升高而降低,温度对黏聚力影响较大,尤其是土体冻结前后,对内摩擦角影响则相对较小。

3)压实度对土体抗剪强度指标存在较大影响,黏聚力及内摩擦角随着土体压实度的升高而增加。

4)初始含水率对于土骨架自身强度以及土颗粒与冰之间的胶结力会产生巨大影响,以最优含水率为分界点,分界点两边冻结兰州黄土的抗剪强度呈相反的变化趋势。

参考文献

- [1]徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(7): 1297
XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in china and loess landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(7): 1297. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2007.07.001
- [2]曹伯勋. 地貌学及第四纪地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006
CAO Boxun. Geomorphology and quaternary geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006
- [3]李国玉,马巍,穆彦虎,等. 季节冻土区压实黄土湿陷特性研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 934
LI Guoyu, MA Wei, MU Yanhu, et al. Progress and prospects of the research on collapsibility of compacted loess in seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 934. DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0113
- [4]谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3
XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3
- [5]王念秦,罗东海. 黄土斜(边)坡表层冻结效应及其稳定性响应[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 760

- WANG Nianqin, LUO Donghai. Freezing effect on loess slope and its stability response [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18 (5): 760. DOI:10.3969/j.issn.1004-9665.2010.05.025
- [6] KAY B D, FUKUDA M, IZUTA H, et al. The importance of water migration in the measurements of the thermal conductivity of unsaturated frozen soils [J]. *Cold Region Science and Technology*, 1981, 5(2): 95. DOI:10.1016/0165-232X(81)90044-6
- [7] 王治军, 潘俊义, 周鹏, 等. 冻融作用对黄土湿陷性的影响 [J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(6): 710
WANG Zhijun, PAN Junyi, ZHOU Peng, et al. Influence of freezing and thawing on collapsibility of loess [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(6): 710
- [8] 朱赛楠, 殷跃平, 王文沛, 等. 新疆伊犁河谷黄土滑坡冻融失稳机理研究 [J]. *地球学报*, 2019, 40(2): 339
ZHU Sainan, YIN Yueping, WANG Wenpei, et al. Mechanism of freeze-thaw loess landslide in Yili River Valley, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2019, 40(2): 339. DOI: 10.3975/cagsb.2018.061904
- [9] QI Jilin, MA Wei. A new criterion for strength of frozen sand under quick triaxial compression considering effect of confining pressure [J]. *Acta Geotechnica*, 2007, 2(3): 221. DOI:10.1007/s11440-007-0034-z
- [10] YAMAMOTO Y, SPRINGMAN S M. Axial compression stress path tests on artificial frozen soil samples in a triaxial device at temperatures just below 0 °C [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(10): 1178. DOI:10.1139/cgj-2013-0257
- [11] ARENSON L U, JOHANSEN M M, SPRINGMAN S M. Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil samples [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, 15(3): 261. DOI:10.1002/ppp.498
- [12] MA Ling, QI Jilin, YU Fan, et al. Experimental study on variability in mechanical properties of a frozen sand as determined in triaxial compression tests [J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(1): 61. DOI: 10.1007/s11440-015-0391-y
- [13] 李双好, 李元勋, 高欣亚, 等. 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 48
LI Shuanghao, LI Yuanxun, GAO Xinya, et al. Effect of freezing and thawing on shear strength of intact loess [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 48. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.145
- [14] 蔡国庆, 张策, 黄哲文, 等. 含水率对砂质 Q3 黄土抗剪强度影响的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊2): 32
CAI Guoqing, ZHANG Ce, HUANG Zhewen, et al. Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S2): 32. DOI: 10.11779/CJGE2020S2006
- [15] 闫亚景, 文宝萍, 黄志全. 可溶盐对兰州非饱和和重塑黄土抗剪强度的影响 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(10): 2881
YAN Yajing, WEN Baoping, HUANG Zhiqian. Effect of soluble salts on shear strength of unsaturated remoulded loess in Lanzhou city [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 2881. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.014
- [16] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性 [J]. *工程力学*, 2013, 30(10): 108
HU Changming, MEI Yuan, WANG Xueyan. Deformation and shearing strength characteristic of compacted Malan loess in Liliang region [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 108. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0441
- [17] 李威. 围压及剪切速率对饱和和重塑黄土抗剪强度影响试验研究及数值模拟 [D]. 西安: 长安大学, 2018
- LI Wei. Experimental study on influencing factors of shear strength of saturated remoulded loess and discrete element analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018
- [18] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(23): 4313
WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(23): 4313. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.23.018
- [19] 黄星, 李东庆, 明锋, 等. 冻土的单轴抗压、抗拉强度特性试验研究 [J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1346
HUANG Xing, LI Dongqing, MING Feng, et al. Experimental study of the compressive and tensile strengths of artificial frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1346. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0158
- [20] 王儒默. 人工冻结粉质黏土力学性能试验与微观结构分析 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019
WANG Rumu. Mechanical properties test and microstructure analysis of artificially frozen silty clay [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019
- [21] 刘家伟. 黄土工程压实土-原状土接触面强度特性研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019
LIU Jiawei. Characteristics of strength of the interface between disturbed loess and compacted loess [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019
- [22] 肖海斌. 人工冻土单轴抗压强度与温度和含水率的关系 [J]. *岩土工程界*, 2008(4): 62
XIAO Haibin. Relationship between uniaxial compressive strength and temperature and water content of artificial frozen soil [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2008(4): 62. DOI:10.3969/j.issn.1674-7801.2008.04.018
- [23] 霍晓辉. 地震荷载作用下高含冰冻土地区桩基基础动力响应分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020
HUO Xiaohui. Analysis of pile foundation dynamic response under earthquake load in the high-frozen area [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020
- [24] 胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下压实度对粉质黏土力学性质影响的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1495
HU Tianfei, LIU Jiankun, FANG Jianhong, et al. Experimental study on the effect of cyclic freezing-thawing on mechanical properties of silty clay with different degrees of compaction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1495. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.1051
- [25] 郝慧, 马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1106
BING Hui, MA Wei. Experimental study on freezing point of saline soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1106
- [26] 孙飞翔. 冻融循环及温度变化下冻土力学特性对桩基承载力影响研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2017
SUN Feixiang. Study on the influence of mechanical properties of frozen soil on bearing capacity of pile under freeze-thaw cycles and temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Science Technology, 2017
- [27] 马巍, 王大雁, 齐吉琳, 等. 冻土力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014
MA Wei, WANG Dayan, QI Jilin, et al. Frozen soil mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2014