

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.145

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律

李双好, 李元勋, 高欣亚, 石冬梅

(青海大学 土木工程学院, 西宁 810016)

**摘要:**以西宁市某区域内原状黄土为研究对象,设计封闭系统下的三向慢速冻结试验、恒温恒湿的融化试验以及三轴剪切试验。基于土的莫尔-库伦强度理论,利用抗剪强度包线求解黏聚力和内摩擦角,研究不同冻融温度梯度下抗剪强度指标的变化规律。结果表明:随着温度梯度增大,黏聚力衰减速度显著,衰减为极小值时的最不利冻融温度梯度为 $-15\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;冻融黄土的黏聚力与冷端温度、融化温度有关;较低含水率和较小冷端温度耦合作用或较高含水率和较大冷端温度耦合作用时,与冷端温度相比,融化温度为主导影响因素。随着冷端温度的增大,不同含水率试样的黏聚力降低幅度呈先减小、后增大的规律,最不利的含水率为18.34%。内摩擦角呈现出不规律性波动,变化幅度约为 $0\sim 14^{\circ}$ 。由试验数据拟合出黏聚力随冷端温度和含水率变化规律的计算式,经试验验证,计算式能较好地描述其变化特性。

**关键词:**冻融;原状黄土;温度梯度;含水率;抗剪强度

中图分类号:TU411.7 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)01-0048-08

## Effect of freezing and thawing on shear strength of intact loess

Li Shuanghao, Li Yuanxun, Gao Xinya, Shi Dongmei

(School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, P. R. China)

**Abstract:** Taking the intact loess in a certain area in Xining as the research object, they were designed the three direction's slow freezing test under the closed system, the constant temperature and humidity thawing test and the triaxial shear test. Based on the Mohr-Coulomb strength theory of soil, the cohesion and internal friction were solved by using the shear strength envelope, and the variation of shear strength indexes under different freezing thawing temperature gradients are studied. The results show that: with increase of temperature gradients, the cohesion decay rate is remarkable, and it is  $-15\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  for the most disadvantageous freeze-thaw temperature gradient when the cohesion is minimum; The cohesion of frozen-thawed loess is related to the cold end temperature and thawing temperature; Compared with cold end temperature, the thawing temperature is the dominant factor when the moisture content is lower and the temperature at the cold end is lower, or the temperature at the cold end is higher. With the increase of the cold end temperature, the cohesion of samples with different moisture contents decrease firstly and then increase, the most disadvantageous moisture content is 18.34%. The internal friction shows irregular

收稿日期:2019-04-19

基金项目:青海省科学技术厅项目(2018-ZJ-933Q、2018-ZJ-T01)

作者简介:李双好(1992-),女,主要从事寒区边坡工程研究, E-mail: Lsh131465@163.com。

李元勋(通信作者),男,博士, E-mail: lyx2017@qhu.edu.cn。

Received: 2019-04-19

**Foundation items:** Qinghai Provincial Department of Science and Technology Project (No. 2018-ZJ-933Q, 2018-ZJ-T01)

**Author brief:** Li Shuanghao (1992-), main research interests: the cold geotechnical slope engineering, E-mail: Lsh131465@163.com.

Li Yuanxun (corresponding author), PhD, E-mail: lyx2017@qhu.edu.cn.

fluctuations, and the extent of variation is about  $0^{\circ}\sim 14^{\circ}$ . The calculation formula of the cohesion with the cold end temperature and moisture content is fitted by the experimental data. The experimental formula can better describe the variation characteristics of cohesion.

**Keywords:** freeze-thaw; intact loess; temperature gradient; moisture content; shear strength

在高寒高海拔黄土地区进行工程建设,不仅需要冬季施工中较大的昼夜温差(夜晚低温,白天高温),还要考虑恶劣天气情况。如冻雨、积雪、霜冻,这些不确定因素将会导致黄土冻融效应愈发强烈。因此,在冬季施工时,要确保工程的长期性和稳定性,如何准确选用黄土的强度指标将成为关键。

目前,冻融黄土强度指标变化规律研究已经取得了一些成果。其一是基于以含水率为影响因素的研究:有的结论为黏聚力减小、内摩擦角增大<sup>[1-3]</sup>,有的结论为黏聚力减小、内摩擦角基本不变<sup>[4-5]</sup>,有的结论为黏聚力、内摩擦角均减小<sup>[6]</sup>;其二是针对冻结温度对土体冻融效应的影响特性:Liu 等<sup>[7]</sup>在不同的冷端温度和单向融化温度条件下进行试验研究,发现土体强度随冷端温度的降低而升高;王铁行等<sup>[3]</sup>研究冻融原状黄土,发现黏聚力的降低值和内摩擦角的增加值分别与冻结温度成正比;宋春霞等<sup>[8]</sup>以兰州黄土容重为试验变量,使其在不同冻结温度下进行试验研究,结果表明冻结温度增大,黏聚力降低幅度也增大,但内摩擦角增加幅度却比较小;许健等<sup>[9]</sup>基于抗剪强度劣化试验研究,得出黏聚力强度劣化模型。

综上所述,学者们已对冻融黄土强度研究做了大量工作,发现含水率、冻结温度等是影响黄土强度的重要因素。但大多研究影响黄土强度的温度变量较为单一,缺少对冻融温度梯度影响因素的研究,也缺少冻融温度梯度与含水率耦合作用下对土体强度变化规律的影响研究。因此,有必要以温度梯度、含水率为变量,研究冻融原状黄土强度指标变化规律。笔者针对青海西宁地区特殊的地质和气象条件,开展了冻融循环作用下的原状黄土抗剪强度指标研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验用原状黄土取自青海西宁某区域,取土深度范围为 0.5~2.0 m,颜色为黄色。由地勘报告知,试验用土由第四系①<sub>1</sub>层植被土(Q3<sup>pd</sup>)、①<sub>1</sub>层素填土(Q4<sup>ml</sup>)组成。土质均匀、松散、欠固结、稍湿。土体基本特性参数见表 1。

表 1 原状黄土基本特性参数

Table 1 Basic parameters of intact loess

含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	比重 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_p$
12.34	1.27	2.70	25.76	13.65	12.11

### 1.2 试验方法

1.2.1 冻融循环试验 试样冻结采用专业试验箱,温度控制范围为 $-50\sim 50^{\circ}C$ ,精度为 $0.1^{\circ}C$ ,能够满足试验要求。为了模拟封闭系统下无外界水源补给的试验情况,首先,使用保鲜膜将原状黄土三轴试样密合地包裹,放置于密封袋中,防止水分散失。然后,将密封袋中装有密切贴合的保鲜膜试样,放置在垫有双层气泡膜的试验托盘上,防止试样在冻融过程中出现破损现象等,以免对试验结果造成影响。接下来,在试验箱上分别设置冷端温度 $-5$ 、 $-10$ 、 $-15^{\circ}C$ ,试样在试验箱冻结 12 h。最后是试样融化,分别放在空调温度设置为 $10$ 、 $15^{\circ}C$ 的试验室,保证试样在恒温恒湿的环境下融化 12 h。试样经历一次冻融循环时间为 24 h,温度传感器测量证明,试样冻结 12 h 可以完全冻透,融化 12 h 能够彻底融透。

首次冻融后强度指标变化明显,但与黄土初始状态无关,且能总体反映其大致变化趋势。在青海高寒黄土地区的实际工程应用中,基坑、边坡开挖后暴露,突遇雨雪等恶劣天气情况等,不能得到有效的防护,导致坑壁至少经历一次冻融循环。资料表明,冻融循环初期对其影响剧烈,破坏性较强,会带来不可估量的损失。且由于单次冻融试验次数较少,故试验周期较短,试验进度较快。从工程建设角度考虑,有较好的参考价值,所以只进行了单次冻融黄土试验。

1.2.2 三轴剪切试验 冻融循环试验完成后,进行三轴剪切试验,操作步骤严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)规定。根据原状欠固结黄土被埋置的不同深度,先估算出相应静止土压力,然后考虑仪器误差对试验结果带来的影响(低围压影响大),在一定范围内,找到围压的一个平衡点,使得施加围压值大于先期固结压力,得出的黏聚力才不会偏大,更符合实际情况。得到围压值分别为 50、80、120 kPa。利用 SLB-1 型应力-应变控制式三轴剪切渗透试验仪进行三轴剪切试验(UU),剪切速率为 $0.4 mm/min$ 。

### 1.3 试样制备

现场取原状黄土时,先用箭头标示出土体沉积方向,然后,在垂直于箭头方向切割成土条,制备成直径 $39.1 mm$ 、高度 $80 mm$ 的圆柱体三轴试样。由

土样干密度计算出试样需要增加或减湿质量,使用蒸馏水滴定来配置目标含水率,分别为 18.34%、24.34%。或用烘箱烘干试样至恒重,再使用蒸馏水滴定来配置目标含水率 8.34%,天然含水率为 12.34%。使用密封袋密封养护试样数天,使水分通过水膜压力作用在各个方向上得到转移,最终达到水分在试样内分布均匀的目的。试样含水率为 8.34%、12.34%、18.34%、24.34%时,相应的试样饱和度分别为 0.23、0.34、0.50、0.65。

#### 1.4 冻融试样变化特性

图 1 为试样在不同含水率下的密度变化曲线。由图 1 可知,冻融后试样密度均随含水率增大呈增大趋势。而冻融后试样密度比未冻融试样密度均降低,密度降低最大幅度为  $0.09 \text{ g/cm}^3$ ,平均降低了  $0.04 \text{ g/cm}^3$ 。试样密度降低的主要原因在于土体中水分在冷端温度下发生相变,水分变成冰,相对体积增大。同时增加了侧向位移量,从而相应的孔隙体积也会增大。含水率为 8.34%、12.34%、18.34%的试样,冻结时体积均增大。含水率越大,体积膨胀量越明显,所以 18.34%的试样体积增大最为明显,侧向变形量达到 1.3 mm。当含水率为 24.34%时,在冻结温度梯度下密度和未冻结时变化量不明显,说明试样体积变化不明显。高含水率试样体积出现胀缩趋势,说明冻融作用会对土体密度产生双向性。

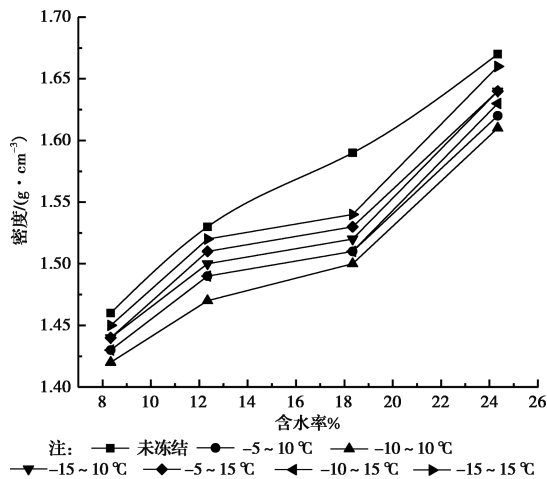


图 1 不同含水率下密度变化曲线

Fig.1 Densities under different moisture contents

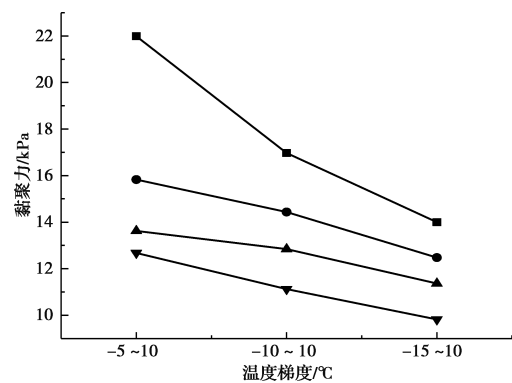
## 2 不同条件下的原状黄土抗剪强度指标变化规律

为便于分析与理解,将 8.34%~18.34%的含水率定义为较低含水率,相应的较低饱和度为 0.23~0.34;将 18.34%~24.34%的含水率定义为较高含水率,相应的较高饱和度为 0.50~0.65。试验箱设定

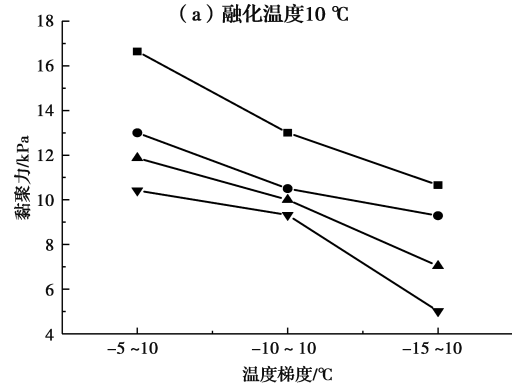
的冻结温度传递到试样表面为冷端温度,冻融温度梯度由冷端温度和融化温度组成。由于温度梯度是矢量,所以定义的温度梯度值(标量)为冷端温度绝对值和融化温度之和,即冷端温度的大小表示为其数值的绝对值,文中的温度梯度、冷端温度均为标量。温度梯度值小于等于  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时定义为较小温度梯度,则较小温度梯度分别为  $-5 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-5 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,较大温度梯度分别为  $-15 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-15 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 2.1 不同温度梯度条件下对原状黄土黏聚力的影响

图 2 为不同温度梯度下的黏聚力变化曲线。图 2(a)中融化温度为  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,随着冷端温度增大,不同含水率试样的黏聚力总体均呈降低趋势,说明冷端温度是影响冻融黄土黏聚力变化的因素。与胡田飞等<sup>[10]</sup>的研究结果一致,由于相变特征,试样内未冻水含量越少。冷端温度越大,转化为冰晶的比例更大,从而冰晶挤压土骨架,降低有效应力,土颗粒之间会产生相对位移,削弱颗粒间联结性。宏观表现为黏聚力下降。随着温度梯度由  $-5 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 增加到  $-15 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,不同含水率(8.34%、12.34%、18.34%、24.34%)试样的黏聚力降低幅度分别为



(a) 融化温度  $10 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) 融化温度  $15 \text{ }^\circ\text{C}$

图 2 不同温度梯度下黏聚力变化曲线

Fig.2 Cohesion under different temperature gradients

36%、21%、17%、23%，即黏聚力的破坏程度随含水率的增大呈先减小后增大的趋势。在含水率为 18.34% 时，冻融黄土试样膨胀的侧向位移量最大，冻融前后密度变化量相对较小，故 18.34% 是临界含水率值。即存在一个最不利的含水率使得冻融黄土黏聚力衰减幅度最为明显。

图 2(b) 中融化温度为 15 °C 时，随着冷端温度增大，不同含水率试样的黏聚力总体均呈降低趋势。冷端温度影响冻融试样的黏聚力值。于琳琳等<sup>[11]</sup>指出，冻结温度越低，且达到一定临界值时，黏聚力变化趋势会发生改变。随着温度梯度由 -5 ~ 15 °C 增加到 -15 ~ 15 °C，不同含水率试样的黏聚力相应降低幅度分别为 36%、29%、41%、52%。从试验结果可知，随着温度梯度增加，较高含水率的黏聚力降低幅度较大。可见，当冷端温度越大，随饱和度（含水率）增大时黏聚力明显减小。较高饱和度试样融化后水分较多，即颗粒间的水膜厚度增大，使得试样内存在的胶结体消失，故较高含水率的黄土试样在较大的冷端温度下冻结，其黏聚力会明显降低。当含水率分别为 18.34%、24.34%，融化温度为 15 °C 时，冷端温度由 -5 °C 变化到 -10 °C，黏聚力变化幅度分别为 17%、12%；由 -10 °C 变化到 -15 °C，黏聚力变化幅度分别为 30%、46%。由此可见，-10 ~ 15 °C 是黏聚力衰减幅度显著的转折点，黏聚力从此处下降速度加快。即存在一个最不利的冻融温度梯度值 -15 ~ 15 °C。究其原因，由于试样为慢速冻结，试验箱内的试样达到冷端温度 -15 °C 时，大部分水分将迁移到冷端处冻结，故冻结后的试样表面上析出一部分小冰晶体，而后在较高温度 15 °C 融化时，试样内部和表面的固态冰晶完全转化为液态水，孔隙体积比例缩小，得到有效密合，这与试样冻融后出现的冻缩趋势相一致。同时，从物理性质解释，冻融前后密度变化量相对来说最小，最后结果是黏聚力变小。

## 2.2 不同含水率条件对原状黄土黏聚力的影响

图 3 为不同含水率下的黏聚力变化曲线。图 3 (a) 中，当含水率为 24.34%、温度梯度为 -15 ~ 10 °C 时，黏聚力下降到极值 9.8 kPa。究其原因，高含水率试样在较大冻结温度作用下，土颗粒被较厚的冰包裹，融化后的土颗粒之间进行重组，且冻融后试样密度比未冻融密度小 0.03 g/cm<sup>3</sup>，密度对较高饱和度试样的黏聚力变化规律有一定影响。表现为土体越密实，饱和度对土体黏聚力的影响越明显。

图 3(b) 中，不同含水率和不同温度梯度 -5 ~ 15 °C、-10 ~ 15 °C、-15 ~ 15 °C 耦合作用。随饱和度增大，相应黏聚力降低范围分别为 9% ~ 22%、

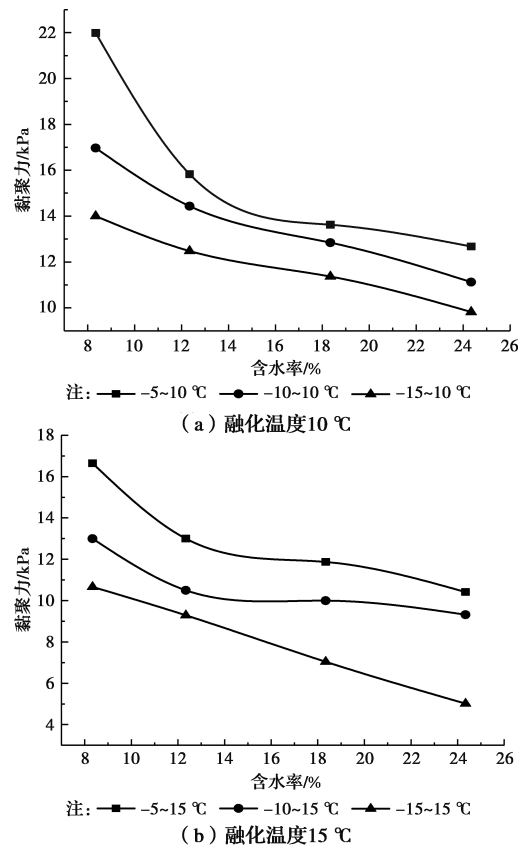


图 3 不同含水率下黏聚力变化曲线

Fig.3 Cohesion of different moisture contents

5% ~ 19%、12% ~ 46%。表明试样饱和度由 0.23 增加到 0.65 时，黏聚力降低幅度有先减小后增大的趋势。原因在于，较低饱和度试样内部空气水压力与孔隙气压力差值较大，较高饱和度试样差值却较小。当空气水压力和孔隙气压力达到一个动态的平衡时，土体内的基质吸力对黏聚力的作用最大。王天亮等<sup>[12]</sup>研究冻融循环后土体的破坏强度，在冷却温度大于 -20 °C 范围内时，强度近似线性减小。本文试样在温度梯度为 -15 ~ 15 °C 时，黏聚力呈线性下降，即转入线性减小阶段。原因在于，前者未冻水含量达到极限状态的温度值相对较低，在较高融化温度 (15 °C) 时，试样中的冰融化成水后，体积缩小，较之前冻胀时产生一定的融陷现象，这与图 1 分析的试样冻缩现象一致，也是密度变化量和未冻结时很接近的原因所在。根据热能平衡原理，加快融化水分在孔隙中的流动速度，导致裂缝宽度进一步变大，颗粒与颗粒之间的接触面积变小，黏聚力降低，劣化接近极限。含水率为 15% 左右、温度梯度为 -10 ~ 15 °C 和 -15 ~ 15 °C 时，黏聚力增大幅度达到 46%。当含水率为 24.34% 时、温度梯度为 -15 ~ 15 °C 时，黏聚力下降到极值 5.1 kPa。原因同温度梯度为 -15 ~ 10 °C 时，黏聚力下降到极值 9.8 kPa

相同。不同之处在于,融化温度为 15 ℃时,冻融后密度比未冻融密度减小 0.01 g/cm<sup>3</sup>。

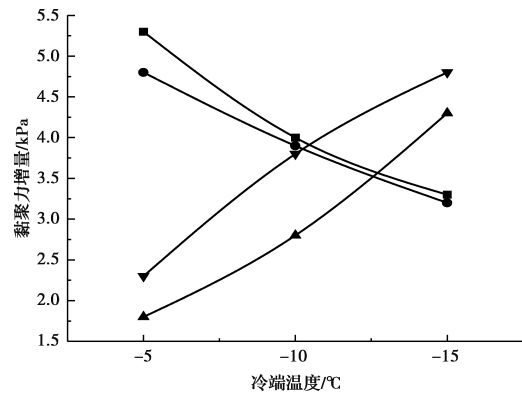
### 2.3 不同温度梯度、不同含水率耦合条件下黏聚力变化规律

由图 2、图 3 可知:1)冷端温度影响黏聚力衰减显著,因此,冷端温度是影响冻融黄土黏聚力衰减的主要因素。从试验结果的大致趋势可以看出:随含水率不断增大,当为较大温度梯度时(-15~10 ℃),黏聚力变化几乎呈线性;而在较大温度梯度(-10~15 ℃)时,黏聚力变化呈非线性衰减。可见,在较大温度梯度范围内,融化温度是影响冻融黄土聚力值衰减的因素之一。2)图 2(a)中,融化温度为 10 ℃时,冷端温度由-5 ℃变化到-15 ℃,不同含水率试样的黏聚力降低幅度分别为 36%、21%、17%、23%;图 2(b)较图 2(a),仅融化温度不同。温度为 15 ℃,相同的冷端温度,其降低幅度分别为 36%、29%、41%、52%。对比图 2(a)、(b)可知,融化温度 15 ℃比 10 ℃的降低幅度偏大,且不同含水率试样的黏聚力降低幅度差分别为 0%、8%、24%、29%。可见,试样含水率越大,幅度差越明显,融化温度影响越大。同时,也间接说明较大冻融温度梯度和较高含水率耦合作用时,温度梯度和含水率共同影响黏聚力值变化。由图 3 可知,当含水率为 24.34%、冷端温度为-15 ℃时,图 3(a)中融化温度为 10 ℃时,黏聚力下降到极值 9.8 kPa;图 3(b)中融化温度为 15 ℃,黏聚力下降到极值 5.1 kPa。对比图 3(a)、(b)可知,融化温度 10 ℃与 15 ℃的黏聚力差值是 4.7 kPa,密度变化差值 0.02 g/cm<sup>3</sup>。冷端温度(-15 ℃)相同时,融化温度越大,黏聚力越小。

图 4 为融化温度由 10 ℃升高到 15 ℃时的黏聚力变化量。较高含水率试样作用在大于冷端温度-10 ℃时,融化温度对黏聚力的变化量比冷端温度影响明显。原因在于,当较低含水率和较小的冷端温度耦合作用下;或较高含水率和较大的冷端温度耦合作用下。说明原状欠固结黄土融化后体积增大,试样相应的体应变增大;且密度比未冻融前变小,土体变疏松,相应的剪应变变小。此时,融化温度相较于冷端温度占主要因素,影响冻融黄土黏聚力值。

### 2.4 不同温度梯度条件下对原状黄土内摩擦角的影响

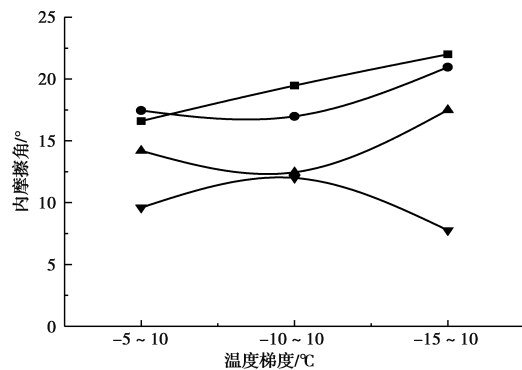
图 5 为不同温度梯度下的内摩擦角变化曲线。由图 5 可知:含水率为 8.34%、12.34%时,随着温度梯度的增加,内摩擦角呈增大趋势。且温度梯度由-5~10 ℃增加到-15~10 ℃,内摩擦角增大幅度分别为 25%、17%;温度梯度由-5~15 ℃增加到-15~15 ℃,黏聚力增大幅度分别为 41%、35%。



注: ■—8.34% ●—12.34% ▲—18.34% ▼—24.34%

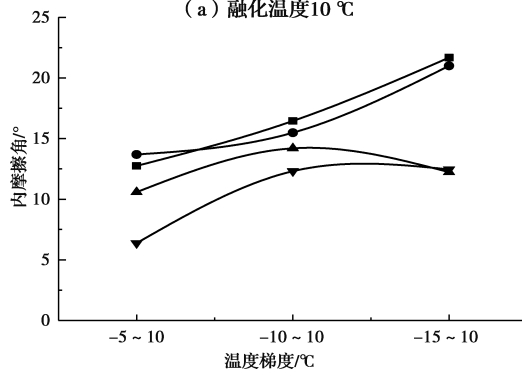
图 4 不同冷端温度下黏聚力增量变化曲线

Fig.4 Incremental curves of cohesive force at different cold end temperatures



注: ■—8.34% ●—12.34% ▲—18.34% ▼—24.34%

(a) 融化温度 10 ℃



注: ■—8.34% ●—12.34% ▲—18.34% ▼—24.34%

(b) 融化温度 15 ℃

图 5 不同温度梯度下内摩擦角变化曲线

Fig.5 Internal friction angles under different temperature gradients

由此可见,内摩擦角随冻融温度梯度增加幅度较大。当融化温度较高时,试样内冰融化成水分子速度增加,增加了土颗粒之间的距离,同时改变土颗粒形状和排列方式。即土颗粒间接触点增多,内摩擦角增大。当含水率为 18.34%时,温度梯度由-5~10 ℃增加到-15~10 ℃和由-10~15 ℃增加到-15~15 ℃时,内摩擦角均呈减小变化趋势。冻融后密度比未冻融密度减小,宏观表现为内摩擦角减小。可

见,试样较未冻融前变疏松,水分对土体颗粒有一定润滑作用。润滑作用在较高饱和度试样上表现显著,所以,内摩擦角随温度梯度的增大而呈现减小趋势。当含水率为 24.34% 时,温度梯度由 -10~10℃ 增加到 -15~10℃ 时和由 -10~15℃ 增加到 -15~15℃ 区域段时,摩擦角的变化趋势刚好相反。究其原因,当融化温度为 10℃ 时,含水率增加,冻融黄土使孔隙比例增大,相应的密度减小,导致土颗粒接触面积减小;同时,水分在土壤颗粒表面形成润滑剂,使土颗粒间嵌合作用越小,颗粒松散化,导致内摩擦角下降。

2.5 不同含水率条件下对原状黄土内摩擦角的影响

图 6 为不同含水率下内摩擦角的变化曲线。由图 6 可知:内摩擦角随着含水率(饱和度)增加呈减小趋势。因为饱和度较小时,试样内部趋于干燥状态,随着饱和度增加,土颗粒之间水分增多,水膜加厚,土颗粒之间摩擦系数降低,且原状欠固结黄土的结构性对强度的影响主要表现在内摩擦角的降低。当温度梯度为 -10~10℃、-15~15℃ 时,含水率在 18.34%~24.34% 范围内时,内摩擦角呈渐增趋势。不同温度梯度的冻融黄土随着含水率增大,内摩擦角呈减小趋势,减小的最大幅度高达 65%。从

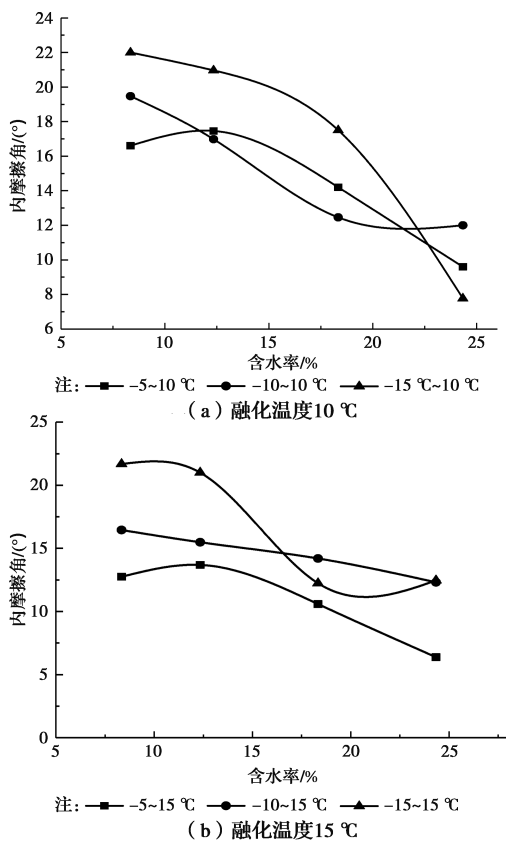


图 6 不同含水率下内摩擦角变化曲线

Fig.6 Internal friction angles at different moisture contents

内摩擦角总体变化趋势来看,先增大后减小,显然并没得出明确相关变化规律,所以,将内摩擦角参数反应强度指标问题放在次要因素考虑。

3 不同冷端温度条件下对原状黄土黏聚力的变化规律

3.1 黏聚力计算公式

基于图 3(a)中冻融温度梯度、含水率、黏聚力之间的变化曲线,通过数学方法处理试验数据,得到不同含水率条件下冻融黄土的黏聚力变化值。

分析数据发现,在不同的冷端温度下,黏聚力与试样含水率较好地符合指数衰减相关关系,对黏聚力进行变量拟合,得到其函数表达式为

$$C = a + be^{-cW} \quad (1)$$

式中:  $C$  为黏聚力, kPa;  $W$  为试样含水率;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数。

由图 3(a)中曲线可知,当冻融黄土随冷端温度增大时,黏聚力呈阶梯下降趋势,但下降幅度不同;在不同冷端温度下,试样黏聚力与含水率变化曲线呈非线性关系;在 -15℃ 的冷端温度时,黏聚力呈现快速衰减趋势。原因在于冷端温度越大,试样内没有未冻水分,冰晶的膨胀作用降低了土颗粒之间的胶结力。同时,试样融化后,土颗粒之间被水分包围,冻结时增大的孔隙在水分子的作用下土颗粒出现一定的融陷作用,所以,黏聚力呈衰减趋势。对较低含水率试样进行首次冻融,与黏聚力降低幅度显著的研究结果相互吻合<sup>[13]</sup>。不同含水率、黏聚力变量下得出的拟合参数见表 2。

表 2 不同含水率、黏聚力变量下得出的拟合参数

Table 2 Fitting parameters under different moisture contents and cohesions

温度梯度 $t/^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$c$	$R^2$
-5~10	12.713	83.885	26.430	0.994
-10~10	9.290	15.369	8.462	0.970
-15~10	3.981	13.006	3.240	0.966

把表 2 中的拟合参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  作为已知值,进一步考虑温度因素影响,进行模型拟合分析。由于冷端温度影响黏聚力衰减明显,对冻融效应影响较大,所以,将冷端温度  $t$  作为自变量进行拟合。拟合发现,  $a-t$  符合线性关系,  $b-t$  和  $c-t$  符合二次多项式关系。图 7 为拟合出的结果,均有较高精度。对模型参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  进行线性拟合能取得较好结果。拟合公式见式(2)~式(4)。不同冷端温度的拟合参数见表 3。

$$a = a_1t + a_2 \quad (2)$$

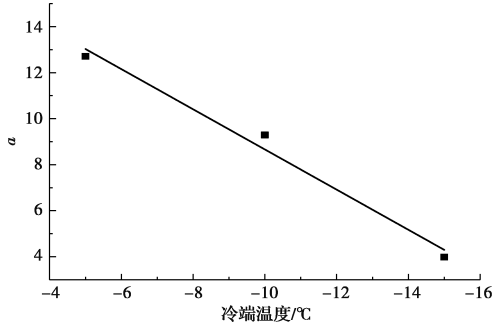
$$b = b_1t^2 + b_2t + b_3 \quad (3)$$

$$c = c_1t^2 + c_2t + c_3 \quad (4)$$

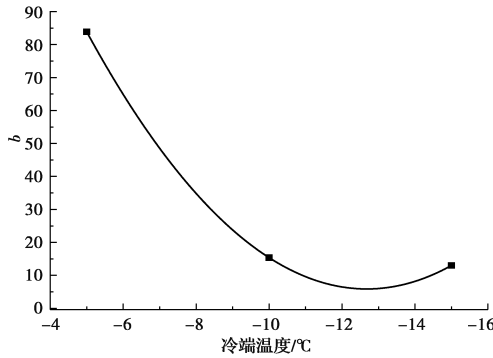
表 3 不同冷端温度的拟合参数  
Table 3 Fitting parameters of different freezing temperatures

$a_1$	$a_2$	$R_a^2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$R_b^2$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$R_c^2$
0.873	17.393	0.969	1.323	33.549	218.554	1	0.255	7.417	57.144	1

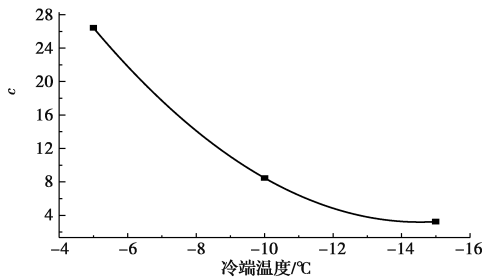
注： $R_a^2$ 、 $R_b^2$ 、 $R_c^2$  分别为拟合参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的相关系数。



注： $c=0.873t+17.393$   $R^2=0.969$   
(a) 参数  $a$  的拟合结果



注： $b=1.323t^2+33.549t+218.554$   $R^2=1$   
(b) 参数  $b$  的拟合结果



注： $c=0.255t^2+7.417t+57.144$   $R^2=1$   
(c) 参数  $c$  的拟合结果

图 7 温度值在模型参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值的拟合结果

Fig.7 Fitting results of temperature values in model parameters  $a$ ,  $b$  and  $c$

将式(2)~式(4)代入式(1),可得冻融黄土黏聚力与温度和含水率的关系表达式,见式(5)。

$$C = a_1 t + a_2 + (b_1 t^2 + b_2 t + b_3) e^{-(c_1 t^2 + c_2 t + c_3) W} \quad (5)$$

式中： $C$  为黏聚力，kPa； $t$  为冷端温度值，℃； $W$  为试样含水率； $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  均为拟合参数。

$t = -5$  ℃、 $t = -10$  ℃、 $t = -15$  ℃时拟合结果见表 4。

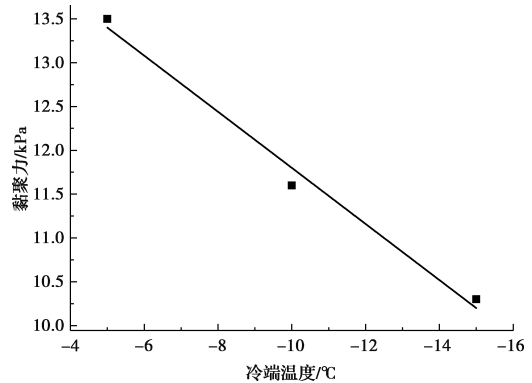
表 4 不同冷端温度的拟合修正参数

Table 4 fitting correction parameters of different freezing temperatures

$t/^\circ\text{C}$	$a'$ (修正值)	$b'$ (修正值)	$c'$ (修正值)
-5	13.028	83.884	26.434
-10	8.663	15.364	8.474
-15	4.298	12.994	3.264

### 3.2 计算值与试验值验证

基于不同含水率(8.34%、12.34%、18.34%、24.34%)建立黏聚力计算公式,并用独立的试验数据来验证其正确性。应用  $w=22\%$  时的试验数据进行验证,结果如图 8 所示。在温度梯度分别为  $-5 \sim 10$  ℃、 $-10 \sim 10$  ℃、 $-15 \sim 10$  ℃时,根据表 3、表 4 拟合参数,得出黏聚力计算值  $C$ ,其值分别为 13.3、11.1、10.2 kPa。黏聚力的试验值分别为 13.5、11.6、10.3 kPa,其差值分别为 0.2、0.5、0.1 kPa,误差比例变化范围 0.97%~4.31%。通过对黏聚力  $C$  的计算值和试验值比较发现,二者吻合较好。由此证明式(5)能够较好地模拟西宁地区黄土在冷端温度和含水率共同作用下的黏聚力变化特性。



注：■ 试验值 — 计算值

图 8 模型验证

Fig.8 Model verification

## 4 结论

1)当融化温度为 15 ℃时,随冷端温度增大,含水率为 18.34%、24.34% 的黏聚力呈折线下降趋势,出现斜率突减的拐点。由此可知,较高含水率和较大温度梯度耦合作用时,黏聚力值变化幅值显著。冻融温度梯度对黄土强度影响效应大,15 ℃(融化温

度)比 10℃的黏聚力衰减幅值大,融化温度是影响黏聚力减小的原因,-15~15℃和 18.34%为最不利冻融温度梯度值和含水率。

2)温度梯度为-15~15℃时的黏聚力呈线性规律变化。较低含水率和较小的冷端温度耦合作用下时,或较高含水率和较大的冷端温度耦合作用下,融化温度均占主导影响因素,影响冻融黄土黏聚力变化。此时融化温度越大,黏聚力越小。

3)由试验数据得到了含有含水率和冷端温度变量的冻融黄土黏聚力表达式,经试验验证,表达式能较好地描述土体黏聚力变化特性。

4)冻融黄土内摩擦角变化呈现出不规律性,变化幅度约为 0~14°。

#### 参考文献:

- [1] 魏尧,杨更社,叶万军,等. 冻结温度对冻融黄土力学特性的影响规律研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8): 61-66.  
WEI Y, YANG G S, YE W J, et al. Study on the influence of freezing temperature on the mechanical properties of freeze-thaw loess[J]. Journal of Yangtze River Scientific, 2018, 35(8): 61-66.(in Chinese)
- [2] 周志军. 基于含水率和温度变化的冻融黄土性能试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 44-49.  
ZHOU Z J. Performancetest of freeze-thaw loess based on moisture content and temperature change[J]. China Journal of Highways, 2013, 26(3): 44-49.(in Chinese)
- [3] 王铁行,罗少锋,刘小军,等. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2379-2382.  
WANG T X, LUO S F, LIU X J, et al. Experimental study on freeze-thaw strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2379-2382.(in Chinese)
- [4] 胡再强,刘寅,李宏儒,等. 冻融循环作用对黄土强度影响的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(Sup2): 14-18.  
HU Z Q, LIU Y, LI H R, et al. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on loess strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(Sup2): 14-18.(in Chinese)
- [5] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 34-43.
- [6] 郑娜,马巍,邴慧,等. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282-1287.  
ZHENG Y, MA W, BING H, et al. Experimental study on influence of freeze-thaw cycles on soil structure and its influence mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282-1287.(in Chinese)
- [7] LIU J K, PENG L Y. Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 58(1/2): 92-96.
- [8] 宋春霞,齐吉琳,刘奉银,等. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086.  
SONG C X, QI J L, LIU F Y, et al. Effect of freezing and thawing on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086.(in Chinese)
- [9] 许健,李诚钰,王掌权,等. 原状黄土冻融过程抗剪强度劣化机理试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 90-98.  
XU J, LI C Y, WANG Z Q, et al. Experimental analysis of deterioration mechanism of shear strength of intact loess during freezing and thawing[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2016, 38(5): 90-98.(in Chinese)
- [10] 胡田飞,刘建坤,房建宏,等. 冻融循环下冷却温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(7): 1757-1767.  
HU T F, LIU J K, FANG J H. Experimental study on the influence of cooling temperature on mechanical properties of silty clay under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(07): 1757-1767.(in Chinese)
- [11] 于琳琳,徐学燕,邱明国,等. 冻融作用对饱和粉质黏土抗剪性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2248-2252.  
YU L L, XU X Y, QIU M G, et al. Influence of freeze-thaw on shear strength properties of saturated silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2248-2252.(in Chinese)
- [12] 王天亮,张丽玲,刘尧军,等. 冻融对 AS 型固化剂改良土工程特性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(5): 109-115.  
WANG T L, ZHANG L L, LIUY J, et al. Influences on engineering properties of AS finning agent modified soil by freeze-thaw cycles [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012, 34(5): 109-115.(in Chinese)
- [13] 董晓宏. 冻融作用下黄土工程性质劣化特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.  
DONG X H. Study on degradation characteristics of loess engineering under freezing and thawing [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2010.(in Chinese)