

# 人工冻融红黏土抗剪强度特性试验研究



张祥荣<sup>1</sup>, 王升福<sup>1,\*</sup>, 李向辉<sup>2</sup>, 嵇晓雷<sup>3</sup>, 刘光炎<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 东华理工大学土木与建筑工程学院, 江西南昌 330013

<sup>2</sup> 中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京 101500

<sup>3</sup> 江苏开放大学建筑工程学院, 江苏南京 214257

**摘要:** 人工地层冻结法常用于盾构隧道端头地层加固、联络通道开挖等富水地层加固, 为探讨人工冻结法施工过程中红黏土经历常温、冻结和冻融后三种状态的抗剪强度变化规律, 采用常规直剪试验, 开展不同含水率、冻结温度和三种不同冻融状态下的人工冻融红黏土抗剪强度特性试验研究, 揭示不同条件下土体抗剪强度变化规律。研究结果表明: (1) 冻结状态下红黏土抗剪强度显著提高, 较常温状态下提高 5.7 倍, 且土体内摩擦角和黏聚力均增加; (2) 冻结状态红黏土试样抗剪强度随含水率增加呈先增大后减小, 在含水率 30% 时最大抗剪强度达 550kPa; 且冻结温度越低, 抗剪强度越大, 在 -15℃ 冻结状态下最大抗剪强度达 580kPa; 红黏土经冻融后, 其结构被扰动, 灵敏度提高, 抗剪强度受含水率和冻结温度影响较常温状态试样变化更为明显; (3) 冻结温度越低, 冻结状态下红黏土的抗剪强度越大; 冻结状态红黏土最大抗剪强度、黏聚力和内摩擦角显著增加; 红黏土冻融后抗剪强度较常温状态有所降低。研究结果对指导红黏土地层开展人工冻结加固具有一定的指导意义。

**关键词:** 人工地层冻结法; 红黏土; 抗剪强度; 直接剪切试验

DOI: [10.57237/j.cear.2023.03.001](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.03.001)

## Experimental Study on Shear Strength Characteristics of Artificial Freeze-thaw Red Clay Soil

Zhang Xiangrong<sup>1</sup>, Wang Shengfu<sup>1,\*</sup>, Li Xianghui<sup>2</sup>, Ji Xiaolei<sup>3</sup>, Liu Guangyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Civil and Construction Engineering, Donghua University of Science and Technology, Nanchang 330013, China

<sup>2</sup> China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co, Beijing 101500, China

<sup>3</sup> Construction Engineering College, Jiangsu Open University, Nanjing 214257, China

**Abstract:** Artificial ground freezing method is commonly used in shield tunnel end ground reinforcement, contact channel excavation and other water-rich ground reinforcement, in order to explore the construction process of artificial freezing method of red clay through room temperature, freezing and freezing and thawing three states of shear strength change rule, using conventional straight shear test, to carry out the different moisture content, freezing temperature and the three different freezing and thawing state of artificial freezing and thawing of the red clay shear strength characteristics of experimental research to reveal different conditions of the change rule of the soil shear strength. Under different conditions, the soil shear strength change rule. The results show that: (1) The freezing state of red clay shear strength increased significantly, compared with the

\*通信作者: 王升福, wangsf@ecut.edu.cn

room temperature state increased by 5.7 times, and the friction angle and cohesion within the soil are increased. (2) The freezing state of red clay specimens shear strength with the increase of water content is first increased and then decreased, in the water content of 30% of the maximum shear strength of 550kPa. And the lower the freezing temperature, the greater the shear strength, in  $-15^{\circ}\text{C}$  freezing state maximum shear strength of 550kPa. The maximum shear strength reaches 580kPa in  $-15^{\circ}\text{C}$  freezing condition. After freezing and thawing, the structure of red clay is disturbed, the sensitivity is increased, the shear strength is affected by the water content and freezing temperature, which is more obvious than the change of the normal temperature state specimen. (3) The lower the freezing temperature is, the greater the shear strength of red clay in the freezing condition is. The maximum shear strength, the adhesive force and the angle of internal friction of red clay in the freezing condition are increased significantly. After freezing and thawing the shear strength of red clay is reduced compared with the normal temperature state. After freezing and thawing, the shear strength of red clay decreased. The results of the study are of some significance in guiding the artificial freezing reinforcement of red clay strata.

**Keywords:** Artificial Ground Freezing Method; Red Clay; Shear Strength; Direct Shear Test

## 1 引言

随着中国城市交通基础设施建设的推进, 地铁等城市地下市政在江西南昌等环鄱阳湖城市群地区快速发展[1]。地铁隧道盾构端头加固、联络通道开挖等常采用人工地层冻结法进行地层加固[2, 3]。红黏土在江西南昌等地区广泛分布, 其具备天然含水量高、孔隙比大、压缩性低等特殊土工程特性[4]。

人工地层冻结法在中国城市地下工程施工中已被广泛应用[5], 特别在含水率较高地区的地铁隧道施工。人工冻结技术施工简便、快速, 止水性好以及可快速提升土体强度[6], 但土体力学性能受温度、含水率、以及当地水文地质等因素影响, 具有典型的区域性[7]。冻结土体的抗剪强度是保证人工冻结法施工的重要指标, 对采用冻结法施工保证安全性以及稳定性有极为重要的作用[7]。已有学者对常年冻土、季节性冻土、人工冻土等在不同冻结温度、含水率等条件下的强度变化规律开展了深入研究[8-10]。

直剪试验因操作简便, 试验速度快的特点, 是人工冻土强度研究较多采用的试验方法[11, 12]。王青志[13]等以寒区高速铁路基粗颗粒填料为研究对象, 发现冻结粗颗粒土随初始含水率增大, 黏聚力、内摩擦角先增大后减小的规律。高樵[14]等以不同含水率及不同土为变量开展冻结直剪试验, 发现细颗粒冻结粉质黏土抗剪强度较差, 冻土区斜坡失稳应更注意细颗粒粉黏土强度防护。孙兆辉[15]等对不同含盐量、不同法向压力及不同冻结温度条件下的盐渍土进行冻结直剪试验, 试验发现随着含盐量的增加, 冻结盐渍土最大抗剪强度先增加后减小, 内摩擦角及黏聚力由逐渐减小到趋于稳定。唐丽

云[16]等以不同含水率和碎石含量为变量开展土-石混合体冻融直剪试验, 发现含水率对土石混合体冻融界面强度的影响可分为快速下降和缓慢下降两个阶段, 随着含水率增加土体最大抗剪强度先增加后减小。

红黏土强度方面, 前人开展大量试验研究, 如傅鑫晖[17]等, 进行了红黏土直接剪切试验, 分析了非饱和红黏土的强度特性、变形规律及其与含水率、应力路径等因素的关系, 并建立了一些力学模型用于预测非饱和红黏土的强度和变形。陈开圣[18]等进行了红黏土在干湿循环作用下的抗剪强度特性研究, 研究了红黏土在干湿循环前后的饱和度、干密度、孔隙比、含水率等物理指标, 分析了这些因素与红黏土抗剪强度变化之间的关系, 得到了干湿循环会对红黏土的抗剪强度产生显著的影响, 循环次数越多, 红黏土的抗剪强度就越弱。曾召田[19]等进行了室内干湿循环试验和室内干湿循环-固结试验等实验, 分析了土体在不同水分条件下的抗剪强度和变形特性, 建立了红黏土的土中结合水影响模型, 该模型考虑了土体孔隙度、含水率、水分状态等因素对土体抗剪强度的影响, 能够较好地预测土体的抗剪强度。王星华[20]等对不同含水率的黏土进行了高速直剪试验, 分析了影响黏土抗剪强度的因素, 建立了一个基于黏土物理化学性质、含水率、应力路径和应力速率等因素的抗剪强度预测模型, 能够较为准确地预测黏土在直接快剪条件下的抗剪强度。蒲黍條[21]等探讨了含水率对不同状态红黏土抗剪强度的影响, 对不同状态的红黏土进行了快剪和直剪试验, 建立了一个基于红黏土状态和含水率的抗剪强度预测模型。王亮亮[22]等对红黏土的物

理力学特性进行了测试, 分析了其抗剪强度与土体的含水率、固结状态、应力路径等因素的关系, 建立了红黏土抗剪强度的预测模型。陈学军[23]等对柴油污染下红黏土的直剪力学特性进行试验研究, 分析了不同污染浓度和污染时间对红黏土的力学特性产生的影响, 建立了柴油污染下红黏土的剪切强度模型。

基于此, 本文以江西红黏土为研究对象, 对常温、冻结和冻融后三种状态下, 不同含水率、冻结温度条件的红黏土试样开展直剪试验, 分析不同冻结状态、含水率、冻结温度对抗剪强度的影响规律, 以指导红黏土地层中人工冻结法加固的实践。

## 2 试验材料及方案

### 2.1 试验土样

试验土料取自江西南昌地区地表广泛分布的红黏土, 经烘干、混合均匀而成。采用激光粒度分析仪, 以湿法分析获得土样的颗粒级配曲线如图 1 所示。红黏土的基本物理性能指标, 参照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019) 进行, 试验土样基本物理特性参数列于表 1。

表 1 红黏土基本物理性能

土粒比重	天然含水率	液限	塑限	塑性指数	渗透系数	最大密度
$G_s$	$\omega/\%$	$\omega_p/\%$	$\omega_p/\%$	$I_p/\%$	$K/(\text{cm/s})$	$\rho/(\text{g/cm}^3)$
2.69	32.24	39.1	22.89	16.16	$1.83 \times 10^{-7}$	1.69

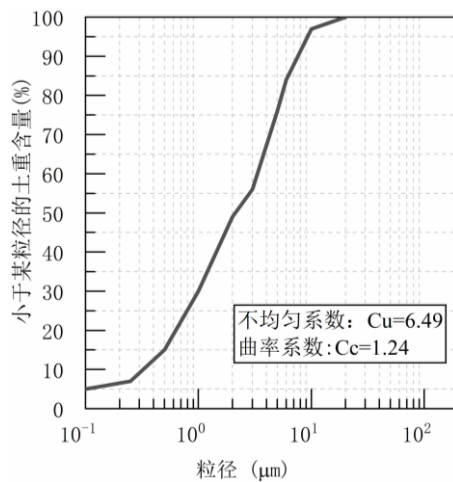


图 1 红黏土颗粒级配曲线

### 2.2 试验方案

试验采用应变控制式直剪仪, 对剪切盒进行改装, 在原有剪切试验盒外增加隔温层。参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019), 对不同含水率及冻融前后土样进行直剪试验, 试验时分别施加法相压力 100kPa、200kPa、300kPa 和 400kPa, 设定剪切速度以 0.8 mm/min, 由于剪切过程强度一直上升, 每当试样发生 0.2-0.4mm 剪切位移都要记录测力计和位移的数值, 在测力计数值出现峰点, 要继续剪切, 直到发生 4mm 的剪切位移时停止剪切, 记下此时的破坏值; 如果剪切过程中, 测力计的数值没有峰值点, 那么试样发生为 6mm 的剪切位移时再停止试验, 以此时为破坏强度。

对于常温、冻结和冻融后三种冻融状态的试样, 分别对应冻结过程的冻结前、冻结中和冻融后三个阶段。冻结试样采用恒温冷室冻结, 试样制备过程中, 先将试样在 1℃ 条件下恒温 6 小时, 随后根据试验设定的三个不同冻结温度, 分别在 -5℃、-10℃、-15℃ 三种冻结温度条件下冻结 72 小时, 开展冻结试验时, 将试样在冷室内完成剪切盒组装, 随后包裹保温层, 剪切过程中保证温度尽量不改变。冻融试样在冻结完成后, 从冷室内取出放置于 20℃ 室温环境恒温 72 小时, 完全融化后开展剪切试验。

### 2.3 试验数据处理

以剪应力为纵坐标, 剪切位移为横坐标, 绘制剪应力  $\tau$  与剪切位移  $\Delta L$  的关系曲线。选取剪应力  $\tau$  与剪切位移  $\Delta L$  关系曲线上的峰值点或稳定值作为抗剪强度  $S$ 。当无明显峰点时, 取剪切位移  $\Delta L=4\text{mm}$  对应的剪应力作为抗剪强度  $S$ 。根据绘制的每级荷载下剪应力与剪切位移的  $\tau-\Delta L$  关系曲线, 求得黏聚力和内摩擦角及破坏时的最大剪应力。绘制不同条件下的内摩擦角、黏聚力关系曲线图。

计算公式为:

$$\tau = CR / A_0 \times 10$$

式中,  $\tau$  为剪应力 (kPa),  $C$  为测力计率定系数 (N/0.01mm),  $R$  为测力计读数 (0.01mm),  $A_0$  为试样初始面积 ( $\text{cm}^2$ )。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 不同状态下最大抗剪强度变化规律

##### 3.1.1 考虑不同初始含水率

不同含水率红黏土在不同冻结状态下最大抗剪强度变化情况如图 2 所示：常温状态下，试样初始含水率相同时，未冻土最大抗剪强度随法相压力增大而增强；法相压力相同，最大抗剪强度随含水率增加而不断减小。法向压力越大，土体抗剪强度越大，其主要原因为法向压力使得土体更加密实，抗剪强度增加。冻结温度一定，冻结土较未冻土最大抗剪强度大幅提

升，含水率从 25% 到 30% 最大抗剪强度增幅明显，而含水率从 30% 到 35% 则出现下降。冻结状态下，土体含水率越高，水冰相变产生的体积变化越大，土中孔隙被孔隙冰充填，此时土体大部分强度由孔隙冰承担，最大抗剪强度较高；随着含水率增大，孔隙冰体积继续膨胀超过土体孔隙体积后将土骨架破坏，且在不同冻结温度条件下未冻水含量不同，导致抗剪强度衰减。含水率一定，随着法相压力不断增长，在法相压力“围箍”作用下，冻结土最大抗剪强度随法相压力增加而呈线性趋势增长。不同含水率融土最大抗剪强度值较未冻土略微下降，其主要是冻结作用使得土体内部土骨架发生破坏，结构性变差，致使其强度比未冻土下降。

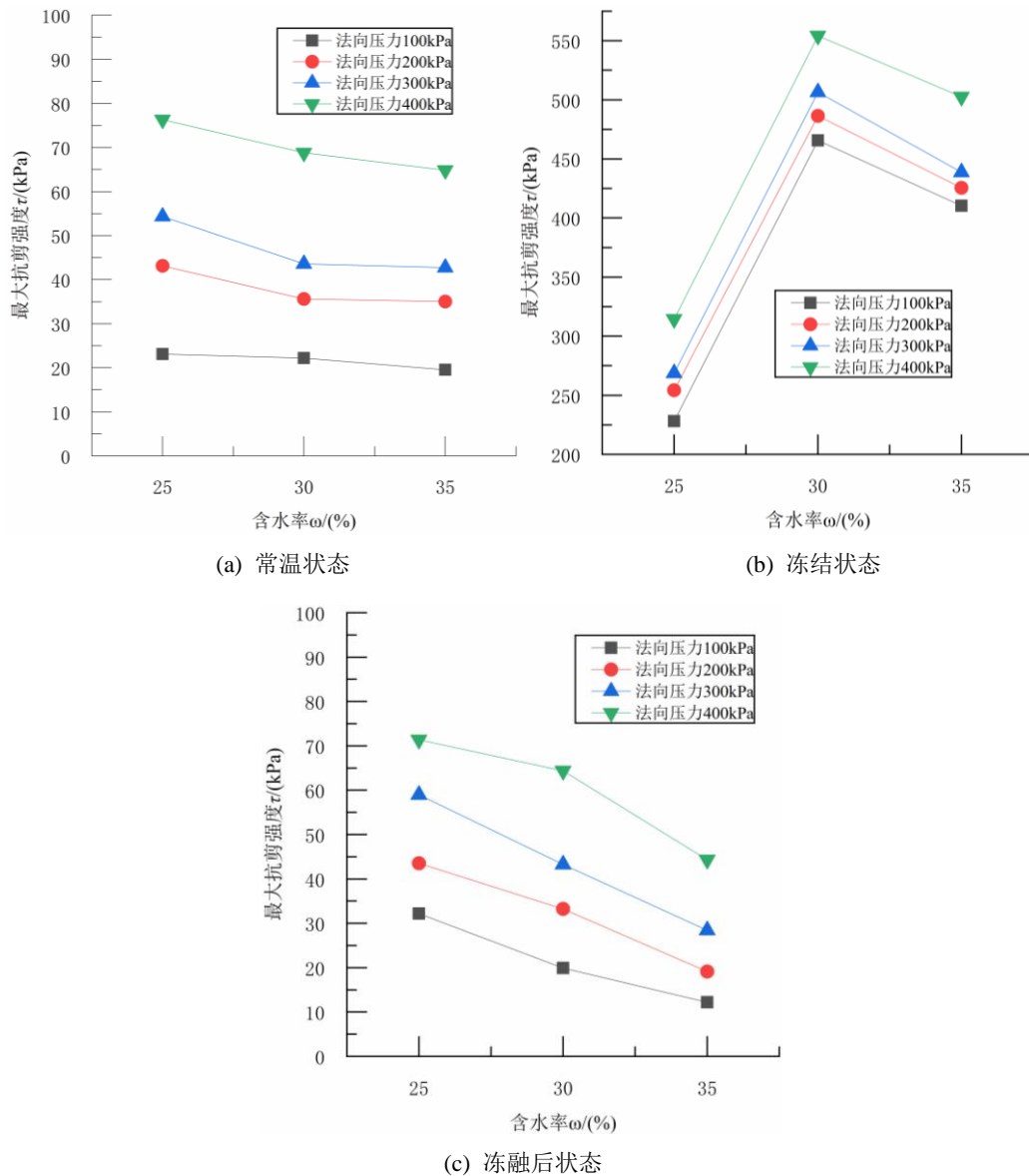


图 2 不同含水率红黏土在不同冻结状态下最大抗剪强度变化情况



### 3.1.2 考虑不同冻结温度

冻结温度是影响冻结土体强度的主要指标, 已有研究表明, 冻结温度越低, 土体完全冻结后其未冻水含量越低, 强度越高。不同冻结温度条件下红黏土在冻结和冻融后的抗剪强度变化如图 3 所示, 在含水率 30% 条件下, 不同法向压力时冻结红黏土的最大抗剪强度随冻结温度的降低而增大, 冻结温度从  $-5^{\circ}\text{C}$  到  $-15^{\circ}\text{C}$  区间, 抗剪强度平均提高近 30%, 且增大速率逐渐降低。

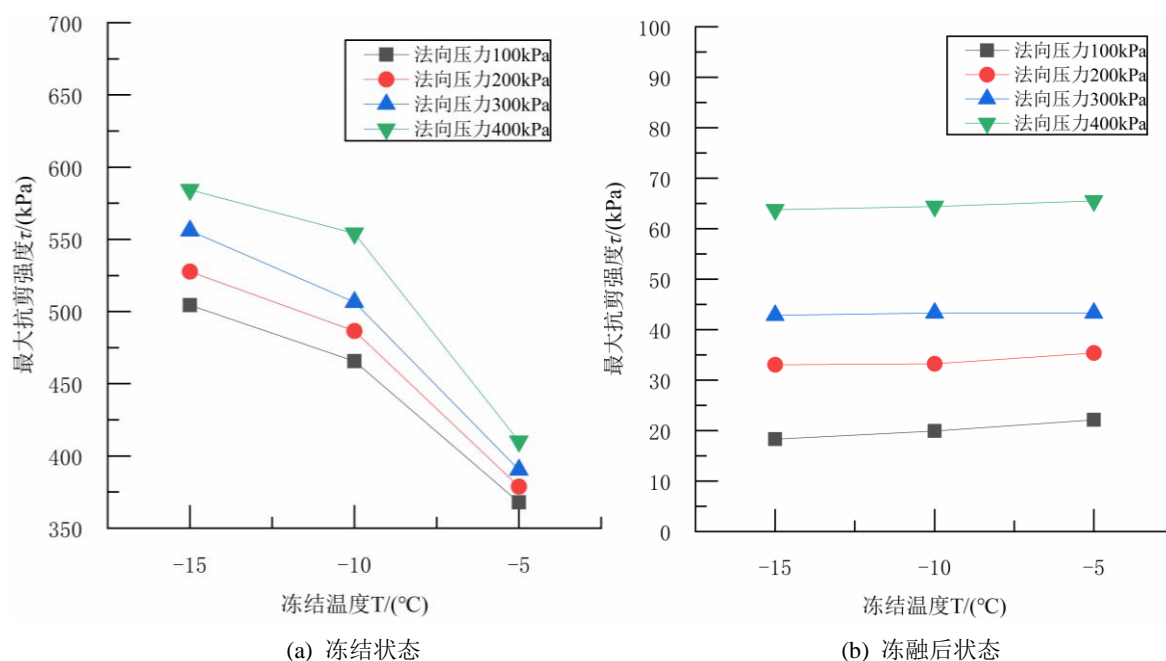


图 3 不同冻结温度红黏土在冻结和冻融状态下最大抗剪强度变化情况

## 3.2 不同状态下土样黏聚力变化规律

### 3.2.1 考虑不同初始含水率

红黏土常温、冻结和冻融后黏聚力随初始含水率变化如图 4 所示, 常温状态下, 黏聚力随含水率增加而降低, 含水率由 25% 到 30% 时, 黏聚力下降 24.4%, 含水率由 30% 到 35% 时, 黏聚力下降 13.7%, 未冻土黏聚力随含水率增大而减小; 含水率越小, 土体黏聚力越大。冻结温度一定, 冻结土较未冻土黏聚力大幅提升, 随着含水率增加, 冻结土黏聚力先增大后减小, 含水率在 25% 左右冻结土黏聚力达到最大值, 含水率从 25% 到 30% 黏聚力增幅明显, 而含水率从 30% 到 35%

土体经历冻融后, 其中的水分经历相变, 水冰相变产生的体积变化破坏了土体自身的结构性, 由此其强度有降低。不同冻结温度条件下, 冻融后红黏土最大抗剪强度比常温状态下降低, 且冻结冷端温度越低, 其降低越明显。此外, 在相同冻结温度条件下, 法向压力越大, 土体最大抗剪强度值越高, 这与未冻土及冻结土试验结果类似, 其主要为法向压力使得土体更加密实, 强度增加。

则出现下降。低温环境下, 土中含水率越大, 生成冰晶量越大, 土中孔隙被孔隙冰充填, 此时土体大部分强度由孔隙冰承担, 黏聚力达到最大值, 含水率超过一定值后, 孔隙冰体积继续膨胀超过土体孔隙体积, 将土骨架破坏, 黏聚力值降低。土体冻融后, 黏聚力较常温状态下降, 且含水率越大, 黏聚力越小。究其原因, 高含水率试样中水分迁移更为显著, 冻胀作用形成的冰晶体积更大, 对土体结构破坏更为严重, 劣化速度也更快。初始状态的土颗粒间胶结作用较强, 冻结作用会显著破坏土体内部结构, 且融化后无法复原, 导致抗剪强度和黏聚力明显降低, 该结论也与前人的研究结果是一致的[24]。

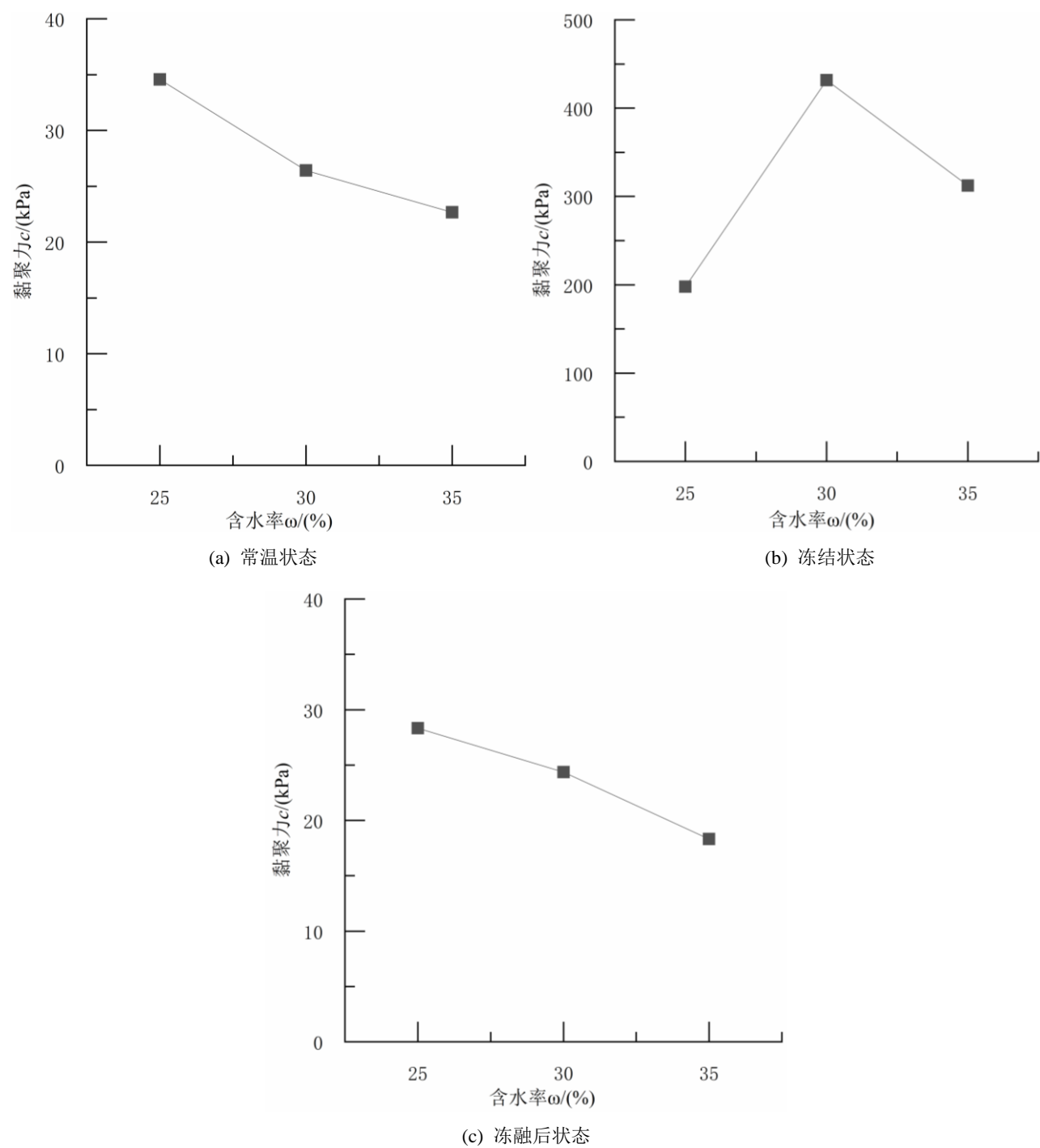


图 4 不同含水率红黏土在不同冻结状态下黏聚力变化情况

3.2.2 考虑不同冻结温度

红黏土含水率为 30%时，不同冻结温度状态下冻结和冻融后土体黏聚力变化情况如图 5 所示，黏聚力随冻结温度减低而增加，-15℃较-5℃冻结状态提高了 39.7%；冻结温度越低，冻结土黏聚力增大越大，其中

-10℃较-5℃冻结土增加 23.1%，-15℃较-10℃冻结土增加 10.6%。

相同含水率条件下，融土黏聚力较常温土出现下降趋势，且温度越低黏聚力下降越明显，其中融土较常温土黏聚力在-5℃下降 0.3%，-10℃下降 0.8%，-15℃下降 1.7%。

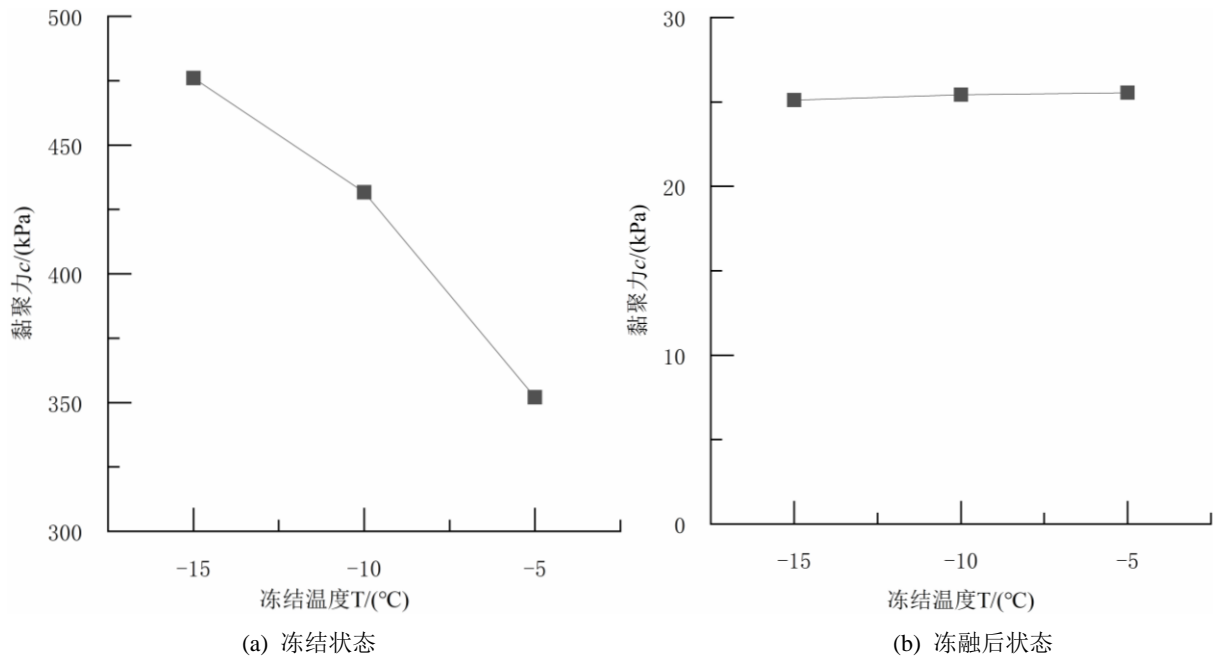


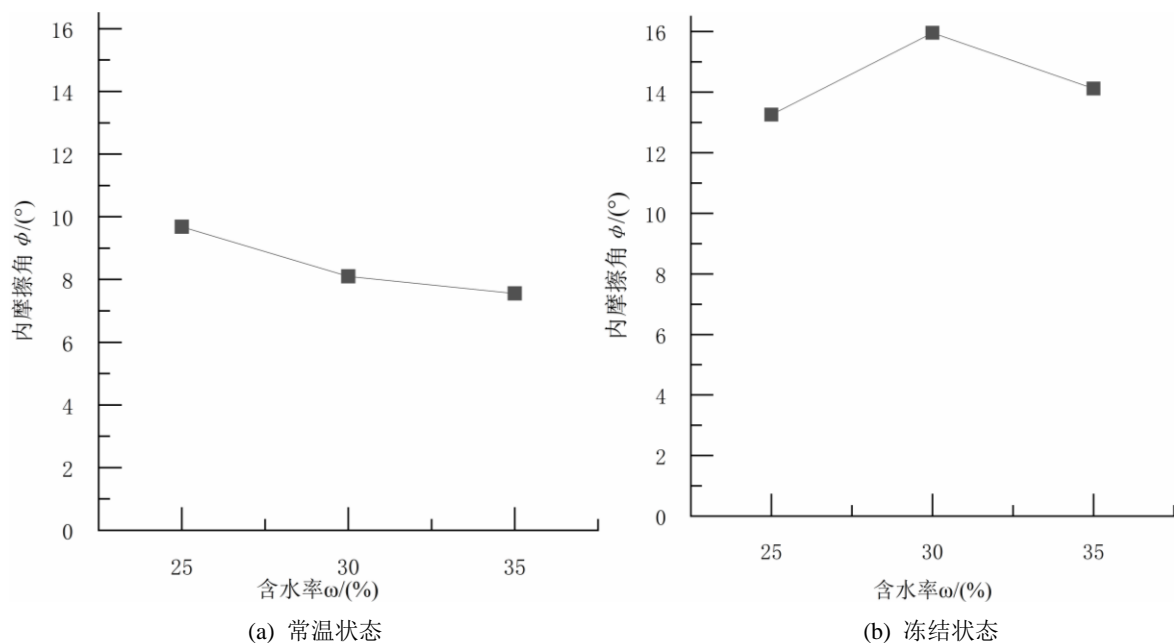
图5 不同冻结温度红黏土冻结和冻融状态下黏聚力变化情况

### 3.3 不同状态下土样内摩擦角变化规律

#### 3.3.1 考虑不同初始含水率

不同状态下红黏土内摩擦角随含水率变化规律如图6所示, 常温状态下, 内摩擦角随含水率增加而降低, 随着初始含水率不断增大, 含水率对内摩擦角比黏聚力受影响更弱, 当含水率 25%到 35%时, 黏聚力减少 34.09%, 而内摩擦角则减少 23.07%。土体完全冻结时, 土样内摩

擦角随着含水率增加而先增大后减小, 其变化规律与黏聚力变化趋势相同, 含水率 30%较 25%冻结土内摩擦角增加 20%, 含水率 35%较 30%冻结土内摩擦角降低 11%, 其主要是含水率较高时孔隙冰体积膨胀破坏了土体结构, 内摩擦角下降。融土内摩擦角随含水率增加而逐渐减小, 主要是融过程使得土体内部结构发生变化, 其中未冻土与融土内摩擦角值相对差异为 0.21%, 这表明红黏土冻融过后, 其强度及内摩擦角值相对变小。



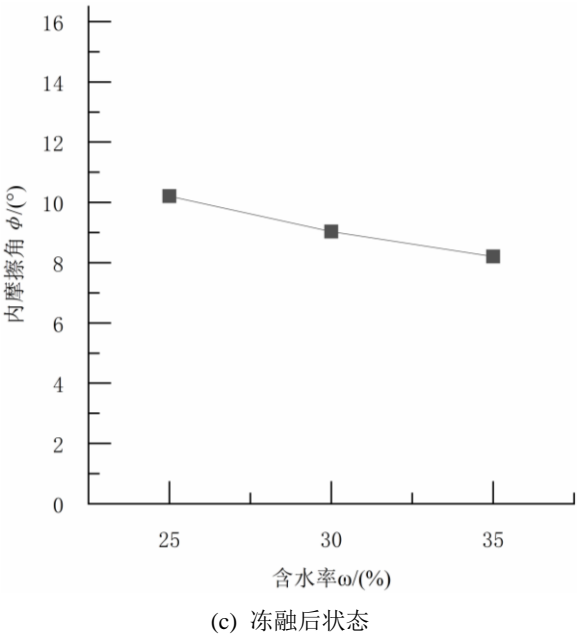


图 6 不同含水率红黏土在不同冻结状态下内摩擦角变化情况

3.3.2 考虑不同冻结温度

冻结和冻融后红黏土试样内摩擦角与冻结温度关系如图 7 所示，可见，当红黏土含水率为 30%时，内摩擦角随冻结温度降低而增大。不同冻结温度条件下，冻结土内摩擦角跟黏聚力变化趋势基本相同，冻结温度越低，冻结土内摩擦角增大越明显。其中，冻结土

在-15℃较-5℃内摩擦角值增大 70%，冻结土在-10℃较-5℃内摩擦角值增大 45%。

相同含水率条件下，冻融土体内摩擦角值随冻结温度降低而减小，其中-15℃较-5℃融土内摩擦角值降低 4.9%，可见冻结温度越低对冻融后土体内摩擦角影响程度越大。

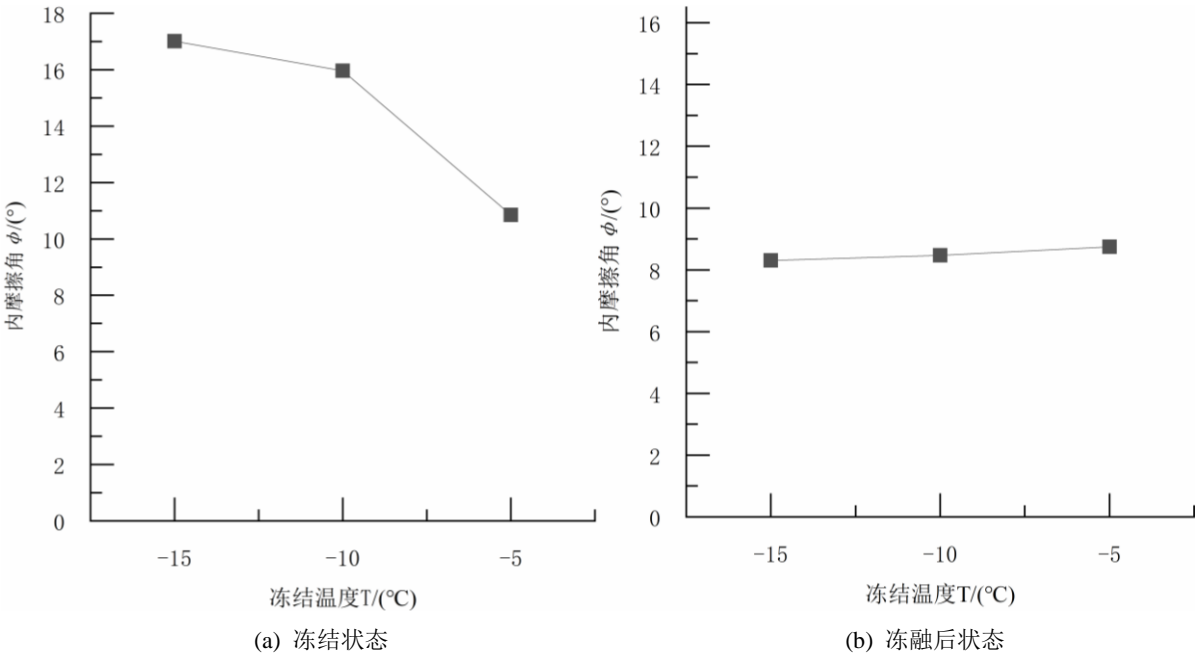


图 7 不同温度红黏土在冻结和冻融状态下内摩擦角变化情况



## 4 结果与建议

- (1) 常温状态下,红黏土最大抗剪强度随含水率提高而出现下降趋势。冻结状态下,冻结土最大抗剪强度随含水率提升先增大后减小;受冰水相变扰动,土体冻融后抗剪强度较常温条件降低,土体抗剪强度劣化。含水率一定,冻结温度越低,冻结土最大抗剪强度随冻结温度降低而增大,其中-15℃较-5℃冻结土最大抗剪强度增长37%。
- (2) 常温状态下红黏土黏聚力随含水率增大而减小。冻结状态红黏土试样抗剪强度随含水率增加呈先增大后减小,在含水率30%时最大抗剪强度达550kPa;且冻结温度越低,抗剪强度越大,在-15℃冻结状态下最大抗剪强度达580kPa;红黏土经冻融后,其结构被扰动,灵敏度提高,抗剪强度受含水率和冻结温度影响较常温状态试样变化更为明显。
- (3) 未冻土内摩擦角随含水率增加而下降,内摩擦角比黏聚力受含水率影响程度轻。冻结条件下,冻结土黏聚力及内摩擦角变化趋势基本相同,都随含水率升高,先增大后减小;融土内摩擦角随含水率增大而不断减小,但总体比未冻土内摩擦角值低。含水率一定,冻结温度越低,土中水转化为冰的量越多,其内摩擦角值增长,温度从-5℃到-15℃时,冻结土内摩擦角增加56%;融土在较低冻结温度冻融后内摩擦角下降,其中-15℃较-5℃融土内摩擦角值降低4.9%。

## 参考文献

- [1] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望 [J]. 隧道建设, 2017, 37 (02): 123-134.
- [2] 方江华, 张志红, 张景钰. 人工冻结法在上海轨道交通四号线修复工程中的应用 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (08): 124-128.
- [3] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训等. 人工地层冻结应用研究进展和展望 [J]. 岩土工程学报, 2000 (01): 43-47.
- [4] 孙德安, 高游, 刘文捷等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (02): 351-356.
- [5] 奚家米, 熊元林, 马新民等. 地铁联络通道冻结法施工研究现状 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (17): 6720-6728.
- [6] 杨平, 余才高, 董朝文等. 人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用 [J]. 岩土力学, 2003 (S2): 388-391.
- [7] 朱磊, 谢强, 任新红等. 川藏线季节性粗颗粒冻土抗剪强度特性试验研究 [J]. 铁道学报, 2018, 40 (03): 107-111.
- [8] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (01): 133-143.
- [9] 王建平, 王文顺, 史天生. 人工冻结土体冻胀融沉的模型试验 [J]. 中国矿业大学学报, 1999 (04): 3-6.
- [10] 周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征 [J]. 冰川冻土, 1982 (01): 1-19+95-96.
- [11] 石泉彬, 杨平, 张英明. 冻土与结构接触面冻结强度研究现状与展望 [J]. 冰川冻土, 2017, 39 (6): 1298-1306.
- [12] Doré G, Konrad J-M, Roy M. Role of Deicing Salt in Pavement Deterioration by Frost Action [J]. Transportation Research Record. 1997; 1596 (1): 70-75. doi: 10.3141/1596-11.
- [13] 王青志, 朱鑫鑫, 刘建坤, 等. 寒区高速铁路路基粗颗粒填料大型直剪试验研究 [J]. 铁道学报, 2016, 38 (8): 102-109.
- [14] 高樯, 温智, 王大雁, 等. 基于冻融交界面直剪试验的冻土斜坡失稳过程研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39 (8): 2814-2822.
- [15] 孙兆辉, 卞汉兵, 鹿翔宇, 等. 盐渍土与混凝土衬砌冻结强度直剪试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40 (2): 236-242.
- [16] 唐丽云, 王鑫, 邱培勇, 等. 冻土区土石混合体冻融交界面剪切性能研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41 (10): 3225-3235.
- [17] 傅鑫晖, 韦昌富, 颜荣涛, 张芹, 赖友华. 非饱和红黏土的强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (S2): 204-209.
- [18] 陈开圣. 干湿循环作用下红黏土抗剪强度特性研究 [J]. 公路, 2016, 61 (02): 45-49.
- [19] 曾召田, 潘斌, 吴昱东, 张炳晖, 梁珍. 土中结合水对红黏土抗剪强度特性的影响机制 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (05): 1565-1572+1579.
- [20] 王星华, 黄长溪, 隆威. 直接快剪条件下黏土抗剪强度影响因素探讨 [J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9 (05): 46-49.
- [21] 蒲黍條. 含水率对不同状态红黏土抗剪强度的影响研究 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (04): 93-100.
- [22] 王亮亮, 杨果林. 红黏土抗剪强度与影响因子作用机理分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6 (06): 44-48.
- [23] 陈学军, 檀利波, 白汉营, 黄翔. 柴油污染重塑红黏土直剪力学特性试验研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26 (03): 583-591.
- [24] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响 [J]. 冰川冻土, 2014, 36 (04): 922-927.