

DOI: 10.11779/CJGE201912017

基于核磁共振下的冻土-结构正融过程界面特性研究

杜 洋, 唐丽云, 杨柳君, 王 鑫, 白苗苗

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 升温解冻导致冻土-结构相互作用发生劣化, 为探究正融过程中冻土-结构相互作用, 基于 NMR 分层测试技术对正融过程中界面未冻水含量进行测试, 得到界面温度 - 未冻水含量变化规律; 同时开展不同法向压力下界面剪切试验, 得到界面温度 - 抗剪强度相关关系, 从而进一步探究界面温度 - 未冻水含量 - 抗剪强度之间的内在联系。结果表明: NMR 分层测试 T2 曲线可从微观尺度对界面融化过程进行表征, 即正融过程界面小孔隙冰晶体融化开始, 随着融化程度的加深大孔隙的冰也开始融化, 最后直至界面处冰完全融化。根据界面温度-未冻水含量-抗剪强度的变化特征可将整个正融过程划分为冻结阶段、相变阶段、融化阶段 3 个阶段。依据莫尔-库仑破坏准则分析可知, 正融过程中界面内摩擦角、黏聚力呈“此消彼长”的变化特征, 其中随着解冻程度加深界面内摩擦角呈先减小后增大, 而界面黏聚力呈现先增大后相对减小。

关键词: 冻土-结构; 核磁共振; 界面; 正融过程

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)12-2316-07

作者简介: 杜 洋(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事冻土与结构界面特性研究工作。E-mail: duyang0802@126.com。

Interface characteristics of frozen soil-structure thawing process based on nuclear magnetic resonance

DU Yang, Tang Li-yun, YANG Liu-jun, WANG Xin, BAI Miao-miao

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The temperature-thawing causes the permafrost-structure interaction to deteriorate. In order to explore the frozen-soil interaction laws during the thawing process, based on the NMR stratification test technology, the interface unfrozen water content in the process of thawing is tested, and the change of interface temperature-unfrozen water content is obtained along with its variety law. At the same time, the interface shear tests under different normal pressures are carried out to obtain the relationship between interface temperature and shear strength, and further to explore the intrinsic link among interface temperature, unfrozen water content and shear strength. The results show that the T2 curve of NMR stratification can characterize the interface thawing process from the microscopic scale, in other words, the melting of small pore ice crystals begins at the interface of the thawing process. As the melting depth deepens, the ice of the large pores begins to melt until the ice which is at the final interface completely melts. According to the change characteristics of the interface temperature-unfrozen water content-shear strength, the whole thawing process can be divided into three stages: freezing stage, phase change stage and melting stage. The analysis based on the Mohr-Coulomb failure criterion suggests that the internal friction angle and cohesive force of the interface during the thawing process change, which follows the law “as one falls, another rises”. And the internal friction angle decreases first and then increases with the degree of thawing, while the interface cohesive force first increases and then decreases relatively.

Key words: frozen soil-structure; NMR; interface; thawing process

0 引言

冻土与结构接触面问题广泛存在于各种寒区工程结构中, 尤其是在寒区桥梁桩基工程、隧道工程等较为显著。近年来受大气温度升高、人类活动等影响, 寒区冻土区温度逐渐升高。冻土逐渐解冻为融土, 使得土-结构界面抗剪强度在正融解冻过程中发生不同

程度的损失, 导致土与结构间承载力下降, 从而引起建筑工程的破坏并造成一定的经济损失^[1]。

冻土作为特殊的地基土, 其温度的变化极大的改变了土体原有的工程特性。而冻土融化使得冻土与结

构之间相互作用劣化。王博等^[2]在正融土与结构界面相互作用研究中已初步证实了这一点。同时已有研究表明冻土特殊物理力学性质与其内部未冻水含量赋存情况密切相关, 而冻土与结构之间冰晶的形成是产生界面冻结强度的主要原因^[3-5]。Liu 等通过对冻土-结构试样在冻结过程中进行直剪^[6]以及动力直剪^[7]试验得出界面处冰的冻结力与土颗粒与混凝土表面的黏聚力共同构成冻土-结构之间的冻结强度, 且冻结温度越低其峰值强度越大。石泉彬等^[8]经过对冻结过程中人工冻结砂土-结构接触面进行剪切试验得到随着接触面温度的降低接触面附近冰晶体逐渐增多, 接触面胶结作用增大, 从而接触面极限冻结强度增大, 且极限冻结强度增长速率也随着温度的降低而增高的结论, 并通过进一步的试验研究^[9]给出次峰冻结强度量化标准。温智等^[10]对冻土-混凝土接触面进行直剪试验得出随着温度降低土体-结构间冻结强度逐渐增大, 而法向压力的增加不仅可以使冻结强度增加, 同时改变了含水率对抗剪强度的影响, 即随着法向压力的增加, 试样含水率增加对冻结强度的影响降低。在冻结过程中冻土-结构界面处未冻水逐渐相变为冰, 土-结构之间逐渐形成冻结强度。相反正融解冻过程中界面处冰晶体融化为未冻水, 其冻结强度随之降低。可见未冻水含量的多少直接影响着界面抗剪强度。因此探究冻土-结构在正融过程中界面相互作用须对正融过程中界面未冻水含量及其变化规律进行精确测定。而目前关于未冻水含量的测试方法有很多, 主要有量热法(DSC)^[11-12]、频域反射法(FDR)^[13-14]以及核磁共振法(NMR)^[14-15]等, 其中核磁共振测试技术在未冻水测试应用方面具有直接性和无损性, 在水分分布与迁移测定中受外界干扰小, 不会扰动试样, 单次测试时间短, 测试精度高等优势^[16-17]。

本文在前人的研究基础上, 探究正融过程中冻土-结构界面处力学特性。采用 NMR 分层测试技术对解冻至不同深度的冻土-结构界面处未冻水含量进行测试, 同时开展不同温度下冻土-结构界面室内剪切试验。得出冻土-结构在正融过程中界面温度-未冻水含量、温度-抗剪强度的变化关系。依据所得关系进一步分析正融过程中冻土-结构界面未冻水含量与抗剪强度的变化规律, 并依照所得规律将整个正融过程中冻土-结构界面剪切破坏分为冻结、相变及融化 3 个阶段。

1 试验方法

1.1 试验设备及其原理

试验选用中国科学院与苏州纽迈公司共同研制生

产的 MacroMR12-150H-I 核磁共振试验仪, 如图 1 所示, 其主要包括工控机(含谱仪系统)、射频单元、磁体柜及控温系统 4 大部分。

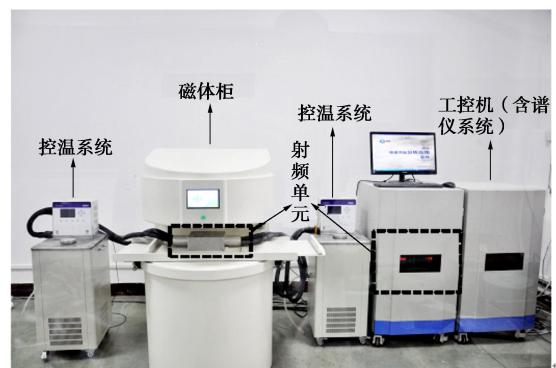


图 1 MacroMR12-150H-I 核磁共振仪

Fig. 1 MacroMR12-150H-I NMR

本试验采用仪器内置相位分层测试法(内置 SE_SPI 序列), 进行分层 T2 弛豫(横向弛豫时间)的测试。T2 分布曲线围成的面积与探测范围内流体中的氢原子数量成正比, 其值与含水率成正比^[18-19]。其本试验未冻水含量计算公式为式(1), 计算见图 2。

$$w_u = wab^{-1} \quad , \quad (1)$$

式中, w_u 为不同温度时界面未冻水含量, w 为初始总含水率, a 为某一温度下回归线至信号强度基数的距离, b 为同一温度下测得的信号强度到基数的距离。

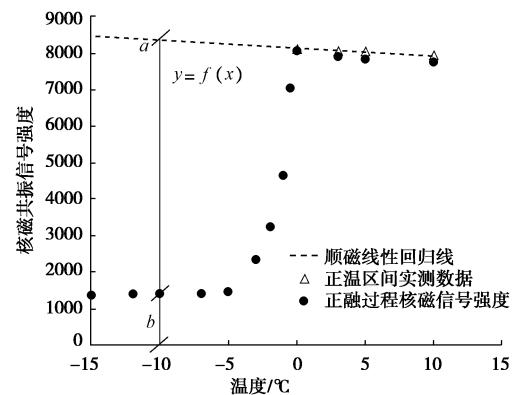


图 2 未冻水含量计算图

Fig. 2 Calculation of unfrozen water content

1.2 试样材料与试样制备

试验用土为青藏多年冻土区典型土质——粉质黏土, 土体最大干密度为 1.82 g/cm^3 , 试验参照《土工试验方法标准》统一配置含水率为 20% 的重塑土样。为了更好的体现实际工程中其冻土-结构界面接触状态, 本文配置混凝土的各项参数均参照冻土区实际工程应用参数。现浇混凝土的各项物理参数如表 1 所示, 现浇混凝土骨料及土体颗粒累积级配曲线如图 3 所示。

表1 现浇混凝土各项参数

Table 1 Parameters of cast-in-situ coagulation

| 水灰比 | 水泥与骨料的比例 | 水泥与抗冻剂的比例 | 水泥标号 |
|-----|----------|-----------|----------|
| 0.5 | 1:3 | 1:0.15 | P.O 42.5 |

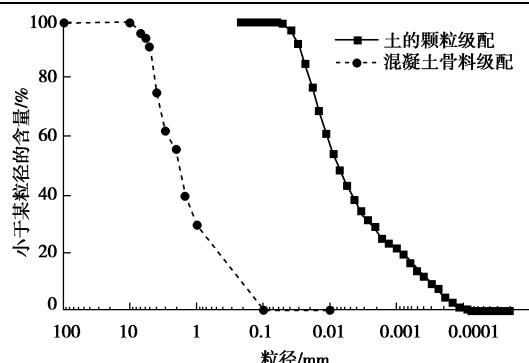


图3 粒径级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves

二元体试样制备依据《土工试验方法标准》制备尺寸为 $\phi 61.8\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的环刀土样。利用油压千斤顶将制备高为 20 mm 环刀土样移至 $\phi 61.8\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的高样品环刀内。然后使装有 20 mm 土样的高样品环刀置于低温恒温试验箱内，在 -15°C 的温度下冻结 12 h 。取出冻结后的高样品环刀，将已搅拌均匀的混凝土浇筑于高样品舱内，并充分振捣使现浇混凝土与冻土试样面充分接触以及保证混凝土充分密实。混凝土浇筑完成后将二元体试样置于外部环境温度为 5°C 的温度下养护 28 d （温差 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）。试样养护 28 d 后将试样移至低温恒温试验箱内进行冻结，使试样冻结温度达到 -15°C 。同时利用埋置在界面的温度传感器对试样界面处温度进行实时监测，每个试样埋设两个探头，位置分别为试样中心及 $R/2$ 处，测试两者温度差值为 $0^\circ\text{C} \sim 0.12^\circ\text{C}$ ，本文界面温度取试样中心及 $R/2$ 处的平均值。试样冻结完成后用油压千斤顶将试样从高样品环刀内取出，试样制备参考现浇混凝土-冻土的制备过程^[20]。冻土-结构二元体试样及温度探头布置如图4。

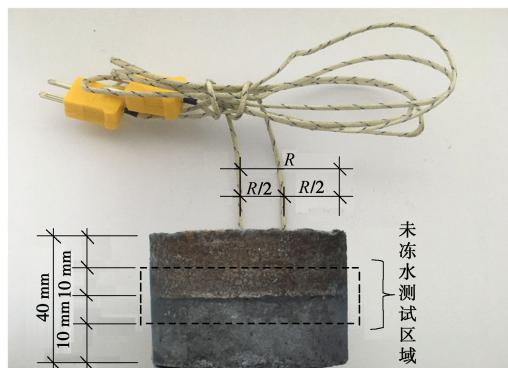


图4 冻土-结构界面试样

Fig. 4 Sample of frozen soil-structure contact interface

1.3 测试过程

首先，将冻结至 -15°C 的二元体试样置于温度条件

为 15°C 的环境箱中，通过试样与空气之间的对流使其自然解冻，本试验通过布设在界面温度传感器对正融过程中界面温度随解冻时间的变化进行实时监测。

其次，利用MacroMR12-150H-I核磁共振试验仪内置SE_SPI分层序列对正融过程中试样界面处的核磁信号进行监测。通过核磁信号强度反演计算解冻至不同温度下界面未冻水含量，得到试样在整个正融过程中界面处温度-未冻水含量的变化关系。

最后，开展直剪试验，冻土-现浇混凝土二元体剪切试验采用南京土壤研究仪器厂生产的应变控制式直剪仪进行测试。法向压力为 $50, 100, 200, 300\text{ kPa}$ ，剪切速度选择为 $0.8\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，温度分别为 -15°C （此工况剪切试验失败）、 $-10^\circ\text{C}, -7^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C}, -3^\circ\text{C}, -1^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}, 1^\circ\text{C}, 5^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}$ 。正融过程中冻土-现浇混凝土二元体剪切试验步骤如下（以融化至 -5°C 工况为例）：

(1) 将冻结至 -15°C 的冻土-现浇混凝土二元体试样置于环境为 15°C 的温度下使其通过空气对流进行自然融化。

(2) 二元体试样在自然热融的过程中通过以布设好的温度传感器观测二元体试样界面处温度的变化，当试样解冻至 -5°C 时进行界面二元体剪切试验。

(3) 对解冻至指定温度的界面二元体试样进行不同法向压力下的直剪试验（注：为降低在剪切过程中外部环境对试样温度的影响，剪切试验在实验室温度为 $-3^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ 下进行）。

2 试验结果及分析

2.1 正融过程界面温度-未冻水含量变化规律

本文基于核磁共振分层测试技术对正融过程中冻土-结构界面未冻水含量进行测试。图5分别为正融过程中界面处未冻水含量特征曲线及不同解冻程度时界面MNR分层T2曲线图。

由图5(a)可知正融过程中界面未冻水变化曲线具有3个显著特点。第一，试样在解冻初期界面未冻水含量变化较小，界面温度从 -15°C 解冻至 -5°C 其界面未冻水含量增长了 1.4% 。从5(b)可以看出界面处冰晶体融化特征，解冻初期T2谱面积增大较小，峰值信号有微小增大即界面冰融化量小，且T2谱图中无第二峰出现，可见在解冻初期冻土-结构仍处于冻结状态。第二，随着解冻程度的加深， -5°C 后界面未冻水含量迅速上升。试样仅从 -5°C 至 0°C 界面未冻水含量增长了 82.45% 。此时T2谱图所表现出的特征为：T2谱面积明显增大，信号峰值明显增大且峰值逐渐右移，同时在 -5°C 融化至 -3°C 时T2谱出现第二峰值点，且第二峰面积及峰值随界面温度升高逐渐增大。第三，

试样融化至正温后界面冰晶体完全融化, 试样处于完全融化状态。由图 5 (a) 可知试样在正温区间界面未冻水含量逐渐趋于稳定, 但随着试样的温度继续升高, 未冻水含量有微小下降。究其原因可能是由于试样温度升高土体渗透系数增大, 促进水分从界面处向土体内部迁移所导致。

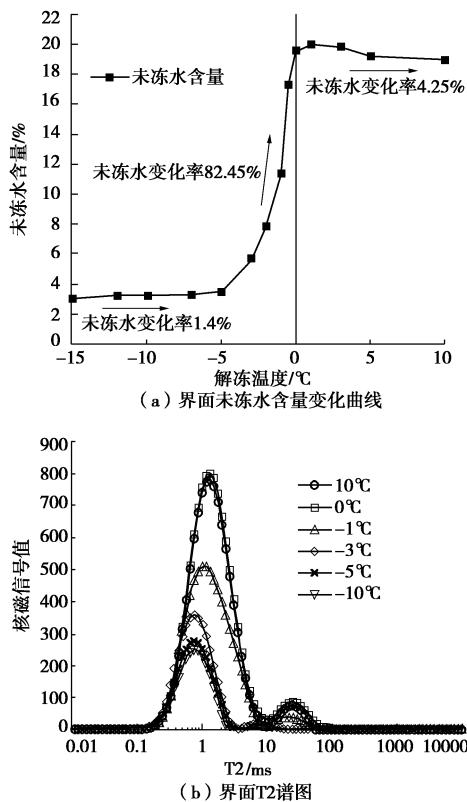


图 5 正融过程界面融化特征图

Fig. 5 Interface melting feature during thawing process

2.2 正融过程界面温度-抗剪强度变化规律

图 6 为正融过程中冻土-结构解冻至不同温度下界面破坏包络线。由破坏包线可知随着冻土-结构温度逐渐升高, 界面抗剪强度逐渐降低。依据不同温度下的界面破坏包线可知: 正融过程界面抗剪强度随法向压力的增大而增大, 其增大程度与解冻温度有关。图 6 (a) 中试样温度仍处于负温, 此时法向压力增加界面抗剪强度显著增大, 当试样由-5℃融化至-3℃, 破坏包线斜率大幅降低。由莫尔-库仑破坏准则结合破坏包线, 升温解冻造成界面抗剪强度降低, 而在解冻初期抗剪强度减小主要是由于界面内摩擦角减小所造成的; -3℃后破坏包线斜率降低逐渐平缓, 而试样继续融化, 由图 6 (b) 试样融化后期界面抗剪强度随温度升高而继续降低。同时破坏包线的斜率变化平缓, 当温度大于 1℃后斜率有所增加, 但此时破坏包线与纵坐标的截距有明显降低, 可知在融化后期界面抗剪强度减小主要是界面黏聚力下降所导致, 而内摩擦变化较小。

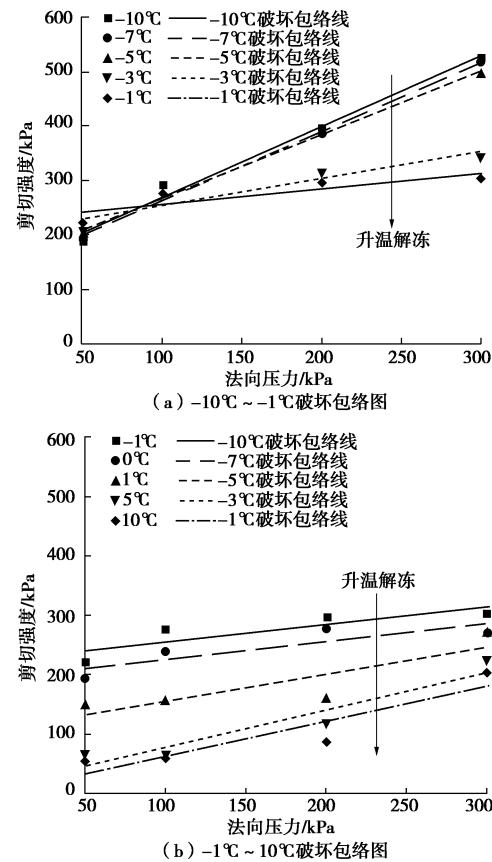


图 6 不同融化深度剪切破坏包络图

Fig. 6 Shear failure envelopes under different melting depths

2.3 正融过程界面未冻水-抗剪强度变化规律

通过上述界面温度-未冻水含量的变化规律, 结合剪切试验所得解冻过程中温度-抗剪强度的关系可得出正融解冻过程中冻土-结构界面温度-未冻水含量-抗剪强度的变化规律曲线, 如图 7 所示。本文以温度-未冻水含量-抗剪强度相关关系, 可将冻土-结构界面整个正融过程划分为 3 个阶段, 即冻结阶段 I、相变阶段 II、融化阶段 III。

冻结阶段 I (A-B): 由图 7 可知 A-B 段内随着温度的上升但其界面未冻水含量变化较低, 而此段内温度上升界面抗剪强度有微小降低。可见冻结阶段内主要表现为界面处未冻水含量上升小、界面冰晶含量高、试样仍处于冻结状态界面冻结强度大, 因此相应界面抗剪强度损失较小。

相变阶段 II (B-D): 从图 7 中可以看出当试样温度解冻至-5℃~0℃范围内未冻水含量开始迅速上升。同时 C' 处法向压力为 300, 200 kPa 时界面抗剪强度出现大幅降低, 相对于高法向压力低法向压力下界面抗剪强度出现突降有所滞后, 出现在 D' 处, 且此阶段法向压力越大界面抗剪强度降幅越大。从整个相变阶段界面强度变化规律可知: 法向压力的增加对抗剪强度的影响减弱且出现聚集现象, 界面处于极不稳定状态。

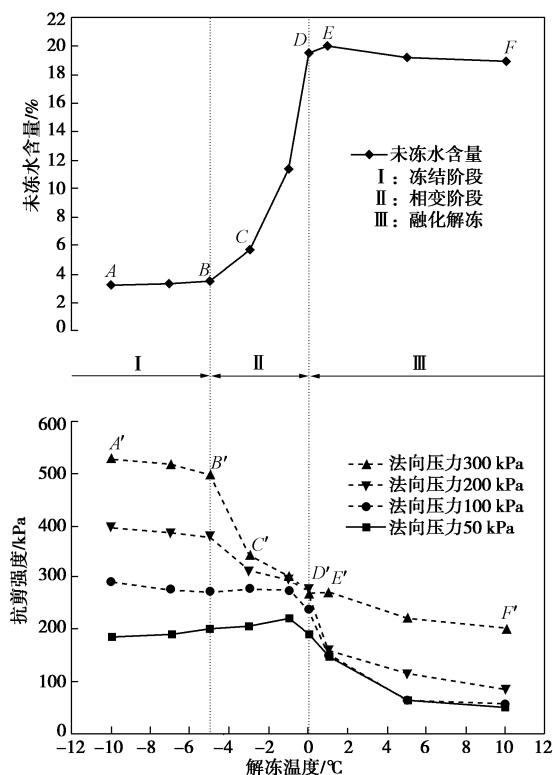


图 7 温度 - 未冻水含量 - 抗剪强度关系曲线

Fig. 7 Temperature-unfrozen water content-shear strength curves

融化解冻 III ($E-F$): 试样融化程度继续加深, 由图 7 中未冻水含量曲线可知在试样在解冻至 0°C 以后其界面未冻水含量逐渐趋于稳定, 试样 1°C 左右界面处未冻水含量达到最大值, 此时界面冰晶全部融化未冻水试样进入完全融化阶段, 相应抗剪强度的降幅也逐渐减小, 在 F 点后逐渐趋于稳定。同时法向压力对抗剪强度影响增大, 聚集现象逐渐消失。

3 讨 论

3.1 冻土-结构界面融化特征

通过图 5 中界面处 T2 谱图可进一步得出正融过程界面冰晶体的融化特征。T2 谱图中横坐标为 T2 横向弛豫时间, 其值与试样中水的赋存位置相关, 弛豫时间越大孔隙水所处孔径越大, 相反弛豫时间越小孔隙水所处孔径越小, 而 T2 曲线所围成的面积代表孔隙水的赋存量。因此, 由正融过程不同温度 T2 曲线可知, 冻结阶段峰面积从小孔隙开始增加, 但增加较小。随着解冻程度加深 -5°C 到 -3°C 时第一峰面积有较大增幅, 同时 T2 曲线出现第二峰, 表明此时小孔隙中冰大量融化且部分大孔隙中的冰逐渐开始融化, 当试样继续融化至 0°C T2 峰面积迅速增大, 孔隙中冰完全相变为未冻水。而进入融化阶段界面处冰完全融化, T2 曲线变化基本稳定。由上述可知, 正融过程中冻土-结构界面从小孔隙冰晶体融化开始, 随着融化程度的

加深大孔隙的冰也开始融化, 最后界面处冰完全融化。

3.2 正融过程界面强度指标变化特征

由图 6 不同解冻程度界面破坏包络图, 结合莫尔-库仑破坏准则进一步分析可得正融过程中冻土-结构界面抗剪强度指标变化规律, 如图 8。由图 8 可知正融解冻过程界面内摩擦角、黏聚力两者呈“此消彼长”的变化规律。即正融过程中随着解冻程度加深界面内摩擦角呈先减小后增大, 而界面黏聚力呈现先增大后相对减小。这与融化过程中在相变阶段界面处未冻水含量变化及冰 - 水之间转化机制密切相关。

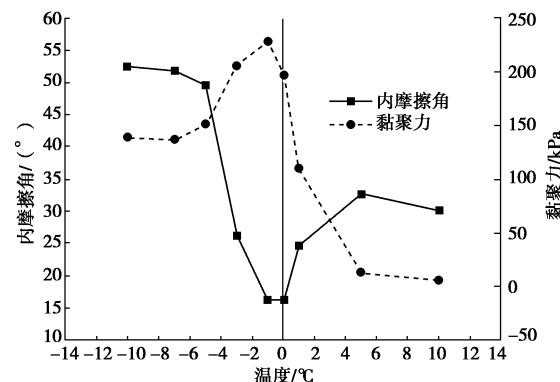


图 8 界面强度指标变化曲线

Fig. 8 Curves of interface strength index

如图 9 所示水为流体状态时分子呈圆形、松散不规则分布, 而冻结状态下冰分子呈空间四面椎体结构。因此正融过程中界面内摩擦角先减小, 这是由于界面处大量冰晶融化, 而冰晶在融化过程中冰分子间的氢键发生断裂, 使排列有序的冰分子逐渐变为松散无序的水分子集团, 导致剪切过程中分子之间摩擦阻力逐渐减小。而在大量冰融化后界面内摩擦角有所增加, 这可能是由于冻结过程水分迁移作用下使土体内部形成水势差, 融化界面处的冰膜逐渐解冻为“水膜”。界面处水膜在水势差的作用下从界面处向土体内迁移运动, 水膜减小相应土体-结构有效界面积增大, 其内摩擦角有所恢复。最终随着土体水分重分布, 水势差逐渐降低内摩擦角趋于稳定。

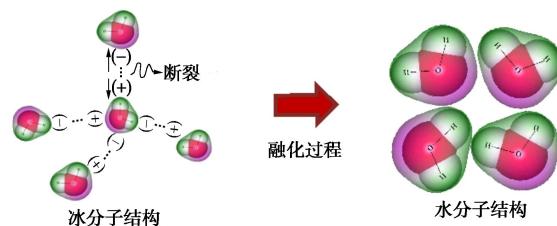


图 9 冰-水相变机理图

Fig. 9 Mechanism of ice-water phase change

对于土-结构界面之间的黏聚力而言, 界面黏聚力部分是由界面间水对土-结构表面的颗粒的吸引力提

供。因此正融解冻初期冻土-结构黏聚力增大, 这是由于冻土-结构之间的冰逐渐融化, 未冻水含量增大、接触表面及土颗粒间吸附力增大^[21]。此时界面剪切强度变化较小冻结力损失较低, 进一步可知由冻结力降低而导致界面黏聚力降低则更小, 可见在解冻初期吸附力增大是导致界面黏聚力总体呈上升趋势的主要原因。随着融化程度的加深, 界面黏聚力开始下降, 这可能是由于富冰区逐渐融化为富水区, 界面冻结力完全丧失^[2, 22], 同时试样在融化前先经低温冻结, 而冻结作用会使二元体界面及土体内部中的液态水相变成固态冰, 引起界面及土体内部孔隙增大^[23], 导致黏聚力下降。再者, 在水势差的作用下内部水分再次迁移, 自由水在试样中反复迁移后界面处及土颗粒之间初始黏结劣化, 而界面处原富水区形成大量的孔隙及微裂缝, 从而导致正融解冻后期界面黏聚力下降。当试样内部水分场重新分布后, 水势差逐渐恢复, 冻土-结构界面黏聚力逐渐稳定。

3.3 正融过程界面抗剪强度变化特征

基于试验结果得到正融过程界面温度-未冻水含量-抗剪强度三者之间的内在联系。由图 7 可知整个正融过程中随着界面温度升高, 未冻水含量逐渐上升相应界面抗剪强度则逐渐降低。尤其在相变阶段, 不同法向压力下界面抗剪强度出现聚集现象。而聚集现象的出现不仅表征着法向压力对界面抗剪强度影响削弱, 而且造成界面强度的大幅降低。由温度-未冻水含量-抗剪强度之间的关系及冰-水相变机制进一步分析可知冻土-结构融化至相变阶段时, 界面处冰的赋存状态极不稳定对热量极为敏感, 而正融过程中试样在吸收外界热量的同时法向压力的增加造成剪切过程中界面之间摩擦力增加, 剪切过程中产生的摩擦热加快了界面冰晶的融化, 对冰-水相变产生促进作用。最终导致了在相变阶段法向压力对抗剪强度的影响降低, 抗剪强度出现聚集现象。

4 结 论

本文基于 NMR 分层测试技术对正融过程中冻土-结构界面处进行未冻水含量测试, 同时开展冻土-结构二元体室内剪切试验, 得到以下 4 点结论。

(1) 正融过程中冻土-结构界面处未冻水含量变化有 3 个特点。解冻初期温度升高界面未冻水含量变化较小, 而融化至-5℃时大量冰开始融化未冻水含量迅速上升, 随着试样融化至正温时界面未冻水含量趋于稳定。

(2) 由 T2 曲线变化可知正融过程中冻土-结构界面从小孔隙冰晶体融化开始, 随着融化程度的加深大孔隙的冰也开始融化, 最后直至界面处冰完全融化。

(3) 根据正融过程界面未冻水含量-抗剪强度的变化规律可将正融过程中抗剪强度变化过程分为冻结阶段、相变阶段、融化阶段 3 个阶段。

(4) 冻土-结构在正融过程中界面内摩擦角、黏聚力呈“此消彼长”的变化特征, 其中随着解冻程度加深界面内摩擦角呈先减小后增大, 而界面黏聚力呈现先增大后相对减小。

参考文献:

- [1] 马 巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50 a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 625-640. (MA Wei, WANG Da-yan. Retrospect and prospect of chinese frozen soil mechanics research 50a[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625-640. (in Chinese))
- [2] 王 博, 刘志强, 赵晓东, 等. 高压正融土与结构接触面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3540-3546. (WANG Bo, LIU Zhi-qiang, ZHAO Xiao-dong, et al. Experimental study on shearing mechanical characteristics of thawing soil and structure interface under high pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3540-3546. (in Chinese))
- [3] LADANYI B. Frozen soil-structure interfaces[J]. Studies in Applied Mechanics, 1995, 42(6): 3-33.
- [4] RIST A, PHILLIPS M, SPRINGMAN S M. Inclinable shear box simulations of deepening active layers on perennially frozen scree slopes[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(1): 26-38.
- [5] WEN Z, YU Q, MA W, et al. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength[J]. Cold Regions Science & Technology, 2016, 131: 108-115.
- [6] LIU J, LÜ P, CUI Y, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 104: 1-6.
- [7] LIU J, CUI Y, WANG P, et al. Design and validation of a new dynamic direct shear apparatus for frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106: 207-215.
- [8] 石泉彬, 杨 平, 王国良. 人工冻结砂土与结构接触面冻结强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2142-2151. (SHI Quan-bin, YANG Ping, WANG Guo-liang. Experimental study on freezing strength of artificial frozen sand and structural contact surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2142-2151. (in Chinese))
- [9] 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(6). (SHI Quan-bin, YANG Ping, YU Ke, et al. Experimental study on secondary peak freezing strength of frozen soil and structural contact surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(6): 2025 - 2034. (in Chinese))
- [10] 温 智, 俞祁浩, 张建明, 等. 青藏直流输变电工程基础冻结强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2262 - 2267. (WEN Zhi, YU Qi-hao, ZHANG Jian-ming, et al. Experimental study on foundation freezing strength of Qinghai-Tibet DC power transmission and transformation project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2262 - 2267. (in Chinese))
- [11] 冷毅飞, 张喜发, 杨凤学, 等. 冻土未冻水含量的量热法试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3758 - 3764. (LENG Yi-fei, ZHANG Xi-fa, YANG Feng-xue, et al. A calorimetric test study on the unfrozen water content of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3758 - 3764. (in Chinese))
- [12] 李顺群, 高凌霞, 柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1173 - 1177. (LI Shun-qun, GAO Ling-xia, CHAI Shou-xi. Study on the significance and interaction of the influencing factors of mechanical properties of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1173 - 1177. (in Chinese))
- [13] 齐吉琳, 马 巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 133 - 143. (QI Ji-lin, MA Wei. Mechanical properties and research status of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 133 - 143. (in Chinese))
- [14] WATANABE K, WAKE T. Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR[J]. Cold Regions Science & Technology, 2009, **59**(1): 0 - 41.
- [15] MOHNKE O, YARAMANCI U. Smooth and block inversion of surface NMR amplitudes and decay times using simulated annealing[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, **50**(1): 163 - 177.
- [16] ZHOU K, BIN L I, JIELIN L I, et al. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, **25**(4): 1254 - 1261.
- [17] LI J L, ZHOU K P, LIU W J, et al. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, **26**(11): 2997 - 3003.
- [18] 寇璟媛, 滕继东, 张 升. 冻土未冻水含量与孔径分布的试验探究[J]. 西安科技大学学报, 2018(2): 246 - 252. (KOU Jing-yuan, TENG Ji-dong, ZHANG Sheng. Experimental study on unfrozen water content and pore size distribution of frozen soil[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018(2): 246 - 252. (in Chinese))
- [19] 谭 龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(6): 1566 - 1572. (TAN Long, WEI Chang-fu, TIAN Hui-hui, et al. Low-field NMR experimental study of unfrozen water content in frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(6): 1566 - 1572. (in Chinese))
- [20] 吉延峻, 贾 昆, 俞祁浩, 等. 现浇混凝土-冻土接触面冻结强度直剪试验研究[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(1): 86 - 91. (JI Yan-jun, JIA Kun, YU Qi-hao, et al. Direct shear tests of freezing strength at the interface between cast-in-situ concrete and frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(1): 86 - 91. (in Chinese))
- [21] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese))
- [22] 何鹏飞, 马 巍, 穆彦虎, 等. 冻土-混凝土界面冻结强度特征与形成机理研究[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(23): 127 - 133. (HE Peng-fei, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Study on freezing strength characteristics and formation mechanism of frozen soil-concrete interface[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(23): 127 - 133. (in Chinese))
- [23] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))