

冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响

晏长根¹, 王 婷¹, 贾海梁², 徐 伟³, 訾 凡², 陶 悦¹, 威 巍¹, 王亚冲¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
3. 甘肃省民航定临高速公路管理有限公司, 甘肃 定西 743099)

摘要: 对含水率为 18.3% 的非饱和粉土进行了冻融过程中不同温度下的直剪试验, 用核磁共振测定了冻融过程中孔隙水的相变过程, 并分析了未冻水、孔隙冰对其力学性质的影响机制。试验结果表明: (1) 非饱和粉土冻结可分为过冷段($> -1.15\text{ }^{\circ}\text{C}$)、快速冻结阶段($-1.15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$)和稳定冻结阶段($< -2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 快速冻结阶段 76% 的孔隙水冻结, 而稳定冻结阶段未冻水含量只减少 7%; (2) 冻融过程中黏聚力随温度发生显著变化, 内摩擦角变化幅度很小; (3) 冻结过程中抗剪强度的变化主要发生在稳定冻结阶段, 快速冻结阶段黏聚力仅增大 38.5%, 内摩擦角基本无变化, 而稳定冻结阶段黏聚力增大 123.5%, 内摩擦角降低 12%。得到以下结论: (1) 快速冻结阶段黏聚力增大主要是由于孔隙水冻结导致基质吸力增大, 毛细黏聚作用增强; 稳定冻结阶段黏聚力增大主要是由于冰对土颗粒胶结强度增大; (2) 含冰量变化不大时, 冻土抗剪强度主要受冰对土颗粒胶结强度的控制, 而此胶结强度决定于未冻水膜的厚度; (3) 稳定冻结阶段内摩擦角降低主要由孔隙中水冰相变发生体积膨胀时对土颗粒骨架的作用力导致。

关键词: 土力学; 冻融过程; 未冻水含量; 非饱和粉土; 抗剪强度

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)06 - 1252 - 09

Influence of the unfrozen water content on the shear strength of unsaturated silt during freezing and thawing

YAN Changgen¹, WANG Ting¹, JIA Hailiang², XU Wei³, ZI Fan², TAO Yue¹, WEI Wei¹, WANG Yachong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Gansu Provincial Public Aviation Brigade, Dinglin Highway Management Co., Ltd., Dingxi, Gansu 743099, China)

Abstract: A series of direct shear tests on unsaturated silt with a water content of 18.3% during freezing and thawing were conducted, and the phase composition of pore water was measured by NMR during the shear process. Effects of the unfrozen water content and the ice content on mechanical properties of the tested silt were analyzed. The results indicate that the freezing process of unsaturated silt can be divided into super-cooling stage $> -1.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, no phase change), rapid freezing stage ($-1.15\text{ }^{\circ}\text{C} - -2\text{ }^{\circ}\text{C}$) where 76% of the pore water freezes, and stable freezing stage ($< -2\text{ }^{\circ}\text{C}$) where the unfrozen water content only decreases by 7%. The cohesion changes significantly with the temperature during the process of freezing and thawing while the friction angle

收稿日期: 2018 - 06 - 25; **修回日期:** 2018 - 10 - 25

基金项目: 甘肃省交通运输厅科研项目(2017 - 002); 国家自然科学基金资助项目(41702334); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102218412)

Supported by the Research Project of Gansu Province Department of Transportation(Grant No. 2017 - 002), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41702334) and Special Funds of Basic Scientific Research of Central Universities(Grant No. 300102218412)

作者简介: 晏长根(1975 -), 男, 2007 年于中国科学院地质工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事公路边坡及地下工程方面的教学与研究工作。
E-mail: yanchanggen@163.com. 通讯作者: 王 婷(1993 -), 女, 现为硕士研究生。E-mail: 897340409@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0743

varies slightly. The change of the shear strength of silt occurs primarily within the stable freezing stage, where the cohesion increases by 123.5% and the friction angle decreases by 12%. For the rapid freezing stage, the cohesion only ascends by 38.5% and the friction angle has no obvious change. It can be concluded that, within the rapid freezing phase, the freezing of the pore water drives the matrix suction to increase, which results in increasing of the cohesion, while that, within the stable freezing phase, the increase of the cementation strength between ice and soil particles leads to a rise of the cohesion. When the ice content changes slightly, the shear strength of frozen silt is mainly controlled by the cementation strength between ice and soil particles which depends on the thickness of the unfrozen water film. The decrease of the friction angle within the stable freezing phase is mainly caused by the force acting on the particle skeleton generated by volumetric expansion of the pore water upon freezing.

Key words: soil mechanics; freezing and thawing processes; unfrozen water content; unsaturated silt; shear strength

1 引言

我国冻土分布广泛, 冻土区许多工程的建设以及安全稳定都受到冻融作用的影响^[1]。对此, 国内外学者对冻土物理力学参数的变化规律及影响因素进行了大量的研究。

N. A. Tsytovich 和 M. I. Sumgin^[2]对不同温度下冻土单轴抗压强度进行了大量试验, 发现冻土单轴抗压强度随温度的降低而增大。E. Chamberlain 等^[3-4]为了解冻土的高压特性, 进行了高围压下冻土的三轴压缩试验, 发现冻土的强度随围压的增大而先增大后减小。F. D. Haynes 和 J. A. Karameswaran^[5]研究了冻土抗拉强度随温度的变化规律, 发现在一定的温度范围内, 冻土的抗拉强度随着温度的降低而近似地成正比增大。F. H. Sayles 和 D. L. Carbee^[6]研究了不同干密度、不同含水率条件下, 含冰量对冻土单轴抗压强度的影响, 发现饱和粉土的初始破坏强度随体积含冰量的增加而增大。赖远明等^[7]改进了 Ducan-Chang 模型, 使之对于冻结砂土的应变硬化及应变软化现象均适用, 其提出的非线性莫尔强度准则, 很好地描述了冻结砂土剪切强度随围压增大而先增大后减小的规律。马小杰等^[8]对高温 - 高含冰量冻土分别开展了不同温度、不同含水率的冻结黏土单轴无侧限抗压强度试验, 发现当温度高于 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 高含冰量冻土随含水率的增加, 单轴抗压强度增大; 当温度低于 $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 高温 - 高含冰量冻结黏土存在最不利含水率。谭玉才等^[9]与亢锋和刘志伟^[10]分别通过试验研究和分析前人成果的方法, 研究温度、含水量、含盐量及土性等对冻土强度的影响规律, 通过回归分析, 给出了冻土强度与上述各因素之间关系的公式。李顺群等^[11]对冻土力学性质影响因素和各因素之间的交互作用

进行研究, 发现温度对冻土力学性质的影响最明显, 并且温度、含水率和应变速率对强度的影响存在明显的交互作用。牛亚强等^[12]研究了初始含水率对冻结粉质黏土变形和强度的影响规律, 发现当初始含水率较低时, 随着围压的增大冻结粉质黏土相继出现应变软化和应变硬化特征, 当初始含水率大于 16% 时, 其应力 - 应变关系主要呈现出应变软化特征。孙义强^[13]研究了粉质黏土不同温度、不同含水率的抗剪强度特性, 发现在低围压下, 温度降低时破坏强度近似线性增长, 破坏强度随含水率变化存在临界值, 建立了综合考虑温度及含水率的冻结粉质黏土抗剪强度模型。刘振亚等^[14]对非饱和粉质黏土冻结温度和冻结变形进行研究, 发现基质吸力越大冻结温度越低, 非饱和粉质黏土冻结变形随饱和度变化存在 2 种截然不同的机制, 饱和度较低时, 冰水相变影响较小, 饱和度较高时, 冰水相变占主导作用, 导致土体结构破坏。

此外, 国内外学者对各因素影响下冻土强度的变化机制进行了研究。J. M. Ting 等^[15]根据冻土物理力学参数变化的大量研究成果, 研究了冻土中冰 - 土颗粒骨架以及冰土的相互作用, 认为冻土强度的发挥有冰的强度、土颗粒骨架的强度以及冰土相互作用 3 个方面, 由于冰相和未冻水膜的存在, 即使在冻结砂土中颗粒的直接接触也不多, 冰的力学性质在变形的初始阶段起到至关重要的作用, 而变形的后期土骨架的作用逐渐加强。马巍等^[16]对高围压下冻土强度弱化的机制进行分析, 发现围压作用下影响冻结粉质黏土强度弱化的主要原因是孔隙冰的压融和微裂隙的发育。沈忠言和吴紫汪^[17]对冻土三轴强度破坏准则的基本形式及其与未冻水含量的相关性进行研究, 指出冻土强度包络线偏离莫尔 - 库仑线其中的一个根本原因是, 围压作用下孔隙冰部分压融和土的冻节点下降, 引起土中未冻水含量

增加, 强度变化问题的研究应从未冻水含量的变化入手。马玲等^[18]对冻结砂土进行了不同温度和围压下的三轴剪切试验, 发现随着围压的增大, 颗粒破碎率增大使得冻土的抗剪强度降低, 破碎率达到极限以后, 由于破碎的颗粒重排列又导致抗剪强度有所提高。刘振亚^[19]进行了非饱和冻土力学试验及激光扫描共对焦显微镜(laser scanning confocal microscopy, LSCM)试验, 发现非饱和冻结粉质黏土力学特性中体积含冰量、冰水相变体变与冰胶结黏聚力为其主控因素。

现有研究集中在对冻土物理、力学性质变化的观测和描述, 各物理、力学参数的变化则多从冻土中孔隙冰的作用进行定性阐释。笔者认为冰和未冻水同时存在, 且孔隙冰和土颗粒之间存在未冻水膜, 对冻土强度的变化有着重要影响, 对其影响的研究应结合未冻水含量与冻土强度的变化关系做定量分析。而温度是影响未冻水含量的一个重要因素且可控制, 因此有必要对不同温度下未冻水含量和冻土强度变化进行研究。

本文对含水率为 18.3% 的非饱和粉土进行了冻融过程中抗剪强度试验, 用核磁共振测定了冻融过程中孔隙水的冻结过程, 并分析了未冻水含量、孔隙冰含量对其力学性质的影响。综合分析上述结果, 对冻融过程中黏聚力和内摩擦角随未冻水含量的变化过程进行了分析, 继而从未冻水含量变化的角度分析了孔隙冰对黏聚力和内摩擦角的影响机制。

2 试样制备与试验方案

2.1 试样制备

试验所用土样来自甘肃省临夏回族自治州在建双达高速公路边坡, 其液限为 28%, 塑限为 18%, 颗粒组成如图 1 所示, 其分类为粉土, 其中含有少

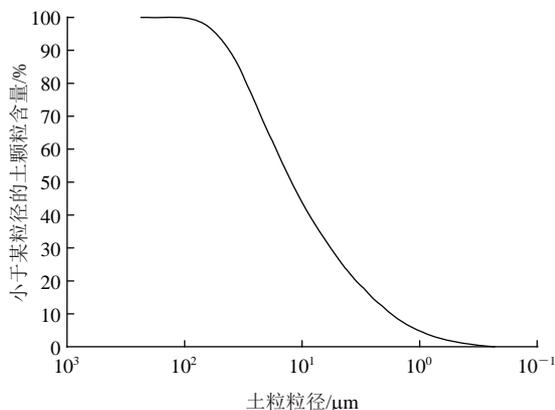


图 1 土体颗粒级配曲线

Fig.1 Particles gradation curve of soil

量的黏粒。根据规程^[20]中细粒土扰动直剪样的制备要求, 将土样风干后过 2 mm 筛, 制备含水率为 18.3% 的湿润土样。土样配置好后静置 24 h, 测量湿润土样中 3 个不同位置的含水率, 差值满足含水率测定的允许平行差。控制干密度为 1.6 g/cm^3 , 采用击实法制备出直径为 61.8 mm、高 20 mm 的直剪样和直径 39.1 mm、高 50 mm 的核磁共振试样, 用保鲜膜包裹并放入保湿缸, 静置 48 h 后进行试验。

2.2 试验方案

(1) 冻融过程中土体抗剪强度变化

选取冻融过程中以下 11 个温度点进行直剪试验: $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \text{ }^\circ\text{C}$, $-2 \text{ }^\circ\text{C}$, $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, $-7 \text{ }^\circ\text{C}$, $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, $-7 \text{ }^\circ\text{C}$, $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, $-2 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \text{ }^\circ\text{C}$, $15 \text{ }^\circ\text{C}$, 每个温度点 8 个试样, 进行 2 组平行直剪试验。为了模拟自然条件下的冻融过程, 开始时将所有直剪样放入低温试验箱, 将试验箱温度调为 $-2 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 h 后取出 8 个直剪试样快速进行快速剪切试验。之后, 将可控温低温试验箱温度依次调为指定温度, 每个温度均持续 3 h 后进行快剪试验, 直至测试完所有温度点。

冻融试验采用 DW-40 可控温高精度低温试验箱, 精度 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。直剪试验采用南京土壤仪器有限公司的土工试验微机控制数据采集处理系统, 快剪速率为 0.6 mm/min , 竖向压力为 50, 100, 150, 200 kPa(土样为坡表土, 选择较小的竖向压力进行试验)。为了保证直剪过程中试样的温度, 将剪切盒的上下盒与试样一起放入低温试验箱中, 进行直剪试验时先将剪切盒上下盒取出安装好后再将试样从低温试验箱中取出, 在进行直剪试验时打开空调对直剪室降温。

(2) 冻融过程中土体未冻水含量及核磁共振 T2 谱变化

冻融过程中未冻水含量变化的测试采用苏州纽迈科技公司生产 MacroMR12-150H-I 型低温核磁共振微结构分析与成像系统, 该系统配备有低温环境系统, 可实现冻融过程中实时的核磁共振测试。

3 核磁共振测试原理

3.1 核磁共振测试未冻水含量的原理

在进行核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)检测之前, 土体孔隙水中的 H 质子是随机取向排列的。当土试样放入仪器中时, 仪器的磁场使这些质子磁化。仪器的永磁场使质子有沿着磁场方向的磁化矢量, 然后发射交变电磁场使这些被极化

的质子从新的平衡位置翻转。撤销交变磁场后，质子开始进动回到原来的平衡位置，这一过程叫做弛豫^[21]。通常通过衡量孔隙水的弛豫时间 T_2 来判断土中孔隙水的变化， T_2 表示液体水中进动的质子在横向上的弛豫时间^[22]。横向磁化矢量强度即核磁扫描时测得的信号强度，其与质子数量成正比。对于同一个样品，其信号大小的变化受温度和物质变化的影响^[23]。土中水冻结成冰后，冰的信号在核磁中不显示，土中水冻结后测得的核磁信号主要来自于土样中的未冻水。

3.2 低温核磁共振温度修正

温度对核磁共振信号有一定程度影响，进而影响未冻水含量的测定。根据居里定律，土体在正温区间其孔隙水核磁信号强度与温度之间的线性关系，采用正温区实测数据绘制顺磁线性回归线^[24]，并根据此线性回归线对负温区核磁信号进行修正，计算未冻水含量。计算方法如下：将正温区的顺磁线性回归线延长到负温区(见图 2)，在负温区的某一温度的未冻水含量等于某一温度下测得的核磁信号强度 a 值乘以未冻结的含水率除以该温度下回归线所示的信号强度 b 值。

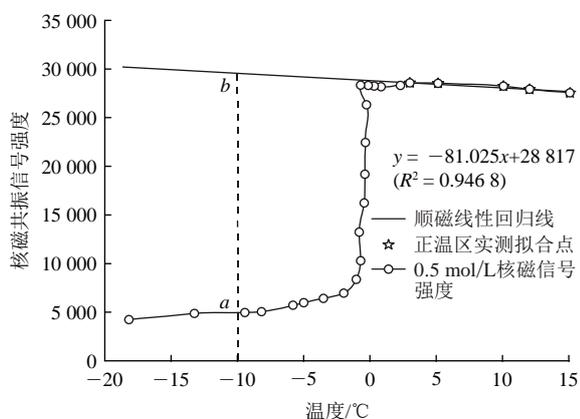


图 2 冻结过程中核磁信号与温度关系

Fig.2 Variation of NRM signal with temperature during freezing process

4 冻融过程中土体抗剪强度变化规律

4.1 冻融过程中未冻水含量随温度的变换规律

冻结过程中，土中未冻水含量的变化呈现出明显的“三阶段”(见图 3)，第 I 阶段：过冷阶段，过冷温度约为 $-1.15\text{ }^\circ\text{C}$ ，未冻水含量没有发生显著变化；第 II 阶段：快速冻结阶段($-1.15\text{ }^\circ\text{C} \sim -2\text{ }^\circ\text{C}$)，土中水由过冷温度达到冻结温度后，随着温度的降低土中水快速冻结，未冻水含量大幅度下降，含冰

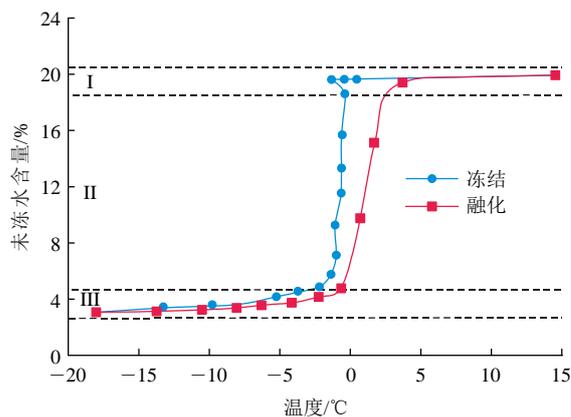


图 3 冻融过程中未冻水含量随温度的变化

Fig.3 Variation of unfrozen water content with temperature during freezing and thawing process

量快速增大^[24]， $-2\text{ }^\circ\text{C}$ 时，土中 76% 的水已经发生相变；第 III 阶段：稳定冻结阶段($< -2\text{ }^\circ\text{C}$)，当温度持续降低时，土中水缓慢冻结，未冻水含量变化很小，含冰量有小幅度的增大^[25]。

融化过程中随着温度的上升，未冻水含量变化只有 2 个阶段：稳定融化阶段($< -2\text{ }^\circ\text{C}$)，未冻水含量缓慢增加，滞回现象存在但不明显，快速融化阶段($> -2\text{ }^\circ\text{C}$)未冻水含量快速升高，滞回现象非常明显^[22, 26]。

4.2 冻融过程中黏聚力和内摩擦角随温度的变化规律

(1) 冻融过程中黏聚力随温度的变化规律

冻结过程中，土体黏聚力随着温度的降低而显著增大，温度从 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时，黏聚力增大 162%。冻融过程中黏聚力变化速率在 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时有小幅度变化(压融作用导致，具体见下文)，温度从 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时黏聚力增大速率较快，温度低于 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时，黏聚力增大速率较 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 之前略有减小。融化过程中，土体黏聚力随着温度的升高而显著降低，温度从 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时，黏聚力降低 127%。融化过程中黏聚力降低速率在 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时有小幅度变化，温度低于 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时，随着温度升高黏聚力降低速率较小，温度高于 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时，黏聚力降低速率相对较快。融化过程中温度升至 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 后，黏聚力随温度的变化存在回滞现象(见图 4)。

(2) 冻融过程中内摩擦角随温度的变化规律

冻结过程中，内摩擦角随温度降低而出现很小幅度的降低，温度从 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时内摩擦角降低 18.5%。冻融过程中内摩擦角变化速率在 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 略有变化(压融作用导致，见下文)，温度从 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时，内摩擦角降低速率相对较快，温度从

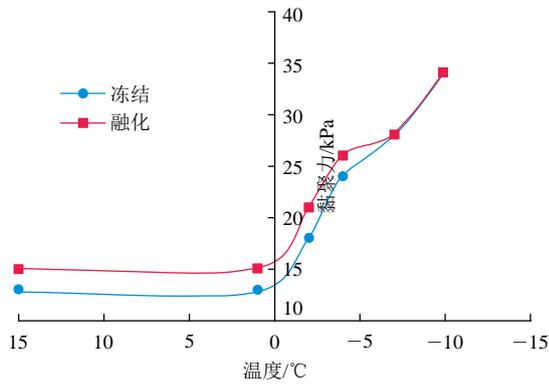


图4 冻融过程中黏聚力随温度的变化

Fig.4 Variation of cohesion with temperature during freezing and thawing process

-4 °C 降至 -10 °C 时, 内摩擦角降低速率缓慢。融化过程中, 内摩擦角随温度升高而出现很小幅度升高, 温度从 -10 °C 升至 15 °C 时内摩擦角升高 14.1%。融化过程中内摩擦角升高速率在 -4 °C 略有变化, 温度从 -10 °C 升至 -4 °C 时, 内摩擦角随温度升高速率非常缓慢, 温度从 -4 °C 升至 15 °C 时, 内摩擦角升高速率相对较快。融化过程中温度升至 -4 °C 后, 内摩擦角随温度的变化存在回滞现象(见图 5)。

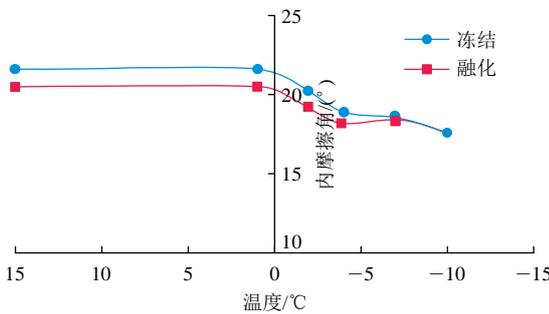


图5 冻融过程中内摩擦角随温度的变化

Fig.5 Variation of internal friction angle with temperature during freezing and thawing process

5 冻融过程中未冻水含量对抗剪强度

5.1 冻结过程中非饱和粉土中冰晶的形成过程

土中孔隙水分为自由水、毛细水和吸附水(本文所用粉土不含膨胀性黏土矿物, 因而不存在黏土矿物层间水), 当采用核磁共振测试土中水时, 不同赋存状态水对应不同弛豫时间(T_2)。当弛豫时间小于 3 ms 时, 对应吸附水; 当弛豫时间为 3~33 ms 时, 对应毛细水; 当弛豫时间大于 33 ms 时, 对应自由水^[27-28]。

随着温度的降低, 非饱和粉土不同温度下核磁共振 T_2 分布如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 16 °C

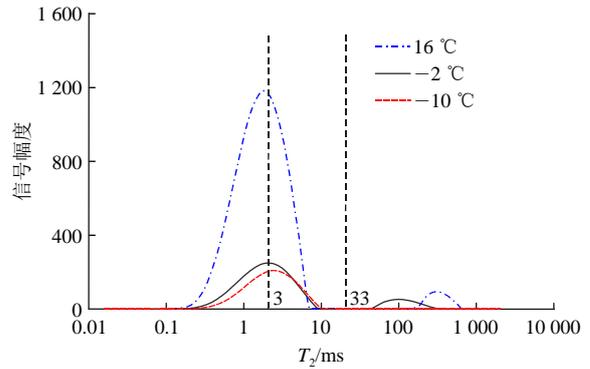


图6 冻结过程中不同温度下核磁共振 T_2 分布

Fig.6 NRM T_2 distributions of different temperatures during freezing and thawing process

时土中存在自由水、毛细水和吸附水; 当温度从 16 °C 降至 -2 °C 时(快速冻结阶段), 左侧峰的峰面积急剧减小, 即快速冻结阶段孔隙中自由水冻结, 此外大量毛细水和吸附水发生冻结; 温度从 -2 °C 降至 -10 °C 时(稳定冻结阶段), 左侧峰中毛细水部分峰面积出现很小幅度的降低, 吸附水部分峰面积降低幅度相对较大, 即稳定冻结阶段少量毛细水冻结(可能是部分细小孔隙中毛细水冻结), 吸附水冻结量相对较大。

根据以上分析, 非饱和粉土冻结过程中冰晶形成过程如图 7 所示, 即快速冻结阶段主要是孔隙中自由水和毛细水及部分吸附水冻结形成孔隙冰(见图 7 中 -2 °C), 稳定冻结阶段随着温度的降低, 部分吸附水继续发生冻结, 孔隙冰和土颗粒之间的未冻水膜逐渐变薄(见图 7 中 -10 °C)。

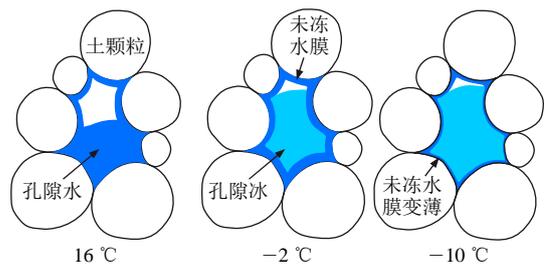


图7 冻结过程中孔隙冰形成过程

Fig.7 Formation process of pore ice during freezing

5.2 未冻水含量对土体黏聚力的影响

(1) 冻融过程中黏聚力随未冻水含量的变化规律

冻结过程中, 土体黏聚力随着未冻水含量的降低而呈折线形增大, 分 2 段, 每段均呈近线性, 如图 8 所示。温度从 0 °C 降至 -2 °C 时, 未冻水含量与初始含水量的比值从 100% 降至 24%, 土中 76% 的孔隙水发生冻结, 此时黏聚力增大了约 38.5% (-2 °C 时的黏聚力与融土黏聚力差值与融土黏聚

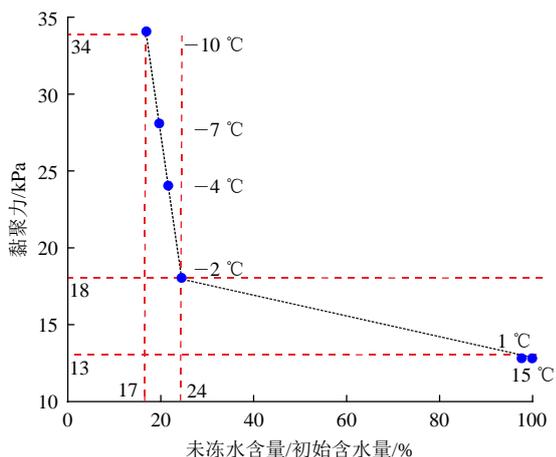


图 8 冻结过程中黏聚力随未冻水含量变化

Fig.8 Variation of cohesion with unfrozen water content during freezing process

力之比，压融作用导致此值偏大，见下文)。温度从 -2 °C 降至 -10 °C 时，未冻水含量与初始含水量的比值从 24% 降至 17%，土中 7% 的孔隙水发生冻结，此时黏聚力增大了约 123.5%。

融化过程中，土体黏聚力随未冻水含量的变化与冻结时呈现出相同的规律，如图 9 所示。温度从 -10 °C 降至 -2 °C 时，未冻水含量与初始含水量的比值从 17% 升至 21%，土中 4% 的水结的冰发生融化，黏聚力降低了约 87% (-10 °C 黏聚力与 -2 °C 黏聚力差值与融土黏聚力之比)。温度从 -2 °C 升至 15 °C 时，未冻水含量与初始含水量的比值从 21% 升至 100%，土中 79% 的水结的冰发生融化，黏聚力降低了约 40%。

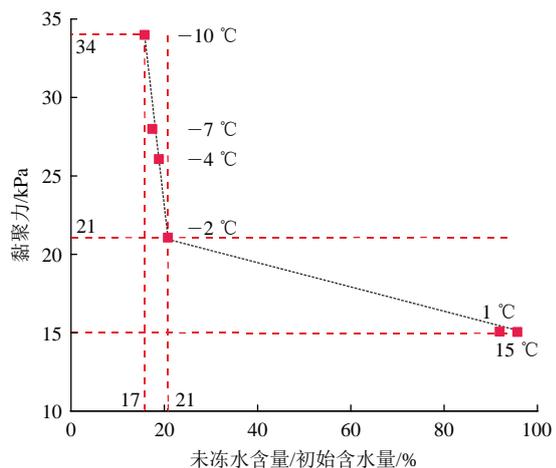


图 9 融化过程中黏聚力随未冻水含量变化

Fig.9 Variation of cohesion with unfrozen water during thawing process

(2) 冻融过程中未冻水含量对黏聚力的影响
快速冻结阶段土中 76% 的孔隙水冻结，黏聚力

增大不明显；而稳定冻结阶段 7% 的孔隙水冻结，导致了黏聚力的显著升高，即冻土黏聚力的升高主要由这部分孔隙水冻结引起。

非饱和冻土的黏聚力由 3 个部分组成，即融土的初始黏聚作用，毛细黏聚作用以及冰胶结作用^[29]。其中毛细黏聚作用是孔隙水冻结过程中，未冻水含量降低，土中基质吸力增大进而导致毛细黏聚作用增强；冰胶结作用是控制冻土强度的最主要因素，然而冰胶结作用受总含冰量(含冰量越大，胶结的土颗粒越多)、冰和土颗粒之间的未冻水膜作用等因素的制约。

根据孔隙冰的形成过程，快速冻结阶段主要是自由水和毛细水以及部分吸附水冻结形成孔隙冰，含冰量增大，此时土中仍有 24% 的孔隙水以未冻水膜的形式存在，未冻水膜较厚，孔隙冰对土颗粒胶结作用较弱。此阶段黏聚力增大主要是因为孔隙水冻结，土中基质吸力增大，毛细黏聚作用增强，黏聚力增大不明显。该阶段黏聚力主要受含冰量控制，含冰量越大，孔隙水冻结越多，毛细黏聚作用越强。稳定冻结阶段孔隙中部分吸附水继续发生冻结，此时含冰量增大幅度很小(胶结土颗粒数量变化很小)，土中 17% 的孔隙水主要以未冻水膜(常温下为吸附水膜)的形式存在，孔隙冰和土颗粒之间的未冻水膜变薄，冰对土颗粒的胶结强度快速增大。未冻水膜的厚度决定了冰与土颗粒的胶结强度^[30]，且未冻水膜的厚度与温度近似呈线性关系。此外，稳定冻结阶段孔隙中部分吸附水的冻结也会使得土中基质吸力增大，毛细黏聚作用增强。但由于稳定冻结阶段未冻水含量变化很小，毛细黏聚作用相对于冰胶结强度小。此时孔隙冰对土颗粒的胶结强度的增大使得黏聚力显著增大。该阶段冻土黏聚力大小主要受未冻水膜厚度的控制。因此，稳定冻结阶段，非饱和粉土的黏聚力与未冻水含量呈近似的线性关系 ($R^2 = 0.98$):

$$y = ax + b \tag{1}$$

式中: y 为冻土黏聚力(kPa), x 为未冻水含量占总含水量的百分比(%), a 和 b 为拟合系数。

融化过程中，稳定融化阶段孔隙中 4% 的吸附水结的冰融化，黏聚力快速降低；而快速融化阶段孔隙中 79% 的自由水和毛细水以及部分吸附水结的冰融化，黏聚力降低不明显，即冻土黏聚力的降低主要由 4% 的吸附水结的冰融化引起。融化过程中未冻水含量对冻土黏聚力的影响与冻结时相同。此外，融化过程中，未冻水的回滞现象使得黏聚力存

在回滞现象，黏聚力随温度的变化不可逆(见图 4)。

5.3 未冻水含量对土体内摩擦角的影响

(1) 冻融过程中内摩擦角随未冻水含量的变化规律

冻结过程中，土体内摩擦随着未冻水含量的降低而呈折线形增大，分 2 段，每段均呈近线性，如图 10 所示。快速冻结阶段，未冻水含量与初始含水量的比值从 100% 降至 24%，土中 76% 的孔隙水发生冻结，此时内摩擦角降低了约 6.5%(-2 °C 时的内摩擦角与融土内摩擦角差值与融土内摩擦角之比，压融作用导致此值偏大，见下文)。稳定冻结阶段，未冻水含量与初始含水量的比值从 24% 降至 17%，土中 7% 的孔隙水发生冻结，此时内摩擦角降低了约 12%。

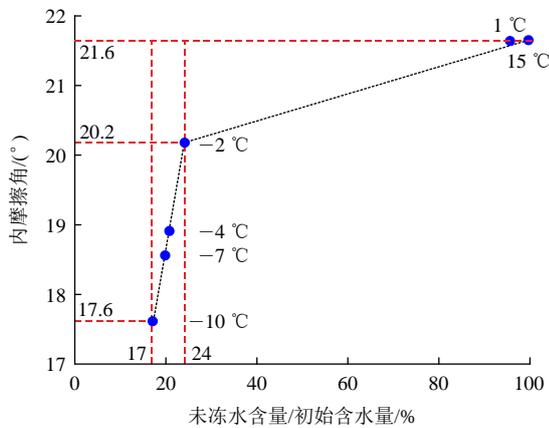


图 10 冻结过程中内摩擦角随未冻水含量变化

Fig.10 Variation of internal friction angle with unfrozen water content during freezing process

融化过程中，土体内摩擦角随未冻水含量的变化与融化时呈现出相同的规律，如图 11 所示。稳定融化阶段，未冻水含量与初始含水量的比值从 17%

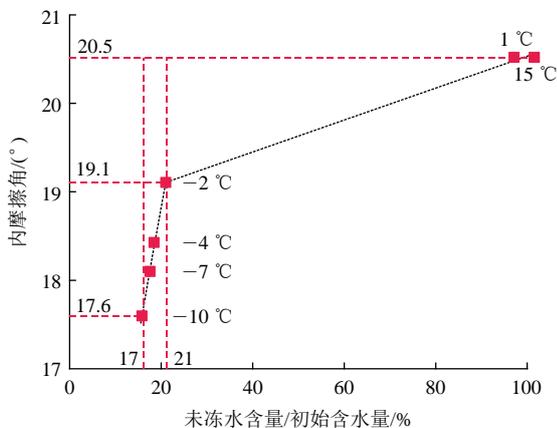


图 11 融化过程中内摩擦角随未冻水含量变化

Fig.11 Variation of internal friction angle with unfrozen water content during thawing process

升至 21%，土中 4% 的孔隙冰发生融化，内摩擦角增大了约 7.3%(-10 °C 内摩擦角与 -2 °C 内摩擦角差值与融土内摩擦角之比)。快速融化阶段，未冻水含量与初始含水量的比值从 21% 升至 100%，土中 79% 的孔隙冰发生融化，内摩擦角升高了约 6.9%。

(2) 冻融过程中未冻水含量对内摩擦角的影响

冻结过程中，快速冻结阶段土中 76% 的孔隙水冻结，内摩擦角基本没有变化(图 10 中内摩擦角的小幅度降低主要由压融作用导致，见下文)；而稳定冻结阶段 7% 的孔隙水冻结，内摩擦角出现相对显著的降低，即冻土内摩擦角降低主要由这部分孔隙水冻结引起。

土的内摩擦角包含 2 个部分：土颗粒的表面摩擦力，颗粒间的嵌入和联锁作用产生的咬合力。快速冻结阶段孔隙水冻结转化为孔隙冰，发生体积膨胀，充填孔隙，但此时孔隙中仍有 24% 的未冻水，未冻水膜较厚，孔隙水发生水冰相变时出现的体积膨胀对土颗粒骨架的作用力很小，土颗粒间的嵌入和联锁作用受孔隙冰的破坏程度很小，内摩擦角基本无变化。稳定冻结阶段 7% 的孔隙水发生冻结时，孔隙冰继续增大，未冻水膜变薄，此时孔隙水发生水冰相变时出现的体积膨胀对土颗粒骨架的作用力增大，土颗粒间的嵌入和联锁作用发生一定程度破坏，内摩擦角降低幅度相对较显著。

融化过程中，内摩擦角的升高主要由 4% 的吸附水结的冰融化引起。未冻水含量对内摩擦角的影响与冻结时相同。融化过程中，未冻水的回滞现象使得内摩擦角存在回滞现象，内摩擦角随温度的变化不可逆(见图 5)。

5.4 压融作用对土体抗剪强度的影响

(1) 压融作用对抗剪强度随温度变化的影响

冻土中孔隙冰在压力作用下发生融化，未冻水含量增大，即冻土的压融作用。冻结温度较高时，未冻水含量随着外荷载增大幅度较大，压融作用显著；冻结温度较低时，未冻水含量随外荷载增大的幅度很小^[31]，压融作用不显著。

冻融过程中不同法向压力下抗剪强度随温度变化如图 12 所示。从图中可以看出，温度在 0 °C ~ -4 °C 时，土中局部压融效应显著：① 冻结过程中，法向压力为 50 和 100 kPa 时，温度达到 0 °C 后抗剪强度随温度降低而快速增大；法向压力为 150 kPa 时，冻结温度达到 -2 °C 后抗剪强度开始随温度降低而增大；法向压力为 200 kPa 时，冻结温度达到 -4 °C 后抗剪强度开始随温度降低而增大。法向压

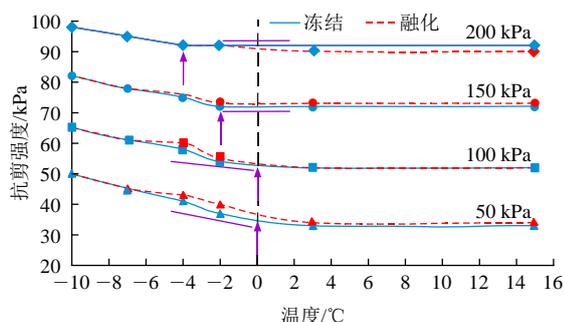


图 12 冻融过程中各竖向压力作用下抗剪强度随温度变化
Fig.12 Variation of shear strength with temperature under vertical pressure during freezing and thawing process

力越大,土中局部压融作用越大,未冻水含量越高,抗剪强度开始增大时对应的冻结温度越低(图 12 中箭头所示)。② 冻结过程中,法向压力越大,抗剪强度增大速率越低,法向压力为 200 kPa 时,土中冰全部被压融,未冻水含量基本与融土时相同,抗剪强度未增大。③ 冻融过程中,法向压力为 50 和 100 kPa 时,由于未冻水的回滞现象,冻土抗剪强度回滞圈明显;法向压力为 150 kPa 时,局部压融作用使得未冻水的回滞现象减弱,抗剪强度回滞圈很小,法向压力为 200 kPa 时在局部压融作用下土中未冻水含量回滞现象消失,抗剪强度回滞圈也消失。法向压力越大,冻土抗剪强度受未冻水回滞作用影响越小。

(2) 压融作用对黏聚力和内摩擦角测试值的影响

土体黏聚力和内摩擦角测试值是通过不同法向压力下抗剪强度反演计算得到,而根据图 12 可知冻结温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时法向压力越大局部压融作用越明显,压融作用对冻土黏聚力和内摩擦角测试值的影响如下: $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下当不同法向压力下局部压融作用相同时(假设条件下)土体黏聚力为 17 kPa,内摩擦角为 21.5° (融土为 21.6°); 当不同法向压力下压融作用不一致时(实际情况下)土体抗剪强度黏聚力为 18 kPa,内摩擦角为 20.2° 。可以看出压融作用使得冻土黏聚力和内摩擦角测试值偏大,图 4 和 5 中 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏聚力和内摩擦角随温度变化速率的改变主要由局部压融作用引起。此外,根据以上分析,温度高于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时内摩擦角变化主要由局部压融作用所导致。

6 结 论

本文研究了冻融过程中冻土强度的变化以及未

冻水含量、孔隙冰含量对冻土强度的影响,主要得到以下结论:

(1) 非饱和粉土的冻结过程分为过冷阶段 ($>-1.15\text{ }^{\circ}\text{C}$)、快速冻结阶段 ($-1.15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和稳定冻结阶段 ($<-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 快速冻结阶段 76% 的孔隙水冻结, 稳定冻结阶段仅 7% 的孔隙水冻结。

(2) 冻融过程中黏聚力随温度变化发生显著变化, 内摩擦角变化幅度很小, 试样在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结时, 黏聚力增大 162%, 内摩擦角降低 12%; 融化过程中试样在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 融化时, 黏聚力降低 127%, 内摩擦角增大 7%。

(3) 冻融过程中, 冻土黏聚力随未冻水含量呈折线形变化。快速冻结阶段 76% 孔隙水发生冻结, 土中毛细黏聚作用增强, 导致黏聚力增大 38.5%; 稳定冻结阶段土中 7% 的孔隙水发生冻结, 此阶段孔隙冰与土颗粒之间未冻水膜变薄, 冰对土颗粒的胶结强度快速增大, 黏聚力增大 123.5%; 未冻水膜厚度影响了冰对土颗粒的胶结强度; 融化过程中未冻水含量对黏聚力的影响和冻结时一致。

(4) 冻结过程中, 冻土内摩擦角变化主要出现在稳定冻结阶段, 此阶段孔隙中水冰相变时对土颗粒骨架的作用力增大, 使得土颗粒间的嵌入和联锁作用降低, 内摩擦角减小。融化过程中未冻水含量对内摩擦角的影响和冻结时一致。

(5) 冻土在剪切过程中, 一定压力范围内, 冻结温度越高, 局部压融作用越明显, 压融效应对冻土强度影响越显著。

参考文献(References):

- [1] 程国栋. 冻土力学与工程的国际研究新进展——2000 年国际地层冻结和土冻结作用会议综述[J]. 地球科学进展, 2001, 6(3): 293 - 299.(CHENG Guodong. International achievements of study on frozen soil mechanics and engineering-summary of the international symposium on ground freezing and frost action in soils[J]. Advances in Earth Science, 2001, 6(3): 293 - 299.(in Chinese))
- [2] TSYTOVICH N A, SUMGIN M I. Principles of mechanics of frozen ground[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1959.
- [3] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM J. The mechanism behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions[J]. Geotechnique, 1972, 22(3): 469 - 483.
- [4] JONES S J, PARAMESWARAN V R. Deformation behavior of frozen sand-ice materials under triaxial compression[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost. Fairbanks Alaska: TL Péwé and J. Brown, 1983: 17 - 22.
- [5] HAYNES F D, KARALIUS J A. Effect of temperature on the strength of frozen silt[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1977.
- [6] SAYLES F H, CARBEE D L. Strength of frozen silt as a function of

- ice content and dry unit weight[J]. *Engineering Geology*, 1981, 18(1-4): 55-56.
- [7] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 6(8): 1 612-1 617. (LAI Yuanming, CHENG Hongbin, GAO Zhihua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 6(8): 1 612-1 617.(in Chinese))
- [8] 马小杰, 张建明, 常小晓, 等. 高温-高含冰量冻结黏土强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2 498-2 502.(MA Xiaojie, ZHANG Jianming, CHANG Xiaoxiao, et al. Experimental research on strength of warm and ice-rich frozen clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2 498-2 502.(in Chinese))
- [9] 谭玉才, 李巍, 陈孝兵. 冻结粉质黏土强度同温度和含水率的关系[J]. *煤炭科技*, 2008, (1): 42-44.(TAN Yucui, LI Wei, CHEN Xiaobin. Relation between strength of frozen powdered clay and percentage of moisture under different temperatures[J]. *Coal science and Technology Magazine*, 2008, (1): 42-44.(in Chinese))
- [10] 亢锋, 刘志伟. 温度对冻土强度的影响研究[J]. *内蒙古公路与运输*, 2015, (4): 22-25.(KANG Feng, LIU Zhiwei. Study on the effect of temperature on the strength of frozen soil[J]. *Highways and Transportation in Inner Mongolia*, 2015, (4): 22-25.(in Chinese))
- [11] 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): 1 173-1 177.(LI Shunqun, GAO Lingxia, CHAI Shouxi. Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1 173-1 177.(in Chinese))
- [12] 牛亚强, 赖远明, 王旭, 等. 初始含水率对冻结粉质黏土变形和强度的影响规律研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(2): 499-506.(NIU Yaqiang, LAI Yuanming, WANG Xu, et al. Research on influences of initial water content on deformation and strength behaviors of frozen silty clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 499-506.(in Chinese))
- [13] 孙义强. 粉质粘土负温抗剪强度试验研究[硕士学位论文][D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.(SUN Yiqiang. Experimental study on negative temperature shear strength of silty clay[M. S. Thesis][D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.(in Chinese))
- [14] 刘振亚, 刘建坤, 李旭, 等. 非饱和粉质黏土冻结温度和冻结变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8): 1 381-1 387.(LIU Zhenya, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Experimental study on freezing point and deformation characteristics of unsaturated silty clay subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8): 1 381-1 387.(in Chinese))
- [15] TING J M, MARTIN R T, LADD C C. Mechanisms of strength for frozen sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(10): 1 286-1 302.
- [16] 马巍, 吴紫汪, 张立新, 等. 高围压下冻土强度弱化的机理分析[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 28-32.(MA Wei, WU Ziwan, ZHANG Lixin, et al. Mechanisms of strength weakening of frozen under high confining pressure[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 28-32.(in Chinese))
- [17] 沈忠言, 吴紫汪. 冻土三轴强度破坏准则的基本形式及其未冻水含量的相关性[J]. *冰川冻土*, 1999, (1): 22-26.(SHEN Zhongyan, WU Ziwan. Basic Form-of the failure criteria of triaxial strength of frozen and Its relativity to unfrozen water[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, (1): 22-26.(in Chinese))
- [18] 马玲, 齐吉琳, 余帆, 等. 冻结砂土三轴试验中颗粒破碎研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(3): 544-550.(MA Ling, QI Jilin, YU Fan, et al. Particle crushing of frozen sand under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(3): 544-550.(in Chinese))
- [19] 刘振亚. 非饱和冻土力学特性及微观机理研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2018.(LIU Zhenya. Mechanical characteristics and microstructure mechanism of unsaturated soil subjected to freezing condition[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.(in Chinese))
- [20] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG E40—2007 Test method of soils for highway engineering[S]. Beijing: Ministry of Transport, 2007.(in Chinese))
- [21] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 35-39.(XIAO Lizhi. NMR Imaging logging principles and applications[M]. Beijing: Science Press, 1998: 35-39.(in Chinese))
- [22] 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): 1 566-1 572.(TAN Long, WEI Changfu, TIAN Huihui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1 566-1 572.(in Chinese))
- [23] 汪红志, 张学龙, 武杰. 核磁共振成像技术试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 6-8.(WANG Hongzhi, ZHANG Xuelong, WU Jie. NMR imaging technology test tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2008: 6-8.(in Chinese))
- [24] TICE A R, OLIPHANT J L, ZHU Y L, et al. Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soils as determined by pulsed nuclear resonance and physical desorption data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(2): 37-39.
- [25] 李蒙蒙, 牛永红, 李先明, 等. 低含水率非饱和高温冻土模型[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 886-894.(LI Mengmeng, NIU Yonghong, LI Xianming, et al. Low moisture content unsaturated high temperature frozen soil model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 886-894.(in Chinese))
- [26] 路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻融过程中未冻水含量及冻结温度的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(7): 1 803-1 812.(LU Jianguo, ZHANG Mingyi, ZHANG Xiyin, et al. Experimental study on the content and temperature of unfrozen water in freeze-thaw process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1 803-1 812.(in Chinese))
- [27] MARTINEZ G A, DAVIS L A. Petrophysical measurements on shales using NMR[C]// Proceedings of the SPE/AAPG Western Regional Meeting. California: Society of Petroleum Engineers, 2000: 1-10. DOI: 10.2118/62851-MS.
- [28] COATES G R, MARSCHALL D, MARDON D, et al. A new characterization of bulk-volume irreducible using magnetic resonance[J]. *Log Analyst*, 1997, 39(1): 51-63.
- [29] 刘振亚, 刘建坤, 李旭, 等. 毛细黏聚与冰胶结作用对非饱和粉质黏土冻结强度及变形特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1 551-1 559.(LIU Zhenya, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Effect of capillary cohesion and ice cementation on strength and deformation of unsaturated frozen silty clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1 551-1 559.(in Chinese))
- [30] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(5): 918-930.
- [31] 张立新, 徐学祖, 张招祥, 等. 冻土未冻水含量与压力关系的实验研究[J]. *冰川冻土*, 1998, (2): 28-31.(ZHANG Lixin, XU Xuezu, ZHANG Zhaoxiang, et al. Experimental study of the relationship between the unfrozen water content of frozen soil and pressure[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, (2): 28-31.(in Chinese))